

ЛУЧШАЯ
КНИГА ГОДА
ПО ВЕРСИИ
ЖУРНАЛА TIME

ЗАПУТАННАЯ ЖИЗНЬ

КАК ГРИБЫ
МЕНЯЮТ МИР,
НАШЕ СОЗНАНИЕ
И НАШЕ БУДУЩЕЕ

МЕРЛИН
ШЕЛДРЕЙК

МЕРЛИН ШЕЛДРЕЙК



**МЕРЛИН
ШЕЛДРЕЙК
ЗАПУТАННАЯ
ЖИЗНЬ**

КАК ГРИБЫ МЕНЯЮТ МИР,
СОЗНАНИЕ И БУДУЩЕЕ



ОГИЗ

Издательство АСТ
МОСКВА

УДК 630+58.009
ББК 43+28.5
Ш42

Перевод оригинального издания:

Merlin Sheldrake
ENTANGLED LIFE:
How Fungi Make Our World, Change Our Minds and Shape Our Futures

Печатается при содействии литературных агентств
David Higham Associates и *The Van Lear Agency LLC*.

Шелдрейк, Мерлин.

Ш42 Запутанная жизнь. Как грибы меняют мир, наше сознание и наше будущее. / М. Шелдрейк; пер. с английского О. Ольховской. — Москва : Издательство АСТ, 2021. — 416 с. + [16 вкл.] ил. — (Интересный научпоп. Хиты Amazon).

ISBN 978-5-17-122572-8

Под словом «гриб» мы обыкновенно имеем в виду плодовое тело гриба, хотя оно по сути то же, что яблоко на дереве. Большинство грибов живут тайной — подземной — жизнью, и они составляют «разношерстную» группу организмов, которая поддерживает почти все прочие живые системы. Это ключ к пониманию планеты, на которой мы живем, а также наших чувств, мыслей и поведения.

Талантливый молодой биолог Мерлин Шелдрейк переворачивает мир с ног на голову: он приглашает читателя взглянуть на него с позиции дрожжей, псилоцибиновых грибов, грибов-паразитов и паутины мицелия, которая простирается на многие километры под поверхностью земли (что делает грибы самыми большими живыми организмами на планете). Открывающаяся грибная сущность заставляет пересмотреть наши взгляды на индивидуальность и разум, ведь грибы, как выясняется, — повелители метаболизма, создатели почв и ключевые игроки во множестве естественных процессов. Они способны изменять наше сознание, врачевать тела и даже обратить нависшую над нами экологическую катастрофу. Эти организмы переворачивают наше понимание самой жизни на Земле.

УДК 630+58.009
ББК 43+28.5

ISBN 978-5-17-122572-8

ENTANGLED LIFE © Merlin Sheldrake, 2020
© Перевод на русский язык, оформление.
ООО «Издательство АСТ», 2021

*С благодарностью к грибам,
научившим меня всему, что я знаю.*

ПРОЛОГ

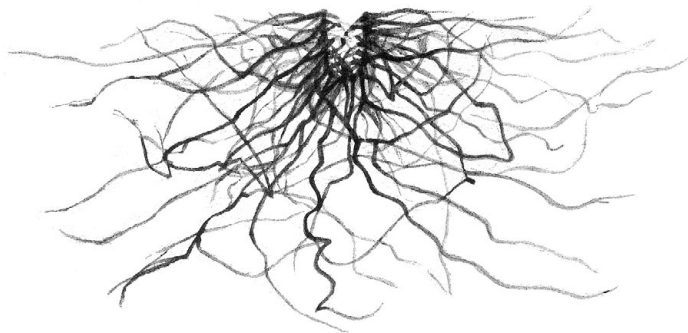
Я посмотрел вверх, на вершину дерева. От ствола, исчезающего в путанице лиан в пологе леса, ответвлялись орхидеи и папоротники. Высоко надо мной, громко захлопав крыльями, с резким криком взлетел со своего насеста тукан, и стая обезьян-ревунов разразилась медленно усиливающимися воплями. Дождь только-только прекратился, и тяжелые капли скатывались на меня с листьев неожиданными струями воды. Низко над землей стелился туман.

Корни дерева, изгибаясь, расползались прочь от основания ствола, теряясь в густых наносах опавших листьев, закрывавших почву в джунглях. Я постучал палкой по земле, отпугивая змей. Быстро пробежал и скрылся тарантул, и я опустился на колени. Проведя рукой вниз по стволу, я нащупал один из корней в мягкой как губка массе лесного мусора, в котором корни потоньше переплелись в плотный красно-коричневый клубок. Снизу волнами поднимался густой запах. По этому лабиринту сновали термиты, а тысяченожка свернулась кольцом, притворяясь мертвой. Мой корень спрятался в землю, и я совком осторожно расчистил место вокруг. Разрыхлив верхний слой почвы, я очень медленно, с максимальной осторожностью начал откапывать его, а он, извиваясь, удалялся от дерева у самой поверхности земли.

Через час я продвинулся примерно на метр. Мой корень стал теперь тоньше струны и начал бешено разрастаться. Трудно было проследить за ним, когда он переплетался

с соседними корешками, поэтому я лег на живот, почти касаясь лицом мелкой, прокопанной мною канавки. У некоторых корней был резкий ореховый запах, у других — запах древесный, с горчинкой. Но у корней моего дерева, когда я поскреб его ногтем, оказался смолистый пряный аромат. Несколько часов медленно и кропотливо продвигаясь вперед, я скреб корешки ногтем и принохивался к ним через каждые несколько сантиметров, чтобы не потерять след.

В течение дня я обнаруживал все больше отростков у откопанного мною корня. Выбрав несколько из них, я проследил их путь до самых кончиков, до того места, где они зарывались в гниющие листья или обломки сучьев. Окуная концы этих корешков в склянку с водой, я смывал с них грязь, а потом рассматривал под лупой. Отростки моего корня ветвились как маленькие деревья, и их поверхность была покрыта прозрачным, тонким как паутина слоем, выглядевшим влажным и липким. Именно эти хрупкие структуры я и хотел исследовать. От этих корешков в земле раскинулась, кружевным полотном оплетая корни соседних деревьев, грибница. Без нее не существовало бы моего дерева. Без подобных грибных сетей не было бы нигде ни одного растения. Все живое на Земле, включая меня, зависело от таких вот грибных сетей. Я тихонько потянул за мой корень и почувствовал, как шевельнулась земля.



ВВЕДЕНИЕ

БЫТЬ ГРИБОМ

Есть влажной любви мгновенья, когда небеса завидуют тому, что мы способны творить здесь, на земле.

— Хафиз Ширази

Грибы повсюду, но их легко не заметить. Они внутри и вокруг вас. Они поддерживают и питают и вас, и все то, что вам необходимо для жизни. Когда вы читаете эти слова, грибы продолжают изменять ход жизни, и так продолжается уже более миллиарда лет. Они поедают камень, создают почву, «переваривают» вредные, загрязняющие окружающую среду вещества, питают и убивают растения, выживают в космосе, вызывают видения, производят пищу, создают лекарства, управляют поведением животных и влияют на состав атмосферы Земли. Грибы дают нам ключ к познанию планеты, на которой мы живем, и того, как мы мыслим, чувствуем и ведем себя. И все же они живут тайной жизнью, большей частью скрытой от наших глаз, и более 90 % их видов остаются неописанными и неизученными. Чем больше мы узнаем о грибах, тем меньше видим смысла в жизни без них.

Грибы образуют одно из царств всего живого — категорию такую же многочисленную, как царство растений или животных. Микроскопические дрожжевые грибы и опенок настоящий, или *Armillaria*, грибница которого простирается на значительные расстояния и относится к самым большим организмам в мире, — все это грибы. Нынешней рекордсменке среди грибниц опенка настоящего сейчас от

2000 до 8000 лет, она находится в Орегоне, весит сотни тонн и расплзлась на 10 квадратных километров. Вероятно, есть экземпляры и большего размера, и старше, но они еще не открыты.

Многие из самых значительных событий на Земле были и являются результатом грибной активности. Растения выбрались из воды около 500 миллионов лет назад благодаря сотрудничеству с грибами, которые служили им в качестве корневой системы, пока растения не обзавелись собственными корнями. В наши дни жизнь более 90 % растений зависит от микоризных грибов — от греческого слова *μύκης*, означающего «гриб», и *ρίζα*, что значит «корень», — которые могут объединять деревья единой сетью. Эта сеть получила название *wood wide web*, то есть «вселесная паутина». Эта древняя связь породила всю известную жизнь на суше, будущее которой зиждется на способности грибов и растений непрерывно поддерживать здоровые взаимоотношения.

Возможно, растения и сделали нашу планету зеленой, но если бы мы смогли заглянуть на 400 миллионов лет назад, в девонский период, нас бы поразила иная форма жизни — прототакситы. Эти живые шпильки были частью ландшафта. Многие из них были выше двухэтажных домов. Ничто не могло сравниться с ними по размеру: растения уже существовали, но не достигали в высоту и метра, а ни одно позвоночное животное еще не покинуло водных глубин. В гигантских стволах селились мелкие насекомые, выедавая в них «залы» и коридоры. Эту загадочную группу организмов — считавшихся огромными грибами — составляли крупнейшие живые структуры на суше. Она просуществовала по крайней мере 40 миллионов лет, в 20 раз дольше, чем человеческий род на Земле.

И по нынешний день грибы создают новые экологические системы на Земле. Когда возникают вулканические острова или отступают, обнажая голые скальные породы, ледники, лишайники — союз грибов и водорослей или бактерий*, — первыми из живых организмов обосновываются

* Точнее, цианобактерий. — Прим. науч. ред.

там и создают почву, в которой после укоренятся растения. В хорошо развитых экосистемах дожди бы вскоре вымыли почву, не будь там густой мелкоячеистой грибной сети, которая удерживает ее. На нашей планете очень мало мест, где невозможно найти грибы. Они повсюду: в глубинных отложениях на морском дне, на поверхности пустынь, в ледяных долинах Антарктики, в наших телах. На листьях и стеблях одного-единственного растения могут существовать десятки и сотни различных видов грибов. Эти грибы проникают в промежутки между клетками растения, сплетаясь в бархатное полотно, и помогают защитить растение от болезней. Ни одно растение, выросшее в природных условиях, не обошлось без этих грибов; они такая же неотъемлемая его часть, как листья или корни.

Процветание грибов в таких разнообразных средах обитания зависит от многообразия их метаболических способностей. Метаболизм — это искусство химического преобразования. Грибы — мастера метаболизма, и они способны с бесконечной изобретательностью разведывать новые источники питания, кормиться отбросами, в чем с ними могут соперничать только бактерии. Используя смесь сильнодействующих ферментов и кислот, грибы способны разрушать самые устойчивые вещества на планете, начиная с лигнина — самой жесткой составляющей древесины — и заканчивая камнем. Им подойдут сырая нефть, полиуретан и взрывчатое вещество тринитротолуол, или просто тротил. Почти никакая среда не будет слишком агрессивной или экстремальной для выживания грибов. Вид грибов, выделенный из отходов горнодобывающей промышленности, является одним из самых устойчивых к радиации организмов и может помочь в очистке мест захоронения радиоактивных отходов. Взорвавшийся реактор в Чернобыле — место обитания большой популяции таких грибов. Некоторые такие грибы приспосабливаются даже к высокорadioактивным «горячим» частицам и, кажется, способны обуздать радиацию и использовать ее как источник энергии, подобно тому как растения используют солнечную энергию.

Когда мы пытаемся представить себе гриб, мы воображаем его плодовое тело. Но так же, как плоды растений представляют собой лишь часть значительно большей структуры, включающей ветви и корни, плодовое тело — это всего лишь место, где производятся споры. Для грибов споры — то же, что для растений семена, то есть возможность распространять потомство. Плодовое тело — это инструмент влияния на внешний мир — от ветра до белок, — которые должны помочь в распространении спор или хотя бы не мешать этому процессу. Плодовые тела — это видимая часть гриба, пикантная, соблазнительная, вкусная, а подчас и ядовитая. И все же плодовые тела — лишь один способ размножения среди многих других: подавляющее большинство видов грибов рассеивает споры, не формируя никакого плодового тела.

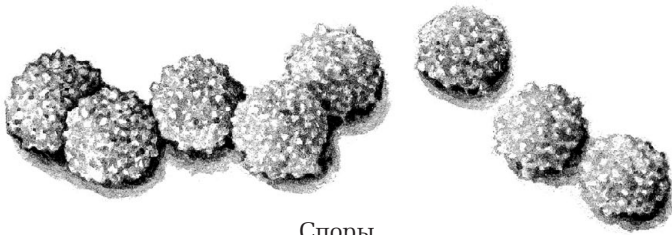
Мы все живем и дышим грибами благодаря изобилию всевозможных способов распространения грибных спор. Некоторые виды выбрасывают споры, которые ускоряются в 10 000 раз быстрее, чем космический челнок сразу после запуска, достигая скорости 100 километров в час. На свете мало живых организмов, способных передвигаться быстрее.

Другие виды грибов создают свой собственный микроклимат: споры поднимаются вверх вслед за испаряющейся с пластинок* влагой**. Грибы производят примерно 50 мега-тонн спор в год, что равно весу 500 000 голубых китов. Это делает их крупнейшим источником живых частиц в воздухе. Споры находятся в облаках и влияют на погоду, вызывая формирование капель воды, из которых образуется дождь, и ледяных кристаллов, из которых получаются снег и град.

Некоторые грибы, такие как дрожжи, путем брожения превращающие сахар в алкоголь и вызывающие подъем теста при выпечке хлеба, состоят из одиночных клеток, которые размножаются почкованием. Тем не менее большинство грибов образуют многоклеточные системы, известные

* Не только с пластинок. Гименофор может быть и трубчатым, и гладким. — *Прим. науч. ред.*

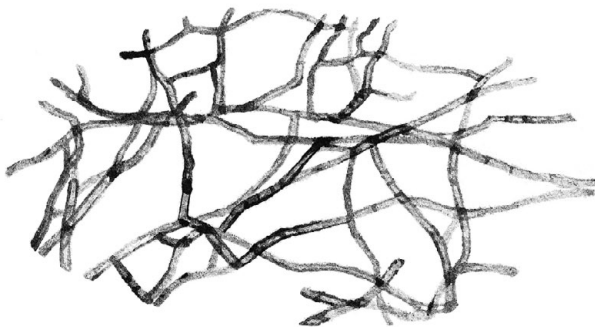
** Восходящие потоки воздуха возникают из-за разницы температур. То, что исходит от грибов и других организмов, только встраивается в эти потоки. — *Прим. науч. ред.*



Споры

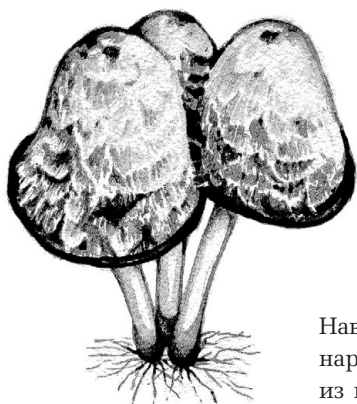
как гифы: тончайшие трубчатые структуры, которые разветвляются, сливаются и переплетаются в беспорядочную филигрань мицелия, или грибницы. Мицелий представляет собой самый распространенный тип организации грибов (габитус). Его разрастание точнее всего можно определить как тенденцию к исследованию, пусть и неупорядоченному. Вода и питательные вещества протекают через экосистемы внутри сетей мицелия. Мицелий некоторых видов грибов реагирует на электричество и проводит электрические волны по гифам подобно тому, как нейроны нервной системы животных передают электрические импульсы.

Гифы составляют мицелий, но из них состоят и более плотные структуры. Плодовые тела грибов возникают из спрессованных гифовых нитей. Плодовые тела в свою очередь способны и на другие подвиги, помимо разбрасывания спор. Некоторые, такие как трюфели, испускают дивные ароматы, что превратило их в одни из самых дорогих



Мицелий

пищевых продуктов в мире. Другие, такие как навозник белый (*Coprinus comatus*; копринус хохлатый), способны пробиться сквозь асфальт и приподнять тяжелые тротуарные плиты, хотя сами не отличаются жесткостью. Срезанный навозник белый можно поджарить и съесть. Если же вы оставите его в банке, его ослепительно-белая мякоть за несколько дней растворится, превратившись в черные как смоль чернила (иллюстрации к этой книге нарисованы чернилами из навозника белого).



Навозник белый, *Coprinus comatus*,
нарисованный чернилами
из навозника белого

Метаболическая изобретательность позволяет грибам вступать в разнообразные взаимоотношения. И корнями, и стеблями, и побегами растения во все время своего существования были тесно связаны с грибами, которые защищали их и снабжали питательными веществами*. Животные также зависят от грибов. Представители фауны, которые образуют одно из самых многочисленных и сложных сообществ после человеческих, это муравьи-листорезы. Численность их колоний может превышать 8 миллионов, и все особи населяют подземные гнезда, диаметр которых зачастую больше 30 метров. Жизнь муравьев-листорезов вращается вокруг гриба, который они выращивают в своих подземных пещерах и «кормят» кусочками листьев.

* Речь может идти о минеральных веществах. — Прим. науч. ред.

Существование человеческих сообществ переплетено с грибами не меньше. Грибковые болезни обходятся в миллиарды долларов убытков — пирикулярриоз риса (рисовая гниль) ежегодно губит столько риса, сколько было бы нужно, чтобы накормить более 60 миллионов человек. Древесные грибковые заболевания, от голландской болезни язвов до каштановой гнили (эндотиевого рака коры каштана съедобного), покоряют леса и ландшафты. Римляне молились богу Робигу, защищавшему всходы от грибка, который вызывает болезнь милдью, или ложномучнистую росу; однако они так и не смогли предотвратить голодные неурожайные годы, которые способствовали упадку Римской империи.

Влияние грибковых болезней увеличивается по всему миру: нерациональное ведение сельского хозяйства снижает способность растений образовывать связи с полезными грибами, от которых они зависят. Широкое использование противогрибковых химикатов привело к появлению новых грибковых форм, угрожающих здоровью как людей, так и растений. За последние 50 лет по миру распространилась благодаря торговле самая смертоносная среди известных болезней — грибок, инфицирующий земноводных. Из-за этой болезни вымерли уже 90 видов рептилий, и она грозит стереть с лица земли еще сотню. Сорт бананов «Кавендиш» (99 % импортных плодов именно этого сорта) сейчас уничтожается грибковой болезнью, уже в десятки раз сократившей его урожай. Она, возможно, приведет к его полному исчезновению в ближайшие десятилетия.

Однако подобно муравьям-листорезам люди научились использовать грибы для решения ряда насущных проблем. В действительности мы, вероятно, используем подсказанные грибами ходы значительно дольше, чем носим имя человека разумного. В 2017 году исследователи восстановили рацион неандертальцев, двоюродных братьев современного человека, вымерших примерно 50 тысяч лет тому назад. Они обнаружили, что один из них, страдавший дентальным абсцессом, употреблял с пищей плесневый грибок, производящий пенициллин, что указывает на осведомленность о его антибиотических свойствах. Существуют и другие,

не такие древние примеры, включая «ледяного человека», прозванного Этци. Его хорошо сохранившиеся останки, датированные примерно 5000 лет и относящиеся таким образом в эпоху неолита, были найдены в леднике. В день своей смерти Этци нес мешок, набитый кусками трутовика настоящего (*Fomes fomentarius*), вероятнее всего для разведения огня, и тщательно приготовленными кусочками березового трутовика (*Fomitopsis betulina*), которые наверняка собирался использовать в качестве лекарства. Коренное население Австралии обрабатывало раны плесневыми грибами, собранными с теневой стороны стволов эвкалиптов. В Талмуде рассказывается о лекарственном средстве на основе плесени, известном как «чамка», которое изготавливали из заплесневевшего зерна, вымоченного в финиковом вине.

Древнеегипетские папирусы, датируемые 1500 годом до н. э., упоминают лечебные свойства плесени, а в 1640 году королевский ботаник-травник, лондонец Джон Паркинсон описал использование плесени для лечения ран. Но только в 1928 году Александр Флеминг обнаружил, что некая плесень вырабатывает антибактериальное химическое вещество — пенициллин. Пенициллин стал первым современным антибиотиком и успел спасти бесчисленное количество жизней. Открытие Флеминга стало одним из поворотных пунктов в истории современной медицины. Возможно, оно помогло изменить соотношение сил во Второй мировой войне.

Оказалось, что пенициллин — соединение, способное защитить грибы от бактериальной инфекции, — защищает также и людей. В этом нет ничего необычного: хотя грибы очень долго смешивали с растениями, они в действительности ближе к животным — образчик классификационной ошибки, которую исследователи регулярно допускают при попытках разобраться в жизни грибов. На молекулярном уровне люди и грибы достаточно схожи, чтобы испытывать благотворное влияние одних и тех же биохимических инноваций. Когда мы используем лекарства, созданные грибами, мы очень часто заимствуем решение, подсказанное ими, и применяем его к своему организму. Грибы широко применяются в фармацевтике, и сегодня мы используем их

для получения не только пенициллина, но и других химических веществ, таких как циклоспорин (иммуноподавляющее лекарство, которое делает возможной пересадку органов), понижающие содержание холестерина в крови статины, множество сильнодействующих противовирусных и противораковых средств (включая стоящее миллиарды долларов лекарство «Таксол» (*Taxol*), первоначально представлявшее собой экстракт из грибов, обитающих внутри тисовых деревьев). И я не говорю уже об алкоголе (получаемом благодаря брожению, вызванному дрожжевыми грибами) и псилоцибине (активном компоненте психоделиков, которые, как продемонстрировали клинические испытания, способны вывести из глубокой депрессии и избавиться от тревожности). 60 % ферментов, используемых в промышленности, генерируются грибами, и 15 % всех вакцин производятся модифицированными штаммами дрожжей. Лимонная кислота, вырабатываемая грибами, необходима в производстве всех шипучих напитков. Мировой рынок съедобных грибов процветает: прогнозируется его рост с 42 миллиардов долларов в 2018 году до 69 миллиардов долларов в 2024 году. Продажи лекарственных грибов увеличиваются ежегодно.

Решения, которые подсказывают нам грибы, применимы не только в области человеческого здоровья. Радикальные грибные технологии могут помочь нам справиться со многими проблемами, возникающими из-за постоянных разрушительных воздействий на окружающую среду.

Противовирусные соединения, производимые грибным мицелием, позволяют бороться с синдромом разрушения пчелиных семей. Прожорливость грибов может быть использована для переработки и разложения вредных загрязняющих веществ, таких как сырая нефть, оставшаяся после разлива. Этот процесс известен как микоремедиация, или миковосстановление. Во время микофилтрации загрязненная вода пропускается через маты мицелия, которые задерживают тяжелые металлы и разлагают токсины. В процессе так называемого микопроизводства строительные материалы и текстиль, заменяющие пластики и кожу во многих областях человеческой деятельности, выращивают из мицелия.

Грибные меланины — пигменты, производимые грибами, — не подвержены влиянию радиации, и это многообещающий новый источник устойчивых к радиации биоматериалов.

Человеческие сообщества всегда учитывали паразитические виды грибного метаболизма. Перечисление пунктов длинного списка химических достижений грибов заняло бы не один месяц. И все же, невзирая на их потенциал, вопреки центральной роли, которую грибы сыграли во многих древних увлечениях человечества, им всегда уделяли лишь малую толику того внимания, которое отводили животным и растениям. По самым точным подсчетам, в мире существует от 2,2 до 3,8 миллиона видов грибов, то есть в 6–10 раз больше, чем предполагаемых видов растений. А это значит, что изучено и описано всего лишь 6 % всех видов грибов. Мы только начинаем познавать сложность и хитросплетения грибной жизни.

Сколько я себя помню, меня всегда зачаровывали грибы и те трансформации, которые случались благодаря им. Цельное бревно становится почвой, кусок сырого теста поднимается и превращается в хлеб, гриб вырастает за ночь. Но как? Подростком я справлялся со своей озадаченностью, находя способы как-то «связать» себя с грибами. Я собирал грибы и выращивал их у себя в спальне. Позднее я варил алкоголь в надежде узнать побольше о дрожжевых грибах и их воздействии на меня. Я восторгался тем, как мед превращается в медовуху, а фруктовый сок — в вино, и удивлялся тому, как результат этих трансформаций изменял ощущения — мои собственные и моих друзей.

К тому времени, как я начал изучать грибы систематически — стал студентом отделения прикладной ботаники в Кембридже (отделения прикладной микологии там не существует), — меня заинтересовал симбиоз, тесная взаимосвязь, возникающая между неродственными организмами. История жизни оказалась наполненной разными видами тесного сотрудничества.

Как я выяснил, грибы обеспечивают многие растения минеральными веществами, такими как фосфор и азот, а взамен получают углеводы и липиды, производимые растения-

ми в процессе фотосинтеза, когда те поглощают солнечный свет и углекислый газ из воздуха. Благодаря взаимоотношениям растений и грибов возникла биосфера, которую мы наблюдаем и ощущаем сейчас. Эти взаимоотношения и ныне поддерживают все живое на Земле, а мы, кажется, почти не разобрались в них. Как возникли эти взаимоотношения? Как растения и грибы общаются между собой? Как бы мне узнать побольше о жизни этих организмов?

Я решил продолжить занятия наукой в докторантуре, чтобы ближе рассмотреть микоризные взаимосвязи в тропических лесах Панамы. Вскоре после этого я перебрался в полевой лагерь на острове. Исследования проводились под эгидой Смитсоновского института тропических исследований. И мой остров, и окрестные полуострова, полностью покрытые лесом, были частью заповедника. Единственным расчищенным от зарослей местом была поляна, где находились общежития, столовая и лаборатории. Там же расположились теплицы для выращивания растений; сушильные шкафы, заполненные мешками с опавшими листьями; комната, уставленная микроскопами; морозильная камера, набитая образцами — бутылками с древесным соком, мертвыми летучими мышами, пробирками с клещами, вытасненными из спин удавов и щетинистых крыс. На доске объявлений предлагалось денежное вознаграждение за доставку свежего помета оцелотов из леса.

Джунгли кишели живностью. Там обитали ленивцы, пумы, змеи и крокодилы; маленькие американские ящерицы-василиски могли бегать по поверхности воды и не тонуть. Всего на нескольких гектарах произрастало столько же видов лесных растений, как во всей Европе. Многообразие флоры и фауны отражалось в богатом разнообразии специальностей полевых исследователей-биологов, приехавших изучать его. Некоторые из них забирались на деревья и наблюдали за муравьями. Другие каждый день уходили на заре отслеживать передвижения обезьян. Третьи следили за молниями, которые ударяли в деревья во время тропических гроз. Четвертые коротали дни, вися на подъемнике и замеряя уровень озона в сводах деревьев. Пятые

подогревали почву, чтобы определить, как бактерии будут реагировать на глобальное потепление. Шестые изучали то, как жуки ориентируются по звездам. Шмели, орхидеи, бабочки — казалось, в лесу не осталось ни одного вида, за которым кто-нибудь не наблюдал бы.

Меня поражали изобретательность и чувство юмора этого исследовательского сообщества. Лабораторные исследователи-биологи проводят большую часть своей жизни, держа под контролем ту частичку живой природы, которую они изучают. Их собственная человеческая жизнь проходит за пределами сосудов, в которых находится исследуемый ими материал. Полевым исследователям редко удается добиться такого уровня контроля. Мир — лабораторный сосуд, и они находятся внутри его. Соотношение сил другое. Грозовые ливни смывают флажки, которыми они отмечают объекты своих экспериментов. Деревья падают на их делянки. Ленивцы умирают там, где они собирались измерять содержание питательных веществ в почве. Их кусают муравьи-пули, когда они продираются сквозь заросли. Лес и его обитатели рассеивают любые иллюзии о том, что ученые чем-либо управляют. Очень быстро наступают отрезвление и смирение.

Взаимоотношения растений и микоризных грибов — это ключ к пониманию того, как устроены экосистемы. Мне хотелось побольше узнать о том, как питательные вещества проходят через грибные системы, но у меня голова шла кругом, когда я представлял себе, что творится под землей. Растения и микоризные грибы неразборчивы в связях: внутри корней одного растения может обитать множество грибов, а к единственной грибной системе могут присоединяться многочисленные растения. Таким образом растения могут обмениваться разнообразными веществами, от питательных веществ до сигнальных соединений, при помощи грибных связей. Проще говоря, грибы объединяют растения в социальную сеть. Именно это и подразумевается под словосочетанием «вселесная паутина». Тропические леса, где я работал, были местом обитания сотен видов растений и грибов. Эти «вселесные паутины» невообразимо слож-

ны, их значение огромно и все еще не до конца осознано. Представьте себе озадаченность внеземного антрополога, который обнаруживает — по прошествии десятилетий изучения современного человечества, — что у нас есть нечто, известное как интернет. Для современных экологов «вселенная паутина» — что-то подобное.

Пытаясь обнаружить и исследовать системы микоризных грибов, которые пронизывали землю, я собирал тысячи образцов почвы и срезов древесных корней, измельчал их до состояния пасты, чтобы извлечь липиды — и ДНК. Я выращивал сотни растений в горшках вместе с разными колониями микоризных грибов и измерял, насколько большими выростали у них листья. Я толстым слоем рассыпал черный молотый перец вокруг теплиц, чтобы помешать кошкам прокрасться внутрь и занести посторонние грибные колонии. Я вводил в растения химические маркеры и отслеживал их прохождение через корни в почву, чтобы можно было понять, сколько досталось их грибным соратникам.

И снова измельчение до состояния пасты. Я тарахтел вокруг заросших лесом полуостровов в маленькой моторной лодке, которая часто ломалась; взбирался на вершины водопадов, разыскивая редкие растения; брел, с трудом передвигая ноги, по грязным тропинкам, проходя мили с заплечным мешком, наполненным пропитанной водой почвой; загонял грузовики в наносы густого красного джунглевых грунта.

Из многочисленных организмов, живших в тропических лесах, меня больше всего притягивал один вид — маленький цветок, росший прямо из земли. Высотой эти растения были с кофейную чашечку, стебельки были хилые, тоненькие, белесые, с одним ярко-синим цветком, балансирующим на верхушке. Это были представители войрий* (*Voynia*) — «растения-призраки»** из семейства горечавковых, произрастающие в джунглях и уже давно утратившие способность к фотосинтезу. Потеряв эту способность, вид

* Русскоязычный термин не устоялся. — *Прим. изд.*

** *Ghost plant*, как это растение именуют в западной профессиональной литературе. — *Прим. изд.*

остался без хлорофилла — зеленого пигмента, без которого невозможен фотосинтез. Войрии поставили меня в тупик. Фотосинтез — это один из процессов, который делает растение растением. Как могли *эти* растения выжить без него?

Я заподозрил, что отношения войрий с их грибами-партнерами были необычными, и задался вопросом, не смогут ли эти цветы рассказать мне что-нибудь о том, что происходит под поверхностью почвы. Много недель я разыскивал их в джунглях. Некоторые цветы росли на открытых пространствах в лесу, и заметить их было легко. Другие прятались, заслоненные извилистыми корнями деревьев. На участках размером с четверть футбольного поля могли находиться сотни цветов, и мне приходилось их пересчитывать. Лес редко оказывался незаросшим и ровным, поэтому передвигаться приходилось нагибаясь и карабкаясь. На самом деле просто ходить по нему почти никогда не удавалось. Каждый вечер я возвращался в наш полевой лагерь грязным и вымотанным. За ужином мои голландские друзья-экологи подшучивали над моими милыми цветочками и их хрупкими стебельками. Они изучали, как тропический лес накапливает углерод. Пока я бродил, волоча ноги, по лесам и, прищуриваясь, вглядывался в почву, пытаюсь отыскать крохотные цветы, они измеряли деревья в объёме. Для углеродного баланса леса войрии были совершенно несущественны. Мои голландские друзья дразнили меня, говоря, что я занят своей маленькой экологией и что у меня тонченные увлечения. Я отвечал им, подтрунивая над их brutальной экологией и мужественностью. На следующее утро, на заре я снова пускался в дорогу, пристально вглядываясь в землю под ногами в надежде, что эти удивительные растения помогут мне найти путь в этот скрытый, наполненный богатствами подземный мир.

* * *

Где бы я ни был — в лесах, лабораториях или на кухне, — грибы меняли мое представление о том, как устроена жизнь. Эти организмы ставят под сомнение привычные для нас категории, и когда думаешь о них, мир выглядит по-другому.

му. Именно все нараставшее восхищение их способностью и подвигло меня на написание этой книги. Я попытался научиться радоваться двойственности и туманности, неизбежно возникающим, когда имеешь дело с грибами. Однако чувствовать себя комфортно в пространстве, в котором повисло столько научных вопросов, не всегда просто. Так недалеко и до агорафобии. Очень хочется спрятаться в маленьком чемодане с быстрыми готовыми ответами. Я сделал все возможное, чтобы удержаться от этого соблазна.

Один мой друг, философ и иллюзионист Дэвид Абрам, работал раньше штатным фокусником в прославленном песней Арло Гатри ресторане «У Алисы»* в штате Массачусетс. Каждый вечер он обходил столики; монетки исчезали из его пальцев и снова появлялись там, где совершенно не должны были очутиться; снова пропадали, делились на две, растворялись в воздухе. Однажды двое посетителей вернулись в ресторан вскоре после того, как вышли из него, и отозвали Дэвида в сторону. Выглядели они очень встревоженными. «Когда мы вышли за дверь, — объяснили они, — небо показалось нам на удивление голубым, а облака — большими и яркими. Ты что, подсыпал нам что-то в напитки?» Шли недели, и такие случаи продолжали повторяться: посетители возвращались и говорили, что шум транспорта казался громче, чем прежде, огни светофора горели ярче, орнамент из плитки на тротуаре казался более увлекательным, а дождь — более освежающим. Иллюзия, созданная фокусами, меняла их восприятие мира.

Дэвид объяснил мне, почему, как он считал, это происходило. Наше восприятие действительности по большей части опирается на то, чего мы ожидаем. Требуется меньше когнитивных усилий для познания мира, если используются готовые образы, чуть подправленные свежей информацией, полученной от органов чувств. Намного сложнее создавать совершенно новые представления об окружающем мире с нуля. Именно благодаря «слепым пятнам», возникающим из-за нашей предвзятости, фокусники и создают

* Речь о блюзовой композиции *Alice's Restaurant Massacree*. — Прим. изд.

свои иллюзии. Фокусы с монетами истирают, истончают наши ожидания и заставляют нас ослабить хватку — мы уже не так уверены, как именно взаимодействуют руки и монеты. И в конце концов мы перестаем чего-либо ожидать от мира в целом. Выйдя из ресторана, посетители увидели другое небо, потому что они восприняли его таким, каким оно было, а не таким, каким они ожидали его увидеть.

Если выманить нас из мира ожиданий, мы начинаем опираться на наши чувства. Что по-настоящему поражает, так это огромная разница между тем, что мы предполагаем увидеть, и тем, что видим, когда действительно *смотрим*.

Грибы также заставляют нас отказаться от готовых, предвзятых представлений о мире. Их жизнь и поведение потрясающи. Чем больше я занимаюсь грибами, тем меньшее влияние на меня имеют устоявшиеся взгляды и тем более сомнительными начинают казаться знакомые понятия. Две быстро развивающиеся области в биологических изысканиях не только помогли мне преодолеть это состояние удивления и растерянности, но и обеспечили меня схемами, которые направили в нужную сторону мои исследования мира грибов.

Во-первых, мы весьма продвинулись в понимании многочисленных сложных типов поведения, которые сложились в процессе эволюции у организмов, не обладающих мозгом и не входящих в царство животных. Самый лучший пример — слизевики, такие как физарум многоголовый, *Physarum polycephalum* (хотя он является плазмодием, а не грибом, как настоящая плесень). Как мы увидим, слизевики не обладают монополией на решение проблем без применения мозгов, но их легко изучать, и они стали показательными организмами, открывшими новые направления в исследованиях. Физарум многоголовый создает «разведывательные» сети, состоящие из похожих на щупальца отростков. Он не имеет центральной нервной системы и ничего, что напоминало бы ее. И все же они умеют «принимать решения», сравнивая различные возможности, и находят кратчайший путь между двумя точками в лабиринте. Японские ученые выпустили слизевиков в чашки

Петри, имитирующие территорию Большого Токио. Овсяными хлопьями были отмечены главные городские развязки, а яркие огни представляли преграды — слизевики не любят свет. Через день слизевики нашли самый оптимальный путь между хлопьями, сформировав сеть, практически идентичную существующей сети железных дорог Токио. В похожих экспериментах слизевики воссоздавали сеть автотрасс США и древнеримских дорог в Центральной Европе. Энтузиаст — исследователь слизевиков рассказал мне о еще одном эксперименте. Он часто терялся в магазинах *ИКЕА* и долго не мог найти выход оттуда. И вот он решил поставить перед своими слизевиками такую же задачу: построил лабиринт, походящий на поэтажный план местного мебельного магазина. И действительно, без помощи персонала и указателей его слизевики вскоре нашли кратчайший путь к выходу. «Видите, — смеясь, говорил он, — они умнее меня».

Считать слизевиков, грибы или растения «разумными» вполне правомерно — это зависит от убеждений конкретного человека. С точки зрения классической науки, человеческий интеллект выступает критерием, по которому судят о разумности других видов. В соответствии с этой антропоцентричной установкой человек всегда находится на вершине шкалы измерения. За ним следуют сходные животные (шимпанзе, бонобо и т. д.); далее — другие высшие животные, далее — вниз по рейтинговой шкале — длинный список существ, наделенных разумом. Он был составлен еще древними греками и используется в том или ином виде по сей день. Эти же организмы — из-за того, что не похожи на нас, внешне их поведение не имеет ничего общего с нашим, из-за того, что у них нет мозга, — традиционно помещались где-то в самом низу шкалы «разумности». Слишком часто их воспринимают как некий инертный фон для жизни животных. И все же многие из них способны на «сложные» поступки, которые заставляют нас переосмыслить, что такие понятия, как «решать проблемы», «общаться», «принимать решения», «учиться», «узнавать» и «помнить», означают для организмов. Так некоторые излишне

сложные иерархические структуры, поддерживающие современную научную мысль, начинают терять прочность. По мере того как они слабнут, наше предвзятое отношение ко всему, что находится за пределами человеческого мира, возможно, начнет меняться.

Во-вторых, в моих изысканиях меня направляло наше отношение к тому, как мы воспринимаем микроскопические организмы, или микробы, покрывающие каждый квадратный сантиметр нашей планеты. В последние четыре десятилетия благодаря новым технологиям мы смогли вторгнуться в жизнь микробов и увидеть ее в недоступных ранее подробностях. Каков же результат? Для вашей колонии микробов, вашего микробиома, ваше тело — целая планета. Некоторые микроорганизмы предпочитают умеренные лесные зоны на вашем черепе, другие — засушливые равнины вашего предплечья, третьи облюбовали тропические леса ваших подмышек или промежности. Ваши кишки (которые, если разложить их на плоскости, займут 32 квадратных метра), уши, пальцы ног, рот, глаза, кожа — любые поверхности, полости и проходы кишат бактериями и грибами. Вы носите на себе больше микробов, чем «собственных» клеток. В ваших внутренностях бактерий больше, чем звезд в нашей Галактике.

Мы, люди, обычно не задумываемся над тем, где заканчивается один индивид и начинается другой. Обычно, во всяком случае в современном обществе технологического прогресса, за аксиому принимается то, что мы начинаемся там, где берет начало наше тело, и заканчиваемся там, где заканчивается оно. Достижения современной медицины поколебали надежность этих представлений. Успехи в современной микробиологии потрясают их до самого основания. Мы представляем собой экосистемы, составленные из (и разлагаемые посредством) сообществ взаимодействующих с нами микробов, их экологии, значимость которой только сейчас становится очевидной. 40 с чем-то триллионов микробов, обитающих в наших телах и на них, дают нам возможность переваривать пищу и вырабатывать минеральные вещества, поддерживающие жизнь. Подобно грибам, живущим внутри растений, они защищают нас от

болезней. Они руководят развитием наших тел и иммунной системы, а также влияют на наше поведение. Если не держать их под контролем, они могут вызвать болезни и даже смерть. Даже в бактериях находятся вирусы (нанобиомы?). Даже в вирусах могут обитать более мелкие вирусы (пикобиомы?). Симбиоз — неотъемлемая часть жизни.

Однажды я участвовал в конференции, посвященной тропическим микробам, в Панаме. Она длилась три дня, и все участники все больше недоумевали, сбитые с толку тем, что следовало из их изысканий. Кто-то встал, чтобы сделать доклад о группе растений, вырабатывающих в листьях определенные химические вещества. До этого момента эти химические вещества считались определяющей характеристикой данных растений. Однако как выяснилось, химические вещества создавались грибами, живущими в листьях этих растений. Представление о растениях пришлось менять. Вмешался другой исследователь, предположивший, что эти химические вещества производились не самими грибами внутри листьев, а бактериями, обитающими внутри грибов. Дебаты развивались в том же ключе. Через два дня понятие индивидуального изменилось до неузнаваемости и стало глубже и шире. Уже не имело никакого смысла говорить об отдельных представителях видов. Биология — наука, изучающая живые организмы, — стала на порог экологии — науки, исследующей взаимосвязи живых организмов. Усложняло положение дел то, что мы почти ничего не понимали. В проецируемых на экран схемах — графических характеристиках популяций микробов — было множество лакун с пометкой «неизвестно». Мне вспомнилось, что современные астрофизики, изображая Вселенную, обозначают 95 % вещества как «темную материю» и «темную энергию». Темная материя и энергия зовутся таковыми, потому что мы ничего о них не знаем. То, что было отмечено белым пятном на схемах популяций микробов, и было той самой биологической темной материей, или темной жизнью.

Многие научные концепции, от концепции времени до понятия химических связей, генов и видов, не имеют чет-

ких определений: это лишь полезные категории, которыми удобно оперировать. С одной стороны, понятие «индивидуальный» ничем не отличается от других — просто еще одна категория для управления мыслями и поведением людей. Тем не менее в повседневных жизни и практике, не говоря уже о наших философских, политических и экономических системах, столько зависит от отдельных личностей, что, возможно, будет трудно просто стоять, ничего не предпринимая, и наблюдать, как исчезает понятие индивидуальности. А что тогда будет с понятием «мы»? А как быть с «ними»? С «меня/мне»? «мой»? «каждый»? «любой»? Моя реакция на обсуждения на той конференции была не только интеллектуальной. Подобно посетителю ресторана «У Алисы», я *почувствовал* себя иначе: привычное и понятное стало незнакомым. «Утрата ощущения своей идентичности, ложное представление о собственном Я и чувство, что вас “контролируют извне”», как заметил один из корифеев в области микробиомных исследований, являются потенциальными симптомами психического заболевания. У меня голова шла кругом от мысли о том, сколько идей придется перевернуть с ног на голову, в том числе столь ценимые в нашей культуре понятия индивидуальности, автономности и независимости. Отчасти именно это смятение и делает достижения в изучении микроорганизмов такими волнующими. Наши взаимоотношения с микробами чрезвычайно интимны. Чем больше мы узнаем об этих связях, тем сильнее меняется наше представление о собственном теле и о местах, которые мы населяем. «Мы» представляем собой экосистемы, которые переходят границы и разрушают привычные категории. Наше Я возникает из сложно переплетенных отношений, которые мы только начинаем осознавать.

Изучать и распутывать взаимосвязи чрезвычайно непросто. Почти все они неоднозначны. Кто кого приручил: муравьи-листорезы гриб, от которого они зависят, или гриб — муравьев? Кто кого выращивает: растения выращивают грибы, с которыми они живут, или грибы — растения? Куда направлен вектор? Эта неопределенность на самом деле полезна.

У меня был профессор Оливер Рэхэм, эколог и историк, изучавший, как экосистемы тысячелетиями формировали человеческие цивилизации и сами менялись под их воздействием. Он водил нас по окрестным лесам и рассказывал об истории этих мест, о людях, живших там, и он читал эту историю в изгибах и разломах ветвей старых дубов, находя места, где пышно разрослась крапива, подмечая, какие растения росли в живых изгородях. Под влиянием Рэхэма четкая линия, которая в моем понимании разделяла понятия «природа» и «цивилизация», стала расплываться.

Позднее, проводя полевые исследования в Панаме, я столкнулся со многими запутанными взаимоотношениями полевых биологов и видов организмов, которыми они занимались. Я шутил с учеными, изучавшими летучих мышей, о том, что, бодрствуя всю ночь и отсыпаясь днем, они перенимают привычки изучаемого ими вида. Они спрашивали меня, какой отпечаток на моем характере оставляют грибы. Я все еще не знаю точно, что ответить. Но я не перестаю думать о том, что, если принимать во внимание нашу полную зависимость от грибов, которые создают, перерабатывают и объединяют единой сетью миры, вполне вероятно, что мы пляшем под их дудку значительно чаще, чем сознаем это. Если мы действительно идем у них на поводу, об этом легко забыть. Слишком часто я отвлекаюсь и рассматриваю почву как некую абстракцию, не слишком хорошо размеченное опытное поле для моделируемых взаимодействий. Мои коллеги и я часто произносим фразы вроде: «Такой-то и такой-то сообщил о примерно 25-процентном увеличении содержания углерода в почве в промежутке между одним засушливым сезоном и следующим дождливым». А как же иначе? У нас нет возможности познать глубины почвы и бесчисленные жизни, кипящие внутри ее.

Я пытался. Пытался с помощью тех средств, которые у меня были. Тысячи собранных мною образцов проходили через дорогостоящее оборудование, в котором содержимое моих пробирок взбивалось, облучалось и взрывалось, чтобы преобразиться в цепочки цифр на экране. Месяцами я гля-

дел в микроскоп, погружаясь в недра, опутанные корнями и наполненные извивающимися гифами, застывшими в двусмысленных актах соития с клетками растения. И все же грибы, которые я исследовал, были мертвы, забальзамированы и окрашены в ложные цвета. Я ощущал себя неуклюжим сыщиком. Неделями я ползал по джунглевому дну, соскабливая грунт в пробирочки, а тулканы раздражались резкими криками, обезьяны-ревуны вопили, лианы переплетались, а муравьеды слизывали муравьев. Добраться до жизни микроорганизмов, особенно тех, что хоронились в земле, было далеко не так просто, как до кишачего живностью, харизматичного надземного мира крупных существ. В действительности же, чтобы оживить мои находки, чтобы дать им возможность повлиять на представления о мире, нужно было воображение. Без него было не обойтись.

В научных кругах фантазию часто приравнивают к домыслам, а потому относятся к ней с подозрительностью; в публикациях ее обычно преподносят с обязательным предупреждением о вреде для здоровья. Частью работы по составлению отчетов об исследовательской деятельности является вымарывание подчистую любых упоминаний о полетах фантазии, праздных рассуждений и тысячах проб и ошибок, пусть даже они и привели к результатам.

Не все те, кто читает научные статьи, хотят продираться через всю эту дребедень. Кроме того, ученые должны внушать доверие. Проскользните за кулисы: вряд ли вы найдете там актеров в презентабельном виде. Даже за кулисами нашей исследовательской работы во время ночных размышлений, которыми я делился со своими коллегами, не было принято вдаваться в подробности о том, как нам удавалось представить себе — случайно или намеренно — образ изучаемого нами существа, будь то рыбы, представители семейства бромелиевых, лианы, грибы или бактерии. Сложно было без смущения признать, что клубок необоснованных заключений, фантазий и метафор мог помочь в нашей работе. Но вопреки всему фантазия является частью повседневного исследовательского дела. Наука — не упражнение в хладнокровной рациональности. Ученые всегда бы-

ли и будут эмоциональными, творческими, инициативными — полноценными людьми, задающими вопросы о мире, который не был создан для строгого каталога. Каждый раз, когда я задавался вопросом о том, чем занимаются грибы, и придумывал проекции, чтобы попытаться понять их действия, я непременно давал волю своей фантазии.

Один эксперимент заставил меня заглянуть в отдаленные уголки моего научного воображения. Я подписался на участие в исследовании воздействия ЛСД на способности ученых, инженеров и математиков разрешать сложные задачи. Эксперимент проводился на волне возобновившегося интереса ученых и медиков к незадействованному потенциалу психоделиков. Исследователи хотели выяснить, поможет ли ЛСД ученым проникнуть в область подсознания, связанную с научной работой, и найти иной, новый подход к решению привычных задач. Наши фантазии, которые принято заматывать под ковер, должны были стать настоящими звездами этого шоу. Они должны были стать предметом изучения, стать измеримыми. Разномастная группа молодых научных сотрудников была набрана по объявлениям («У вас есть важная проблема, которую необходимо решить?»), распространенных в научно-исследовательских институтах по всей стране. Это был смелый проект. Творческий подход — и это печально известно — трудно провозгласить где угодно, не только в клиническом отделении больницы для тестирования лекарственных препаратов.

Проводившие эксперимент ученые развесили по стенам психоделические портьеры, установили аудиосистемы для проигрывания музыки в палатах и снабдили их создающей определенное настроение подсветкой. Их попытки сделать помещение, где будет проходить эксперимент, непохожим на больничную палату, привели к тому, что оно стало казаться еще более искусственным — они, ученые, допускали, что это может иметь влияние на объект исследования.

Все эти приготовления выявили те здоровые сомнения в правильности своих действий, с которыми ученые вынуждены бороться каждый день. Если бы всем подопытным можно было подобрать уместный эквивалент создающей

настроение подсветки и расслабляющей музыки, они вели бы себя совершенно иначе.

Сестры проследили, чтобы я принял ЛСД ровно в 9 часов утра. Они пристально наблюдали за мной, когда я заливал в себя жидкость, смешанную с небольшим количеством воды. Я лег на кровать в своей палате, и сестры вытянули через инъекционную иглу образец крови из моего предплечья. Через три часа, когда я в полной мере ощутил действие препарата, ассистент ненавязчиво посоветовал мне начать думать о моей рабочей проблеме. Среди обоемы психометрических тестов, которые мы выполняли и составляли перед поездкой, нас попросили еще и в мельчайших подробностях описать сложности, которые мы собирались преодолеть, все те узелки в наших исследованиях, которые мы, возможно, попытаемся распутать. Вымочив эти проблемы-узелки в ЛСД, мы могли бы ослабить их. Вся моя головная боль была связана с грибами, и меня успокаивала мысль о том, что ЛСД был получен из гриба, который живет в зерновых растениях. Грибное решение моих грибных проблем. Интересно, что из этого получится?

С помощью ЛСД мне хотелось более живо вообразить жизненный ландшафт тех голубых цветов «призрачного» семейства войрий, его грибных связей. Как они существуют без фотосинтеза? Почти все растения питаются, вытягивая минеральные вещества из микоризных грибных систем в почве; судя по спутанной массе грибов, столпившихся в их корнях, то же самое делали и войрии. Но без фотосинтеза эти растения никак не могли вырабатывать углеводы и липиды, необходимые им для роста. Откуда же они добывали энергию? Быть может, они получали нужные вещества из других зеленых растений через грибные системы? Если это действительно так, что могли войрии предложить своим партнерам-грибам в обмен? Или они просто паразитировали? Неужели они и есть взломщики «вселенной паутины»?

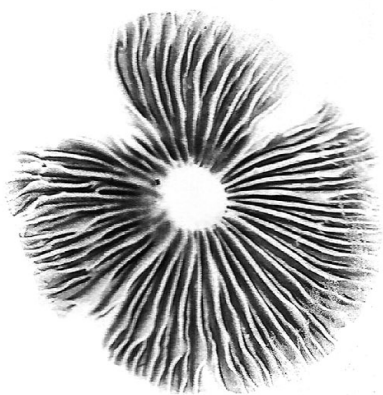
Я лежал на больничной койке, закрыв глаза, и пытался представить, каково это — быть грибом. Я очутился под землей, окруженный кончиками корней, перешагивающими друг через друга. Стада пасущихся сферических живот-

ных, корней растений и сопутствующий им сброд — подземный Дикий Запад: все эти бандиты, разбойники, одиночки и картежники. Почва представляла собой бескрайний кишечник — всюду пищеварение и ферментация; стаи бактерий, катающихся на волнах электрических разрядов; химические процессы, определяющие погоду; подземные трассы; склизкие объятия микробов — со всех сторон бурлящая теснота. Когда я последовал за гифой внутрь изрытого кавернами корня, я был поражен обнаруженным там убежищем. Там почти не было других типов грибов и, несомненно, не было никаких червей или насекомых. Значительно меньше шума и суматохи. Это был приют, за который, как мне показалось, не грех было и заплатить. А что, если именно такие укромные уголки предлагали голубые цветы грибам в обмен на поставляемые им питательные вещества? Укрытие во время бури.

Я не претендую на то, что эти видения обладают какой-либо ценностью для науки. В лучшем случае они правдоподобны. В худшем — это полный бред. Даже не ошибка — просто бред. Тем не менее мне удалось извлечь очень полезный урок. Я привык думать о грибах в категориях неких абстрактных «взаимодействий» организмов, и они напоминали схемы, которые учителя чертили на доске: полуавтоматические сущности, действующие в соответствии с логикой *Game Boy*, первой игровой приставки из начала 1990-х. Однако ЛСД заставил меня признать, что я обладаю воображением, и теперь я рассматривал грибы иначе. Мне хотелось понять их, не дробя на тикающие, вращающиеся, мигающие механические составные, как мы часто делаем. Скорее я хотел позволить этим организмам выманить меня из поизносившегося образа мыслей, побудить к работе мою фантазию, позволить грибам раздвинуть границы моего разума. И наконец, мне хотелось, чтобы сложная жизнь грибов поразила меня и сбила с толку.

Грибы населяют переплетенные между собой миры; бесчисленные нити ведут через эти лабиринты. Я проследил столько из них, сколько смог. Но были щели, через которые мне протиснуться не удалось, как я ни старался.

Несмотря на их близость, грибы таинственны. Они *иные*, непохожие ни на что. Должно ли это отпугнуть нас? Могут ли люди с присущими им мозгом и телом, наделенные присущим им языком, понять организмы, которые столь отличны от них? Какие перемены мы обнаружим в себе в процессе познания? Когда мною овладевал оптимизм, я мнил будущую книгу портретом этой забытой ветви древа жизни. Но в действительности все намного сложнее. Это отчет как о моем путешествии к пониманию жизни грибов, так и о том впечатке, который грибы и их жизнь оставили во мне и во многих других, с кем я встретился в пути. «Что делать мне с ночью и днем, с жизнью этой и смертью этой?»* — пишет поэт Роберт Брингхёрст. «Всякий вздох, всякий шаг, подобно яйцу, скользит к ребру того вопроса»**. Грибы подталкивают нас к ребрам многих вопросов. И эта книга — результат того, что мне таки удалось заглянуть в неизведанную глубину многих из них. Исследование мира грибов заставило меня пересмотреть многое из того, что я знал. Эволюция, экосистемы, индивидуальность, интеллект, жизнь — ничто из этого уже не казалось таким, каким представлялось раньше. Надеюсь, что эта книга пошатнет некоторые из ваших убеждений, как случилось с моими.



* *What shall I do with the night and the day, with this life and this death?*

** *Every step, every breath rolls like an egg toward the edge of this question.*

ГЛАВА ПЕРВАЯ

СОБЛАЗН

Кто кого соблазняет?*

— ПРИНЦ

На клетчатой тряпице, покрывающей весы, лежала кучка белых пьемонтских трюфелей (*Tuber magnatum*). Они были неряшливыми и грязными, как немые камни; неровной формы, как картофелины; покрыты ямками и щербинами, как черепа. Два килограмма стоимостью 12 000 евро. Их сильный сладкий запах наполнял комнату. Именно в этом аромате и была их ценность. Он был откровенно чувственным и ни на что не похожим: концентрированный соблазн, от которого тряешь голову.

Было начало ноября, пик трюфельного сезона, и я отправился в Италию, чтобы присоединиться к двум охотникам за трюфелями, искавшими их у холмов, окружающих Болонью. Мне повезло: один из друзей моего друга был знаком с человеком, торговавшим трюфелями. Торговец пообещал свести меня с двумя его лучшими охотниками, которые в свою очередь согласились взять меня с собой. Охотники за белыми трюфелями очень скрытны. Эти грибы можно найти только в дикой природе, их никогда не выращивали.

Трюфели — это несколько видов микоризных грибов с подземными плодовыми телами. Большую часть года они существуют в виде мицелия, который выживает за счет

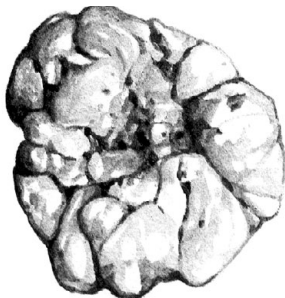
* «*Who's pimping who?*» — строчка из композиции *Illusion, Coma, Pimp & Circumstance*.

питательных веществ из почвы, а также благодаря углеводам, получаемым из корней растений. Однако их подземное обиталище создает для них серьезную проблему. Плодовые тела трюфелей производят споры, подобно тому как плоды растений производят семена. Споры появились в процессе эволюции, чтобы грибы могли распространяться, но под землей нет потоков воздуха, которые рассеивали бы их по земле, и для животных они невидимы. Они нашли выход — запах. Однако пахнуть сильнее всей этой какофонии лесных ароматов — дело непростое. Лес наполнен смесью различных запахов — либо притягательных, либо отталкивающих для носа животного. Аромат трюфелей должен быть достаточно силен, чтобы пройти сквозь слои почвы и просочиться в воздух; достаточно отчетлив, чтобы животное учуяло его среди окружающего разнообразия других запахов; и достаточно соблазнителен для этого животного, чтобы оно нашло трюфель по запаху, откопало его и съело. То есть все свои внешние недостатки трюфели компенсируют запахом — и то, что сидят глубоко под землей, и то что их трудно заметить, даже если они оказываются на поверхности, и то, что они непривлекательны и неаппетитны на вид.

Как только плодовое тело трюфеля съели, его работа окончена. Оно приманило животное и заставило его исследовать почву в поисках соблазнительной добычи, а затем перенести свои грибные споры на новое место и оставить их там с фекалиями. Притягательность трюфеля, таким образом, — результат сотен тысяч лет эволюционного переплетения со вкусами животных. В результате естественного отбора сохраняются те трюфели, которые удовлетворяют вкусам лучших распространителей их спор. Трюфели с наиболее удачным с химической точки зрения запахом привлекают животных успешнее, чем те, которым повезло меньше. Подобно орхидеям, имитирующим готовых к спариванию женских особей пчел, трюфели создают портрет вкусовых предпочтений животных — оформленный эволюцией образ того, что соблазняет и завораживает животное, воплощенный в аромате.

Я поехал в Италию, потому что мне хотелось, чтобы грибы увлекли меня в свой подземный мир. Мы плохо приспособлены, чтобы участвовать в грибной химии, но спелые трюфели говорят на языке настолько пронзительном и простом, что даже мы способны понять его. Так эти грибы на мгновение включают нас в свою химическую экологию. Как осмыслить потоки взаимодействий, происходящие между организмами под землей? Как интерпретировать их манеру общения, если это находится за гранью привычного для человека? Быть может, пробежавшись за собакой, идущей по трюфельному следу, и ткнувшись носом в почву, я смог бы приблизиться — насколько это возможно — к осознанию химической власти и соблазнительности, которые присущи грибам на многих жизненных стадиях.

Человеческое обоняние необыкновенно. Наши глаза способны различить несколько миллионов цветов, наши уши могут услышать полмиллиона тонов, а наши носы в состоянии почувствовать значительно больше триллиона различных запахов. Люди — без преувеличения — могут различить по запаху все известные летучие соединения. В узнавании определенных запахов люди превосходят грызунов и собак, мы способны даже идти на запах. При выборе сексуальных партнеров мы руководствуемся обонянием. Способность чувствовать запахи помогает нам различить в других страх, волнение или агрессию. Запахи тесно переплетены с нашими воспоминаниями; очень часто люди, страдающие посттравматическим синдромом, вспоминают запахи, ассоциирующиеся с их травмой.



Белый пьемонтский трюфель,
Tuber magnatum

Нос — тонко настроенный, чувствительный инструмент. Наше обоняние способно разбить сложные смеси на составляющие их химические вещества так же, как стеклянная призма разделяет белый свет на спектр. Для этого наш нос должен обнаружить точное расположение атомов в молекуле. Горчица пахнет горчицей благодаря молекулярным связям между азотом, углеродом и серой. Рыба пахнет рыбой из-за связей между азотом и водородом. Связи между углеродом и азотом создают металлический и масляный запах.

Способность различать запахи химических веществ и реагировать на них является первичной сенсорной способностью. Многие организмы прибегают к умению определять химические элементы по запаху для исследования и познания окружающего мира. И растения, и грибы, и животные используют похожие типы рецепторов, чтобы распознавать химические вещества. Когда молекулы прикрепляются к этим рецепторам, они запускают сигнальный «каскад»: одна молекула провоцирует изменение на клеточном уровне, что, в свою очередь, вызывает изменение на следующем уровне, и так далее. Таким образом малозначительный компонент может спровоцировать волну последствий. Человеческий нос способен улавливать запах некоторых соединений при ничтожной их концентрации — всего 34 000 молекул на кубический сантиметр, что примерно соответствует единственной капле воды в 20 000 олимпийских бассейнах.

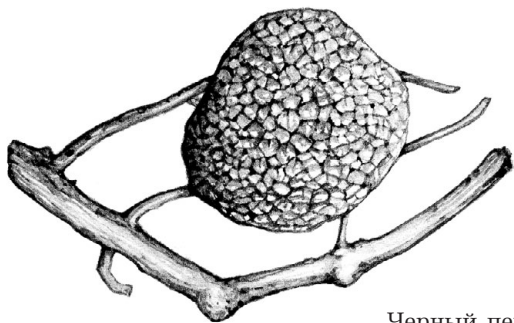
Чтобы животное почувствовало запах, молекула должна попасть на обонятельный эпителий. У людей это мембрана, расположенная в верхней части носовой полости. Молекула прикрепляется к рецептору, и нервы запускают реакцию. Мозг включается в работу, когда опознаются химические вещества или когда они провоцируют мысли и эмоции. Тело грибов устроено совершенно иначе. У них нет носов или мозга, конечно: вся их поверхность выполняет роль обонятельного эпителия. Мицелий — это единая, огромная мембрана, восприимчивая к химическим веществам. Молекула может прикрепиться к рецептору в любом месте на ее поверхности и запустить сигнальный каскад, который изменит поведение гриба.

Грибы купаются в изобилии химической информации. Трюфели используют химические элементы, чтобы сообщить животным о том, что их уже можно есть; кроме того, они используют химические вещества для общения с растениями, животными, другими грибами и друг с другом. Невозможно понять грибы, не исследовав эти сенсорные миры, но расшифровать их сложно. Может быть, это и неважно. Как и грибы, нас всю жизнь к чему-то влечет. Мы прекрасно знаем, что подразумевают влечение или отвращение. Посредством обоняния мы можем принять участие в молекулярном общении, которое грибы используют для устройства многих сфер своей жизни.

В истории человечества трюфели долгое время ассоциировались с сексом. Слово «трюфель» во многих языках имеет также значение «яичко/семенник», как, например, в старокастильском — *turmas de tierra*, то есть «яички Земли». В процессе эволюции трюфели создали аромат, который кружит головы животным, потому что от этого зависит существование этих грибов. Когда я обсуждал с Чарльзом Лефевром, разводящим и изучающим черные трюфели в Орегоне, его работу, он вдруг перебил меня и сказал: «Смешно сказать, во время нашего разговора я “купаюсь” в виртуальном аромате черных трюфелей, *Tuber melanosporum*. Словно облако этого запаха заполняет мой кабинет, хотя трюфелей здесь сейчас нет. Эти обонятельные воспоминания в моей практике работы с трюфелями довольно обычны. Они могут даже включать визуальные и эмоциональные воспоминания».

Во Франции святой Антоний — покровитель потерянных вещей, является также и святым покровителем трюфелей. В его честь служат трюфельные мессы. Молитвы, однако, бессильны против мошенничества. Дешевые трюфели подкрашивают или сдабривают вкусовыми добавками, чтобы выдать за более ценных собратьев.

В ценные трюфельные леса проникают трюфельные браконьеры. Крадут выдрессированных на поиск трюфелей собак стоимостью несколько тысяч евро. Вокруг леса раскидывают отравленное мясо, чтобы отравить собак конкурен-



Черный перигорский трюфель,
Tuber melanosporum

тов — охотников за трюфелями. В 2010 году во время ночного обхода своих трюфельных огородов французский фермер Лоран Рамбо в состоянии аффекта застрелил грибного вора, застигнутого им на месте преступления. После ареста Рамбо 250 фермеров, разгневанных разгулом воровства как грибов, так и профессиональных трюфельных собак-ищеек, вышли на марш протеста в защиту права защищать урожай. Заместитель председателя Союза производителей трюфелей Трикастена* сообщил изданию *La Provence*, что он рекомендует своим коллегам по союзу никогда не брать на обход трюфельных полей огнестрельное оружие, потому что «соблазн застрелить вора слишком велик». Лефевр очень точно подметил: «Трюфели пробуждают в человеке его темную сторону. Они словно оброненные на землю деньги, только непостоянные и скоропортящиеся».

Трюфели не единственные грибы, привлекающие внимание животных. На Западном побережье Северной Америки медведи переворачивают вверх тормашками бревна и выкапывают канавы, разыскивая ценные грибы мацутаке. В Орегоне охотники за грибами сообщали о лосях с носами, ободранными до крови во время поиска мацутаке в жестких, как наждачная бумага, вулканических почвах. Некоторые виды орхидей в тропических лесах в процессе

* Историческая и географическая область во Франции в долине Роны, на юго-западе департамента Дром и северо-западе Воклюза. — *Прим. пер.*

эволюции научились подражать запаху, форме и цвету плодовых тел грибов для привлечения грибных мушек. Плодовые тела — это грибы во всей своей красе, но мицелий тоже может служить приманкой. Один мой друг, изучающий тропических насекомых, показал мне видео, на котором орхидные пчелы ползали толпой вокруг отверстия в форме кратера в гниющем бревне. Мужские особи собирают из окружающей среды ароматы и komponуют их в некий коктейль, который они используют в ухаживаниях за женскими особями. Они парфюмеры. Спаривание занимает секунды, а на сбор компонентов ароматов и на составление парфюмерных композиций уходит вся взрослая пчелиная жизнь «мужчины».

Хотя он еще не успел проверить свою гипотезу, у моего друга появилась весьма убедительная догадка: пчелы собирали компоненты грибного запаха, чтобы добавить их к своему букету ароматов. Орхидные пчелы известны своим пристрастием к сложным ароматическим соединениям, многие из которых генерируются грибами, разрушающими древесину.

Люди пользуются парфюмерными ароматами, созданными другими существами и организмами. Нередко в наши собственные сексуальные ритуалы включаются и ароматы, произведенные грибами. Смола агарового дерева, или уда, это результат грибкового заражения деревьев рода аквилария (*Aquilaria*), растущих в Индии и Юго-Восточной Азии. Это один из самых дорогих видов сырья в мире. Его используют для изготовления духов с насыщенными древесными нотами, ароматом сырых орехов и темного меда. За ним охотятся и его жаждут со времен Педания Диоскурида, древнегреческого врача, жившего в I веке н. э. Килограмм отборного уда стоит больше, чем золото или платина, — до 100 000 долларов США, а варварская добыча этого сырья привела к почти полному исчезновению деревьев рода аквилария в дикой природе.

Французский врач XVIII века Теофиль де Бордо утверждал, что каждый организм «непрерывно распространяет вокруг себя испарения, некий аромат и эманации... Эти

эманации несут его стиль и манеру поведения; в действительности это его неотъемлемая часть». Аромат трюфеля и парфюмерная композиция, созданная орхидной пчелой, могут циркулировать за пределами физического тела каждого из этих организмов, но эти ароматические поля составляют часть их химических тел, и они пересекаются и перекрывают друг друга, как призрачные тени на дискотеке.

Я провел несколько минут в комнате для взвешивания трюфелей, зачарованный их ароматом. Мою задумчивость прервало шумное появление моего хозяина, Тони, торговца трюфелями, вместе с одним из его клиентов. Он закрыл за собой дверь, запечатав запах внутри комнаты. Клиент осмотрел горку трюфелей на весах и бросил взгляд на миски с неотсортированными и неочищенными грибами, расставленные на грязном верстаке. Он кивнул Тони — тот завязал концы клетчатой тряпицы. Они вышли во двор, обменялись рукопожатием, и клиент укатил на щегольском черном авто.

Лето было сухое, и это привело к плохому урожаю трюфелей, что отразилось на цене. Килограмм грибов, купленный непосредственно у Тони, разорил бы вас на 2000 евро. Тот же килограмм, приобретенный на рынке или в ресторане, стоил бы 6000 евро. В 2007 году один-единственный полуторакилограммовый трюфель был продан на аукционе за 165 000 фунтов стерлингов*. Подобно бриллиантам, цена трюфелей увеличивается нелинейно по отношению к их размеру.

Тони располагал к себе и демонстрировал присущее торговцу ухарство. Он, казалось, был удивлен тем, что я хочу присоединиться к его охотникам за трюфелями, и вовсе не обнадеживал меня по поводу шансов хоть что-то найти. «Вы можете, конечно, пойти с моими парнями, но вряд ли вы что-нибудь соберете. И работенка это нелегкая. Вниз, вверх. Через кусты. По грязи. Через ручьи и реки. Башмаки у вас единственные?» Я заверил его, что меня это не пугает.

* То есть примерно за 330 000 долларов по курсу 2007 года. — *Прим. изд.*

У охотников за трюфелями есть свои «угодья», иногда официальные и законные, иногда — нет. Я прибыл на место и застал обоих охотников, Даниэля и Париды, одетыми в камуфляж. Я спросил, помогает ли камуфляж незаметно подкрасться к трюфелям, и они ответили совершенно серьезно: камуфляж помогает им искать трюфели, избегая слежки со стороны других охотников за трюфелями. В их деле нужно знать трюфельные места. Эта информация имеет свою ценность и, как и сами трюфели, может быть украдена.

Из двух охотников самым дружелюбным оказался Парид: он встретил меня снаружи с Кайкой, его любимой собакой, натасканной на поиск трюфелей. У него было пять собак разных возрастов и уровней дрессировки. Каждая из них была специалистом по поиску либо белых, либо черных трюфелей. Кайка была очаровательна, и Парид представил ее мне с гордостью: «Моя собака очень умна, но я еще умнее». Порода Кайки — итальянская водяная собака, лаготто-романьоло (*Lagotto Romagnolo*) — чаще всего используется для охоты за трюфелями. Ростом она была мне по колено, шерсть падала ей на глаза пушистыми колечками, и всем своим видом она напоминала трюфель. Но говоря откровенно, потому как я все утро вдыхал аромат трюфелей, знакомился с выводком щенков собаки — охотницы за трюфелями, говорил о трюфелях, наблюдал трюфельные сделки и ел трюфели, даже округлые каменистые холмы стали напоминать трюфели. Парид рассказал о едва заметных знаках, при помощи которых они с Кайкой общались. Они научились замечать и интерпретировать мельчайшие изменения в поведении друг друга и могли координировать свои перемещения и действия почти в полной тишине. Трюфели научились передавать животным информацию о своей готовности быть съеденными. Люди и собаки придумали способы сообщать друг другу о химических предложениях-приманках трюфелей.

Аромат трюфеля — это его сложносоставная характерная черта, и она, кажется, возникает из тех взаимоотношений, которые трюфель поддерживает с сообществом микробов, почвой, климатом — с его местом обитания.

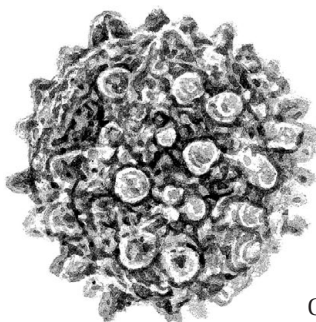
В плодовых телах трюфелей процветают колонии бактерий и дрожжевых грибков — от миллиона до миллиарда на каждый грамм сухого вещества. Многие члены микробиома трюфелей способны производить отчетливо различимые летучие соединения, сказывающиеся на трюфельном аромате. Вполне вероятно, что тот коктейль летучих химических веществ, который улавливает наш нос, — это результат работы нескольких организмов.

На какой химической смеси или химическом компоненте основана притягательность аромата трюфелей — неясно. В 1981 году немецкие исследователи опубликовали работу, где утверждали, что и белый пьемонтский (*Tuber magnatum*), и черный перигорский (*Tuber melanosporum*) трюфели вырабатывали андростенол — стероид с мускусным запахом, — причем в значительных количествах. Это половой феромон свиней. Его производят самцы, и его запах заставляет самок своей позой демонстрировать готовность к спариванию. Это изыскание вызвало предположение о том, что именно андростенол объясняет впечатляющие способности самок свиней отыскивать трюфели глубоко под землей. Исследование, опубликованное через девять лет после этого, поставило под сомнение эту вероятность. Исследователи закопали в землю на глубине пяти сантиметров черные трюфели, искусственную вкусовую трюфельную добавку и андростенол и выпустили свинью и пятерых собак, включая и местного чемпиона по охоте за трюфелями, на поиски образцов. Все животные обнаружили настоящие трюфели и искусственную вкусовую добавку. Андростенол никто из них не нашел.

Проведя в дальнейшем целый ряд серьезных тестов, ученые решили, что за соблазнительность трюфельного запаха отвечает одна-единственная молекула — диметилсульфид (C_2H_6S). Исследование было отличным, но вряд ли отражает всю правду. Запах трюфеля составляет целая стая различных молекул, парящих по соседству, — более 100 у белых трюфелей и около 50 у других наиболее популярных разновидностей. Составление этих изысканных, сложных букетов слишком энергозатратно — эволюция

не стала бы возиться с ними без всякой цели. Более того, вкусы животных отличаются. Конечно, не все виды трюфелей привлекательны для человека, а некоторые даже слегка ядовиты. Из более чем 1000 существующих в Северной Америке видов трюфелей только некоторые представляют кулинарный интерес. И даже они не всем придутся к столу. Как объяснил Лефевр, запах многих трюфелей отталкивает большинство людей, хотя к самим этим драгоценным грибам у них претензий нет. Некоторые разновидности трюфелей пахнут просто отвратительно. Он рассказал мне о готиерии (*Gautieria*), виде, производящем плодовые тела, воняющие канализацией или детским поносом. Его собаки их обожали, а жена запретила приносить их домой даже для классификации и измерений.

Мы не знаем как, но трюфели размещают вокруг себя слои приманок: люди натаскивают на поиск трюфелей собак, потому что свиней эти грибы соблазняют настолько, что они пожирают добычу, вместо того чтобы уступить ее своим дрессировщикам. Владельцы ресторанов в Нью-Йорке и Токио приезжают в Италию, чтобы наладить отношения с торговцами трюфелями. Компании-экспортеры разработали сложные системы упаковки и охлаждения, чтобы создать оптимальные условия для трюфелей, пока их моют, упаковывают, доставляют в аэропорты, развозят по всему миру, забирают из аэропортов, проводят через таможенный контроль, упаковывают заново и доставляют потребителям — и все это за 48 часов. Трюфели, как и грибы мацутакэ, должны оказаться на тарелке свежими — в течение двух-трех дней после того, как их собрали. Ароматы трюфелей создаются в процессе активного метаболизма живых клеток. По мере того как созревают споры, аромат трюфеля усиливается, а когда его клетки умирают, исчезает и запах. Нельзя засушить трюфели в надежде попробовать их потом, как это делают со многими другими грибами. Они химически разговорчивы, даже громогласны. Остановите метаболизм, и вы убьете запах. Именно по этой причине во многих ресторанах блюдо посыпают при вас свежими натертыми трюфелями. Лишь немногие другие организмы



Спора трюфеля

столь же прямолинейны, убеждая людей разделаться с ними с такой поспешностью.

Мы забрались в машину Париды и поехали по узкой проселочной дороге вверх по долине, сквозь сырые желто-коричневые дубовые леса, покрывавшие холмы.

Парид говорил о погоде и шутил по поводу дрессировки собак, а также о минусах и плюсах работы с таким «бандитом», как Даниэль. Спустя несколько минут мы свернули на побочную дорожку и остановились на ее краю. Кайка выпрыгнула из багажника, и мы, пройдя по опушке, оказались в лесу. Даниэль уже был на месте и ждал нас со своей собакой, стараясь быть незаметным. Поблизости находился еще один охотник за трюфелями, как он объяснил, и нам нужно вести себя очень тихо. Собака Даниэля была взломаченной и неухоженной. В ее кудряшках застряли сучки. Имени у нее не было, хотя Парид сказал, что прошлым утром слышал, как Даниэль звал ее Дьяволом. В отличие от ласковой и дружелюбной Кайки, Дьявол имел обыкновение огрызаться и рычать. Парид объяснил почему: он обучал своих собак искать трюфели в форме игры, Даниэль натаскивал своих при помощи голода. «Смотрите, — Парид указал на Дьявола, — он от отчаяния готов желуди есть». Какое-то время Даниэль и Парид добродушно подшучивали друг над другом. Даниэль утверждал, что его собаки намного лучше ищут трюфели, чем сытые и заласканные «любимчики» Париды. Парид отстаивал новую, реформированную школу дрессуры собак — охотников за трюфелями,

ловко подытожив их спор: «Даниэль ищет трюфели ночью, я охочусь за ними днем. Он нервничает, я — нет. Его собака кусается, моя дружелюбна. Его собака худая, моя — нет. Он плохой, а я хороший».

Неожиданно Дьявол сорвался с места. Мы последовали за ним. Парид комментировал, пока мы карабкались следом за собакой. «Может быть, трюфель, а может, и мышь. В любом случае собака будет счастлива». Мы обнаружили Дьявола примерно на середине земляного склона, где он копал и фыркал, засовывая нос в выкопанную ямку. Даниэль догнал его и осторожно отвел в сторону колючие ветви ежевики. В такие моменты, как объяснил Парид, охотник за трюфелями должен уметь внимательно читать язык телодвижений своей собаки. Виляющий хвост предвещал трюфели, застывший — нечто иное. Копание двумя лапами указывало на белый трюфель, одной лапой — черный. Знаки обнадеживали, и Даниэль начал рыхлить почву тупым инструментом с плоским концом, напоминавшим гигантскую отвертку, нюхая щепотки земли по мере того, как он зарывал свое орудие все глубже. Он и собака копали по очереди, однако из осторожности он не давал Дьяволу копать слишком энергично. Парид улыбнулся нам: «Голодная собака трюфель съест».

Наконец на глубине примерно полутора футов Даниэль обнаружил *его* во влажной почве. Пальцами и маленьким металлическим крючком он удалил с него землю и грязь. Аромат трюфеля заструился вверх из ямки, и он был ярче и насыщенней, чем раньше в той комнате, где грибы взвешивали. Это была его природная среда обитания, и запах естественно гармонировал с запахом сырой земли и крошащихся перегнивших листьев. Мне представилось, что я обладаю достаточно тонким обонянием, чтобы почувствовать аромат трюфеля на расстоянии, и что я так зачарован им, что готов бросить все и пойти на этот запах. Вдыхая эти пары, я вспомнил отрывок из романа Олдоса Хаксли «О дивный новый мир», где он описывает действие запахового органа, инструмента, способного исполнить обонятельный сольный концерт, подобно музыкальному концерту,

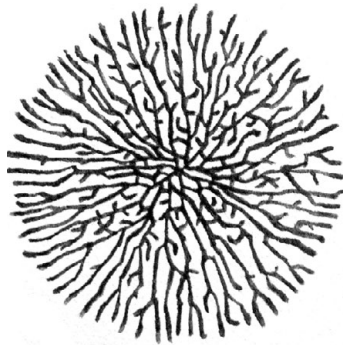
проигрываемому при помощи музыкальных инструментов. Эта концепция замечательно сочетается с трюфелями — органами ароматов в несколько ином смысле, — они на свой лад исполняют сюиты летучих ароматических соединений.

Как все удачно сложилось. Вот мы все, перепачканные и взлохмаченные, стоим вокруг трюфеля. Он запустил сигнальную цепную реакцию, притянув к себе группу животных — сначала собаку, затем охотника за трюфелями, а после его более медлительных соратников. Когда Даниэль вынул из земли трюфель, грунт вокруг него провалился. «Смотрите! — Парид убрал часть земли. — Мышкин домик». Мы все-таки не были первыми.

Когда мы чувствуем запах трюфеля, мы получаем транслируемую в одну сторону, от трюфеля в мир, информацию. Этот процесс достаточно прост и лишен нюансов. Чтобы привлечь животное, аромат должен быть необычным и соблазнительным. Но прежде всего он должен быть пронзительным и сильным. Неважно, кто рассеет споры гриба, — дикий кабан или белка-летяга. Так к чему излишняя разборчивость? Большинство голодных животных пойдут на многообещающий запах. Более того, трюфель не меняет своего аромата в ответ на внимание к нему. Он способен волновать, но не тревожится сам. Его сигнал звучит громко и чисто и, однажды возникнув, уже не затихает. Созревший трюфель транслирует недвусмысленный призыв на химическом *lingua franca* — популярный аромат, привлекательный для широких масс, который смог свести на одном пяточке под кустом ежевики, на землистом склоне в Италии Даниэля, Париды, двух собак, мышшь и меня.

Трюфели, как и многие другие драгоценные плодовые тела, являются наименее изоцированными каналами коммуникации их родителей-грибов. Большая часть грибной жизни, включая развитие мицелия, зависит от более утонченных форм соблазна. Грибная гифа превращается в грибницу, или мицелиевую сеть, в два хода. Во-первых, гифы разветвляются. Во-вторых, они спаиваются друг с другом. (Процесс, посредством которого они сливаются друг с другом, известен как анастомоз, от греческого ἀναστόμωσις, «отверстие»).

Если бы гифы не могли ветвиться, из одной гифы никогда не получилось бы много. Если бы гифы не могли спаиваться друг с другом, они были бы неспособны разрастаться в сложные системы. Правда, прежде чем соединиться, они должны привлечь и отыскать друг друга, что они и делают. Этот феномен известен как хоминг. Слияние гиф — это соединительный стежок, который превращает мицелий в себя самого. В таком смысле мицелий любого гриба возникает благодаря способности привлекать себя к себе же.



Мицелий, разрастающийся из споры.
Взято из *Buller* (1931)

Но эта мицелиевая сеть так же хорошо готова к встрече с самой собой, как и к встрече с другими сетями. Как удастся грибам сохранить представление о теле, подверженном постоянной трансформации? Гифы должны быть в состоянии отличить, сталкиваются ли они со своим собственным ответвлением или с совершенно иным грибом. Если это другой гриб, они должны определить, чуждый ли это и потенциально враждебный вид, или представитель их собственного вида, подходящий для соития, или кто-то третий. Некоторые виды грибов могут похвастаться десятками тысяч типов спаривания, приблизительно эквивалентных нашим полам (рекордсмен — целелистник обыкновенный, *Schizophyllum commune*, у которого 23 000 типов спаривания, каждый из которых совместим почти со всеми остальными). Мицелий многих грибов может сливаться

с другими мицелиевыми системами, если они достаточно схожи генетически — даже если не совместимы в половом отношении. Идентичность гриба, конечно, имеет значение, но это не всегда бинарный мир. Собственное Я может уйти в тень и постепенно раствориться в другой сущности.

Соблазн поддерживает многие типы грибного «спаривания», включая «спаривание» у трюфелей. Сами трюфели (а точнее, их плодовые тела) — результат полового контакта: чтобы начало развиваться плодовое тело, скажем, черного перигорского трюфеля (*Tuber melanosporum*), гифы одной мицелиевой системы должны слиться с гифами другой, совместимой с точки зрения пола сети, и запастись генетическим материалом. Большую часть своего существования в виде мицелиевых систем трюфели проводят как отдельные спаривающиеся типы — либо со знаком минус, либо со знаком плюс, — и по грибным меркам их сексуальная жизнь весьма незатейлива. «Соитие» происходит, когда гифа со знаком минус привлекает гифу со знаком плюс, и они сливаются. Один партнер играет роль отца, предоставляя только генетический материал. Другой партнер выполняет роль матери, давая и генетический материал, и «заботу» о трюфельной плоти, которая, созревая, превращается в плодовые тела и споры. Трюфели отличаются от людей тем, что любой из типов, и плюс, и минус, может быть и отцом, и матерью. То есть в человеческом контексте такое могло бы произойти, если бы мы были одновременно и мужчинами, и женщинами и могли одинаково исполнять роль как отца, так и матери при условии, конечно, что совокупляться мы могли бы с особями «противоположного знака». Как проявляется сексуальная привлекательность у трюфелей, остается неизвестным. Близкородственные грибы применяют феромоны для привлечения партнеров, и у исследователей сформировалось подозрение, что и трюфели пользуются для этой цели притягивающим противоположный пол феромоном.

Без наведения (способности найти подходящего партнера) мицелий был бы невозможен. Без мицелия не могло бы быть притяжения между типами спаривания «плюс» и «минус». Без притяжения полов не было бы «соития», а без

«соития» не получилось бы трюфеля. И все же взаимоотношения трюфелей и их партнеров-деревьев не менее важны и их химические взаимосвязи очень тонки, контролировать их сложно. Гифы молодых трюфельных грибов, не найдя дерево-партнера, вскоре умрут. Растения же должны пустить в свои корни только те виды грибов, с которыми у них возникнет взаимовыгодная связь, а не те, что вызовут болезнь. И перед корнями растений, и перед грибными гифами встает довольно трудная задача: найти друг друга в вавилонском химическом столпотворении в почве, где курсируют и стараются ангажировать друг друга бесчисленные корни, грибы и микробы.

Это другая сторона привлекательности, химического призыва и ответа на него. И растения, и грибы используют летучие химические соединения, чтобы сделаться притягательными друг для друга — как трюфели хотят понравиться лесным животным. Корни растений, принимающие в себя грибы, выпускают шлейфы летучих химических соединений, проходящих сквозь почву и способствующих тому, чтобы споры выпускали новые отростки, а гифы быстрее разветвлялись и разрастались. Грибы производят гормоны роста растений, которые также способствуют ветвлению корней, превращающихся в косматые облака, — чем больше площадь поверхности у кончиков корней и грибных гиф, тем выше их шансы встретиться. (А многие грибы производят гормоны животных и растений, чтобы изменить физиологию своих партнеров.)

Чтобы гриб вступил в связь с растением, должна измениться не только архитектура корней последнего. Реакцией на характерные химические профили служит то, что через клетки и растения, и гриба проходит волна сигнальных каскадов, активирующих комбинации генов. Оба будущих партнера перестраивают свой метаболизм и программы развития. Грибы выделяют химические вещества, которые притормаживают иммунные реакции партнеров-растений, иначе им будет не подобраться на достаточно близкое расстояние, чтобы создать симбиотические отношения. Стабильные микоризные партнерства продолжают развивать-

ся, потому как связи между корнями и гифами динамичны: они образуются вновь и вновь по мере того, как кончики корней и грибные гифы стареют и отмирают. Эти взаимоотношения постоянно трансформируются. Если бы вы смогли поместить свой обонятельный эпителий внутрь почвы, вам бы показалось, что вы присутствуете на джазовом концерте, где исполнители прислушиваются, подыгрывают и отвечают друг другу в режиме реального времени.

Белые пьемонтские трюфели и другие высоко ценимые грибы, например белые, лисички и мацутакэ, никогда не выращивались искусственно отчасти из-за подвижности их взаимоотношений с растениями, отчасти — из-за сложности и замысловатости их половой жизни. В нашем понимании того, как в общем и целом проходит общение между грибами, слишком много пробелов. Некоторые виды трюфелей, такие как черный перигорский, можно культивировать, однако культура выращивания трюфелей еще очень незрела — не в пример почтенному сельскохозяйственному искусству выращивать что угодно еще. Даже самым опытным удача может и не улыбнуться. На трюфельной ферме Лефевра *New World Truffieres* количество зачатков плодового тела, которые успешно вырастают из мицелия черного перигорского трюфеля, держится где-то в районе 30 %. В один год, не изменяя намеренно технологии выращивания, он добился 100-процентного успеха. «Мне больше ни разу не удалось повторить этот результат, — рассказывал он мне. — Не знаю, что я сделал правильно».

Чтобы успешно выращивать трюфели, нужно разбираться не только в причудах и потребностях грибов — с их своеобразными системами размножения, — но и в деревьях и бактериях, с которыми они союзничают. Более того, приходится учитывать важность тончайших изменений в почве и климате, времена года. «Это чрезвычайно интеллектуально стимулирующая область, потому что она пересекается со столькими дисциплинами, — сказал мне Ульф Бюнгтен, профессор географии в Кембридже и первый в Великобритании, кто описал образование плодового тела перигорского черного трюфеля. — Это и микробиоло-

гия, и психология, и межевание земель, и сельское хозяйство, лесничество, экология, экономика и изменение климата. Все действительно нужно рассматривать в комплексе». Трюфельные микросемейства очень быстро превращаются в целые экосистемы. Наука за ними пока не успевает.

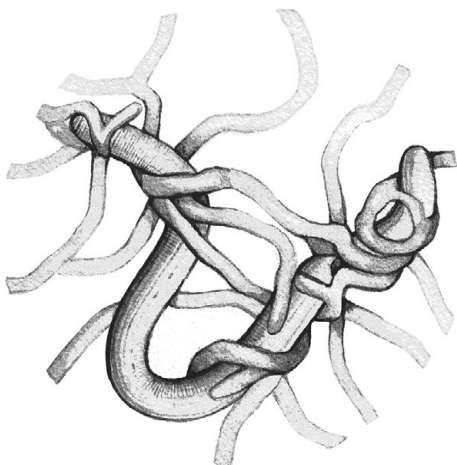
Некоторых жертв грибной химической приманки ждет монохромный исход — смерть. Среди самых впечатляющих сенсорных подвигов можно назвать те, что совершают хищные грибы, которые ловят и поедают нематод, круглых червей. На свете существуют сотни видов грибов, охотящихся на червей. Большинство из них всю свою жизнь занимаются разложением растительных веществ и охотиться на червей начинают только тогда, когда не хватает обычной пищи. Это изощренные хищники: в отличие от трюфелей, которые не прекращают источать запах с того момента, как он появился, до конца дней, грибы, поедающие нематод, производят органы для охоты на них и подходящие химические вещества только тогда, когда чувствуют, что нематоды поблизости. Если вокруг достаточно вещества, которое можно превратить в гниль, они не обращают на червей внимания, даже если те рядом. Эта практика требует от грибов — пожирателей нематод исключительной чувствительности, должной помочь ощутить присутствие червя. Все нематоды используют один и тот же класс молекул и для корректировки собственного развития, и для привлечения партнеров. А грибы используют эти химические вещества, чтобы шпионить за своими жертвами.

Методы, которые грибы используют для охоты на нематод, разнообразны, но стабильно вероломны. Это привычка, которую грибные династии формировали независимо: все пришли к одним и тем же выводам, но разными путями. Некоторые грибы выращивают липучие сети или ответвления, к которым нематоды прилипают. Другие используют механические орудия: создают петли из гиф, которые надуваются за десятую долю секунды при прикосновении к ним, и жертва оказывается в ловушке. Третьи, в том числе и обыкновенные вешенки, создают стебельки из гиф, на концах которых повисает капелька с ядом, парализующим

червей, давая гифе время пройти через ротовое отверстие и переварить их изнутри. Четвертые производят споры, которые проплывают сквозь почву, химически притягиваясь к нематодам, прикрепляясь к ним при соприкосновении. Закрепившись, споры начинают прорастать, и гриб «треножит» червя специальными гифами, которые условно можно назвать стрекательными.

Охота на червей у всех проходит по-разному: разные особи одного грибного вида могут реагировать на червей по-своему — они создают разные типы ловушек или размещают их по-своему. Один вид — *Arthobotrys oligospora* — ведет себя как «нормальный», разлагающий органику гриб, когда органики много, но, если возникает необходимость, может устраивать нематодные засады на своем мицелии. Он также может обвивать мицелий других грибов, моря их голодом, или выращивать специальные структуры для проникновения в корни растений, за счет которых питается. Как он выбирает опцию, остается неизвестным.

Что мы можем сказать об общении грибов? В Италии, когда мы стояли, сгрудившись, у норы на земляном склоне, заглядывая внутрь ее, я пытался представить эту сцену с точки зрения гриба. В возбуждении Парид предложил лирическую интерпретацию: «Трюфель и его дерево — как



Пожираемый грибом круглый червь

любовники, или как муж и жена, — тихо и проникновенно проговорил он. — Если нити разорваны, назад пути нет. Связь потеряна навсегда. Трюфель был рожден из корня этого дерева, защищенного дикой розой. — Он указал на колючие заросли. — Он лежал внутри, защищенный шипами, как Спящая красавица, дожидаясь поцелуя собаки».

В академической среде преобладает мнение о том, что никакие существа, кроме людей, не способны на разумные и осмысленные взаимоотношения и что им ошибочно приписывают это. Трюфели не разговаривают, они некрасноречивы. Как и многие животные и растения, от которых зависит их существование, они реагируют на окружающий их мир бездумно, автоматически, рутинно — только бы увеличить свои шансы выжить. Разительным контрастом предстает полная ярких впечатлений человеческая жизнь, в которой количество стимулирующих воздействий плавно перетекает в качество ощущения; в которой стимулы вызывают эмоции; в которой мы реагируем эмоционально.

Я стоял, балансируя на землистом склоне, держа нос над пахучим грибным комком. Как я ни старался представить себе трюфель простым биороботом, в моем воображении он все время оживал.

Когда стараешься понять поведение любых других организмов, отличных от людей, легко впасть в одну из двух крайностей: либо считать их неодушевленными биороботами, либо приписывать им все богатство человеческого опыта. Если исходить из того, что грибы — лишь организмы, лишенные мозга и всякого примитивного устройства, необходимого, чтобы испытывать самые простые «ощущения», тогда их действия являются автоматическими реакциями на ряд биохимических стимулов. И тем не менее мицелий трюфелей, как и мицелий других видов грибов, испытывает воздействие окружающей среды и активно реагирует на него, причем непредсказуемым образом. Его гифы провоцируют химическое воздействие, они на него отвечают и приходят в возбуждение. Именно способность расшифровывать химические сигналы, испускаемые другими организмами, позволяет грибам устанавливать целый

ряд сложных отношений с деревьями, кормиться за счет питательных веществ в почве, вступать в половые контакты, охотиться и отражать нападения.

Антропоморфизм обычно рассматривается как иллюзия, которая, как какой-то волдырь, возникает в слабых человеческих умах — темных, недисциплинированных, незакаленных. На то есть серьезные причины. Когда мы «очеловечиваем» мир, мы можем помешать себе понять жизнь других существ и организмов в их собственном контексте. Но есть ли то, что мы можем пропустить, проглядеть или забыть заметить, занимая подобную позицию?

Биолог Робин Уолл Криммерер, член Нации граждан потаватоми, отмечает, что язык индейцев потаватоми изобилует глагольными формами, одушевляющими феномены, лежащие вне мира человека. Слово, обозначающее холм, например, является глаголом — «быть холмом». Холмы постоянно «холмятся», это «активные, живые» холмы. Вооружась такой «одушевляющей грамматикой», можно говорить о жизни других организмов, не низводя их до объектов неживой природы, но и не заимствуя традиционные гуманистические концепции. В английском языке, наоборот, пишет Криммерер, нельзя признать «простого существования другого живого существа». Если вы не относитесь к человеческому роду, вас тут же записывают в категорию «неодушевленных предметов»: «нечто», «вещь». Пожелай вы одолжить «человеческую» концепцию, чтобы определить суть стороннего организма, вы попадете в ловушку антропоморфизма. Если вы используете понятие «нечто», вы начинаете воспринимать эти организмы как неодушевленные и попадаете в другую западню.

Биологические реалии немонотонны. Почему описания и сравнения, которые мы используем при познании мира — наши инструменты, — должны быть такими примитивными? Разве нельзя расширить некоторые из привычных для нас концепций, таких как «разговаривать», «слышать» и «понимать»? Например, представить, что «говорить» можно не только ртом, «слышать» — не только ушами, «понимать» и «интерпретировать» — не только с помощью нерв-

ной системы. Способны ли мы на это, не подавляя иные формы жизни предубеждением и недомолвками?

Даниэль завернул трюфель и, осторожно засыпав дыру, отпустил переплетенные колючие ветки ежевики, прикрывшие разрытую землю. Парид объяснил, что так не будут нарушены отношения между грибом и корнями дерева. Даниэль сказал, что так другие охотники за трюфелями не пойдут по нашим следам. Мы пошли обратно по полю. Запах трюфеля ослабел, когда мы добрались до машины, и стал еще менее выраженным, когда мы вернулись в комнату с весами. Мне стало интересно, что останется к тому времени, когда его натрут и посыпят тарелку посетителя ресторана в Лос-Анджелесе.

Несколько месяцев спустя я отправился на охоту за трюфелями по лесистым холмам в окрестностях Юджина, штат Орегон, с Лефевром и его итальянской водяной собакой по имени Данте, которого Лефевр зовет «многоплановым охотником за трюфелями».

Собаки-добытчики Кайка и Дьявол натасканы искать большое количество видов грибов; «многоплановые охотники» обучены отыскивать все, что интересно пахнет. И это позволяет им находить виды трюфелей, запаха которых они не знают. И вот Данте гоняется за тем, что вовсе и не трюфель, — пахучими многоножками, например. Но он также откопал четыре еще не описанных вида трюфелей, и в этом нет ничего необычного. Майк Кастеллано, известный эксперт по трюфелям, в честь которого был назван один из видов, описал два новых порядка, более двух дюжин новых родов и примерно две сотни новых видов трюфелей. По его словам, собирая трюфели в Калифорнии, он регулярно находит новые виды, что служит напоминанием о том, сколько еще остается неизведанным.

Пока мы карабкались вверх, продираясь сквозь Дугласовы пихты и папоротники-нефролеписы, Лефевр рассказывал мне, что люди веками подспудно культивируют трюфели. Трюфели процветают в потревоженной людьми окружающей среде. В Европе добыча трюфелей резко упала в XX веке, когда ухоженные леса, где росли эти грибы, либо вы-

рубались под сельское хозяйство, либо запускались и густо зарастали деревьями. Ни то, ни другое не благоприятствует разведению трюфелей. Для Лефевра возрождение культуры выращивания трюфелей очень важно, потому что это способ получить прибыльный урожай в лесистой местности и направить частный капитал на восстановление окружающей среды. Чтобы добыть трюфели, необходимо вырастить деревья. Почва — это дом для разнообразных форм жизни; нельзя культивировать трюфели, не мысля в масштабе экосистем.

Данте носился зигзагами вокруг нас, вынюхивая. Лефевр рассказал мне о теории, согласно которой манна, ниспосланная Богом идущим через пустыню израильтянам, была на самом деле пустынными трюфелями — деликатесом, который неожиданно проступает сквозь засушливые безводные почвы на большей части территории Ближнего Востока. Он поведал о безуспешных попытках вырастить неуловимый белый трюфель и о том, как плохо мы разбираемся в его отношениях с деревом, в корнях которого он живет. А я думал о разнообразных реакциях грибов на изменения в окружающей их среде и о способах, которые они изобретают, чтобы ужиться с растениями и животными, от которых зависит их существование.

Разыскивая в лесу трюфели, я поймал себя на том, что снова подыскиваю слова, чтобы описать жизнь этих замечательных организмов. Парфюмеры и дегустаторы используют метафоры, чтобы выразить вербально различие в ароматах. Химическое вещество зовут «скошенной травой», «влажным манго», «грейпфрутом» и «разгоряченными лошадьми». Без этих сравнений представить себе аромат было бы невозможно. Цис-3-гексенол (спирт листьев) пахнет свежескошенной травой. У оксана аромат влажного манго. В запахе гардамида сочетается запах грейпфрута и разгоряченной лошади. Это не значит, что оксан и есть влажное манго, но если бы я пронес мимо вас открытую склянку, вы бы почти наверняка узнали запах. Выбор нужных слов для описания запаха включает суждение и предвзятость. Наши описания искажают и деформируют природу явлений, но иногда у нас нет другого выбора — только сравнить

абстрактный феномен с объектом предметного мира. Быть может, то же самое происходит, когда мы говорим об иных, не принадлежащих миру людей организмах?

Сводится все к тому, что не так-то много других вариантов существует. У грибов, вероятно, нет мозга, однако среда провоцирует их на принятие множества решений. Их непостоянное, переменчивое окружение вынуждает их импровизировать. Попытки импровизации могут привести к ошибкам. Каждый раз, когда гифы настраиваются на призыв других гиф внутри одной системы мицелия, когда возникает притяжение между гифами из отдельных мицелиевых сетей, когда появляется жизненно важное влечение между микоризной гифой и корнем растения, когда червь заглатывает капельку яда на конце гифы — каждый раз грибы активно воспринимают и интерпретируют свой мир, даже если нам и не дано понять, что значит в этом случае «воспринимать» и «интерпретировать». Возможно, не так уж и странно то, что грибы используют для самовыражения химический вокабуляр, адаптированный для других существ и организмов, будь то нематода, корень дерева, собака — охотник за трюфелями или ньюйоркский ресторатор. Иногда — как это бывает с трюфелями — эти молекулы выступают как слова химического языка, который мы способны по-своему понять. Хотя большинство будет всегда либо выше — над нашими головами, либо ниже нашего понимания — у нас под ногами.

Данте начал с яростью раскапывать землю. «Похоже на трюфель, — перевел Лефевр с языка собачьего тела. — Но он глубоко». Я спросил, тревожит ли его то, что Данте может повредить нос и лапы из-за такого неистового рытья. «О, он все время ранит подушечки, — признал Лефевр. — Я подумываю купить ему бахилы». Данте фыркал и царапал землю, но безрезультатно. «Меня огорчает, что я не могу его ничем вознаградить за усилия, когда ничего не удастся добыть, — Лефевр присел и потрепал собаку по кудряшкам. — Но мне не найти лакомство, которое бы значило для него больше, чем трюфель. Трюфели превосходят все. — Он улыбнулся мне. — Бог Данте живет под землей».

ГЛАВА ВТОРАЯ

ЖИВЫЕ ЛАБИРИНТЫ

Я так счастлива в шелковой влажной тьме лабиринта, и нет нити, ведущей из него.

— ЭЛЕН СИКСУ

Представьте, что вы одновременно можете пройти через две двери. Это невысказано, и все же грибы поступают именно так. Когда гифы гриба доходят до развилки, им не нужно выбирать ту или иную дорогу. Они разветвляются и идут одновременно в двух направлениях.

Можно поставить на пути гиф микроскопический лабиринт и посмотреть, как они будут двигаться дальше. Встречая препятствие, они начинают ветвиться. Обойдя препятствие, кончики гифы возвращаются к первоначальному направлению своего роста. Вскоре они находят кратчайший путь к выходу, точно так же, как миксомицеты (слизевики) моего друга, которых заставили решать подобную головоломку, смогли найти кратчайший путь к выходу из лабиринта, напоминающего в плане склад магазина ИКЕА. Если следить за кончиками гифы, когда они исследуют пространство, то с сознанием наблюдателя происходит нечто странное. Один кончик делится на два, четыре, восемь, но все они соединяются в одной грибнице. Является ли этот организм единым или состоит из множества организмов, мне еще предстоит понять, но я вынужден признать, что существо это каким-то невероятным образом является *и одним, и многими* одновременно.

Наблюдать за тем, как гифа исследует лабораторный лабиринт, — занятие увлекательное, но давайте увеличим

масштаб: вообразите миллионы кончиков гиф, одновременно прокладывающих путь в хаотичных лабиринтах внутри комочка земли объемом в столовую ложку. И давайте снова увеличим масштаб: представьте себе миллиарды щупалец гиф, исследующих участок леса величиной с футбольное поле.

Мицелий — это связующая ткань, живые нити, пронизывающие и соединяющие большую часть мира. В школе ученики изучают анатомические атласы, каждый из которых посвящен тому или иному участку человеческого тела. На одной странице — скелет, на другой — тело как сеть кровеносных сосудов, на третьей — нервная система, на четвертой — мышцы. Если бы мы создали аналогичные схемы для экосистем, один из листов отображал бы грибной мицелий, проходящий через них. Мы увидели бы раскидистую паутину, проходящую через почву, через сернистые отложения в сотнях метров ниже поверхности океана, вдоль коралловых рифов, прорастающую через тела растений и животных, живых и мертвых, обитающую на свалках, в коврах, в половых досках, в старых библиотечных книгах, в частичках домашней пыли и в музейных полотнах старых мастеров. Согласно некоторым оценкам, если выделить мицелий, живущий в одном грамме почвы (примерно одна чайная ложка), и расположить все его нити последовательно, одну за другой, то его протяженность может составить от сотни метров до десятков километров. На практике невозможно измерить, насколько глубоко мицелий проникает сквозь структуры земли, ее системы и населяющие ее организмы, — так тесны его внутренние связи. Мицелий — это способ существования, бросающий вызов нашему воображению, ограниченному принадлежностью к животному миру.

Линн Бодди (*Lynne Boddy*), профессор микробиологии Кардиффского университета, несколько десятков лет изучала пищевое поведение мицелия. Ее изящные исследования показывают, какие задачи способны решать грибочки. В одном из своих экспериментов Бодди вырастила грибок, вызывающий гниение древесины, в обломке дерева. Затем она поместила этот кусок древесины в чашку Петри. Гриб-

ница распространилась от куска дерева радиально во всех направлениях, образовав пушистый белый круг. Через некоторое время растущая грибница встретила на своем пути еще один кусок дерева. Лишь небольшая часть гриба коснулась дерева, но поведение всей грибницы полностью изменилось. Грибница перестала распространяться во всех направлениях. Она прекратила распространение исследовательских частей своей сети и нарастила связи с обнаруженным объектом. Через несколько дней грибницу было не узнать. Она полностью перестроилась.

Исследовательница повторила эксперимент, но изменила условия. Она дала грибу вырасти за пределы первого куска древесины и найти путь к новому куску. Однако на этот раз, прежде чем мицелий успел перестроиться, она убрала первый кусок дерева из чашки Петри, оторвала все гифы, растущие из него, и поместила его в новую чашку. Гриб продолжил расти из первого куска дерева в направлении нового. Вероятно, мицелий обладает способностью запоминать направления, хотя мы еще не знаем, что лежит в основе этой «памяти».

Бодди — человек серьезный и сдерживает восхищение, когда рассказывает о том, на что способны грибы. Их поведение немного напоминает поведение миксомицетов (слизевиков), и она исследовала их схожими способами. Однако вместо того, чтобы смоделировать схему метрополитена Токио, Бодди создала условия, чтобы мицелий выстроил схему наиболее эффективных маршрутов между городами Великобритании. Она насыпала слой земли, придав ему очертания страны, и обозначила города кусками дерева, на которых проросли грибы (это были представители ложноопенка серно-желтого, *Hypholoma fasciculare*). Размер кусков дерева подбирался пропорционально населению городов, которые они обозначали. «Грибы выросли за пределы своих “городов” и создали сеть шоссейных дорог, — рассказывала Бодди. — Можно было различить трассы М5, М4, М1, М6. Я подумала, что это здорово».

Чтобы понять, что такое грибница, можно уподобить кончики ее гиф рою или стае. Насекомые образуют рои

и колонии. Множество скворцов сбивается в стаю, так же поступают сардины. Стая — это модель группового поведения. Без лидера колония муравьев может проложить кратчайший путь к источнику пищи. Колония термитов способна создавать гигантские холмы сложных архитектурных форм. И тем не менее мицелий нельзя полностью уподобить термитам, так как кончики гиф связаны друг с другом, а термитник населен множеством отдельных особей. Кончик гифы — это самое близкое понятие, к которому мы придем, если попытаемся выделить единицу мицелия, хотя и нельзя говорить о грибнице как о наборе «взрослых» гиф — в противоположность колонии термитов. Концепция мицелия двойственна, она балансирует между двумя понятиями. Если определять мицелий как сеть, то это единое и взаимосвязанное целое. А если как некоторое количество отростков гиф, то мицелий — это множество.

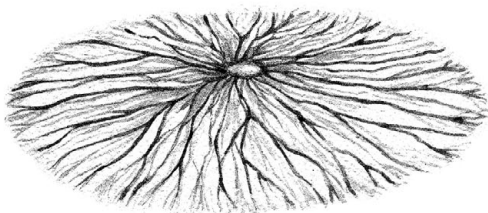
«Я думаю, что мы, люди, можем многому научиться у грибов, — размышляет Бодди. — Чтобы понять, как меняется дорожный поток, дорожную магистраль перекрыть нельзя, а вот отросток грибницы отсечь можно». Для решения человеческих задач исследователи начали работать с «сетевыми» организмами, такими как слизевики и грибы. Ученые, которые построили модель токийского метро с помощью слизевиков, работают над тем, чтобы использовать модель поведения слизевиков в проектировании городских транспортных сетей. Ученые лаборатории нетрадиционных вычислений в Университете Западной Англии обратились к слизевикам, чтобы вычислить наиболее эффективные пути эвакуации при пожарах в зданиях. Некоторые исследователи применяют стратегии грибов и слизевиков для построения схем передвижения в лабиринтах, решения математических задач или программирования роботов.

Лабиринты и построение сложных маршрутов — нетривиальные виды деятельности. Именно поэтому лабиринты долго использовались для оценки интеллектуальных способностей многих существ, от осьминогов и пчел до людей. Как бы то ни было, мицелий обитает в лабиринтах и хорошо «научился» решать задачки из области

пространственной геометрии. Как выгоднее разместиться в среде — проблема, с которой грибы сталкиваются каждое мгновение. Чем гуще переплетение гиф, тем больше веществ проводит мицелий, но густые грибницы не слишком хорошо перемещаются на большие расстояния. «Разрезанные» грибницы хорошо чувствуют себя на больших площадях, но у них меньше внутренних связей, что делает их более уязвимыми, их легче повредить. Как грибы находят компромисс, исследуя сплетенный корнями участок почвы в поисках пищи?

Эксперимент Бодди с двумя кусками дерева иллюстрирует типичный ход событий. Мицелий начинает разрастаться, исследуя окружающее пространство во всех направлениях. Если мы идем на поиски воды в пустыне, мы вынуждены выбирать только одно направление. Грибы могут выбирать все возможные направления одновременно. Если гриб находит пищу, он увеличивает число отростков мицелия, связывающих его с пищей, и купирует отростки, которые никуда не ведут. Это явление объясняется теорией естественного отбора. Мицелий разрастается, некоторые гифы оказываются более конкурентоспособными, чем другие. И они утолщаются. Менее «выгодные» гифы перестают существовать, и остается несколько магистралей. Купируя рост в одном направлении и разрастаясь в другом, грибницы могут даже перемещаться по местности.

Английское слово *extravagant* имеет латинские корни: оно происходит от *extra* («наружу») и *vagari* («бродить»). И это хорошее определение для мицелия, который бесконечно смещается «наружу» и за пределы своих границ, ни



Мицелий исследует плоскость

одна из которых не является четкой, чего нельзя сказать о границах тел животных. Мицелий — это тело без структуры.

Как одна часть мицелия «узнает», что происходит в другой части? Он разрастается, но должен как-то поддерживать связь с самим собой.

Стефан Олссон — шведский миколог, который несколько десятилетий пытался понять, что делает огромную грибницу единым самоорганизующимся целым. Несколько лет назад он заинтересовался одним из видов гриба, обладающего свойством биолюминесценции: грибница и плодовое тело светятся в темноте, что привлекает насекомых, рассеивающих грибные споры. В XIX веке шахтеры английских шахт отмечали, что грибы на деревянных сваях светили так ярко, что видно было руки, а Бенджамин Франклин предложил использовать светящиеся грибы, которые звали лисьими огнями, для подсветки компаса и глубиномера на первой подводной лодке (она называлась *The Turtle* и была создана в 1775 году, во время Войны за независимость). Вид, который изучал Олссон, — это панеллиос вяжущий, или сычужный гриб, *Panellus stipticus*. «Я выращивал его в чашках Петри, и при его свете можно было читать, — говорил он мне. — Когда он стоял дома на полке, он был похож на маленькую лампу. Детям нравилось». Чтобы проследить поведение гриба *Panellus stipticus*, Олссон вырастил его в лаборатории и две светящиеся чашки Петри поместил в абсолютно темный ящик, где поддерживал постоянные условия. Он оставил их в покое на неделю, в течение которой камера, достаточно чувствительная, чтобы реагировать на биолюминесценцию, делала фотографии каждые несколько секунд. Замедленная видеосъемка показала, как две не связанные друг с другом культуры мицелия росли, приобретая форму неправильных окружностей, каждая в своей чашке Петри, и светились в центре сильнее, чем по краям. Через несколько дней — примерно две минуты на видео — произошло резкое изменение. В одной из культур свечение волной прошло над грибницей от края до края. Через день такая же волна «накрыла» вторую культуру. Если принять во

внимание факт времени, мы делаем вывод о чрезвычайном эмоциональном накале. За несколько грибных мгновений грибница перешла в другое физиологическое состояние. «Что, черт возьми, происходит?» — удивлялся Олссон. Он в шутку предположил, что гриб, оставленный в одиночестве, заскучал, начал играть или, напротив, загрустил. Хотя он оставил культуры в темноте еще на несколько недель, пульсация не повторилась. Спустя годы он так и не смог объяснить причину этого явления. Он него укрылось также, каким образом мицелий мог координировать свое поведение в течение такого короткого времени.

Как устроено взаимодействие частей мицелия, понять трудно, ведь у него нет «мозга». Если человеку отсечь голову, если у него остановится сердце, он умрет. У грибницы нет ни того, ни другого. Грибы, как и растения, децентрализованны. У них нет оперативных центров, столиц, домов правительств. Управление в грибнице рассеянное: оно везде одновременно и нигде в особенности. Из фрагмента мицелия можно воссоздать всю сеть, а это значит, что каждый мицелиальный индивидуум — если у вас хватит смелости назвать его так — потенциально бессмертен.

Олссон заинтересовался спонтанными волнами свечения и приготовил еще один набор чашек Петри для следующего эксперимента. Он попытался уколоть край гриба *Panellus* кончиком пипетки. Пораженная область мгновенно осветилась. Его удивило, что в течение 10 минут свечение распространилось на 9 сантиметров в глубь грибницы. Это куда быстрее химического сигнала внутри мицелия. Олссон предположил, что пораженные гифы могли выбросить летучие соединения в воздух и это облако накрыло грибницу, таким образом сделав ненужным движение внутри тканей.

Он проверил эту возможность. Он вырастил две генетически идентичные грибницы рядом друг с другом. Между ними не было прямых связей, но они были расположены достаточно близко — химические вещества по воздуху преодолели бы это расстояние. Олссон уколол одну из грибниц. Свет распространился по пораженной грибнице, как

и раньше, но не перешел на соседнюю. Значит, какая-то система быстрой связи должна была работать внутри грибницы. Олссон все больше озадачивался: что это могло быть?

Мицелий — это прежде всего инструмент питания. Некоторые организмы, например фотосинтезирующие растения, сами производят пищу, а другие, как большинство животных, находят ее в окружающей среде и помещают внутрь своих тел, где она переваривается и усваивается. У грибов другая стратегия. Они переваривают окружающую среду, содержащую пищу, и затем поглощают ее своими телами. Их гифы длинные и ветвятся, они толщиной всего в одну клетку — диаметром от 2 до 20 микрометров, более чем в пять раз тоньше человеческого волоса. Чем больше окружающих объектов могут «потрогать» гифы, тем больше пищи они могут потребить. Разница между животными и грибами такова: животные помещают пищу в свои тела, а грибы помещают свои тела в пищу.

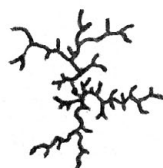
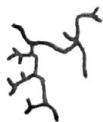
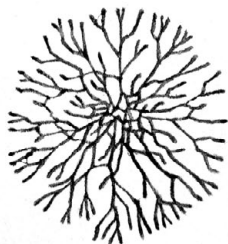
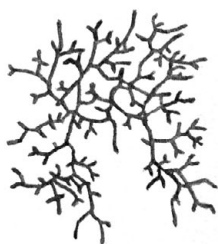
Однако мир как источник пищи непредсказуем. Большинство животных справляются с этой проблемой, перемещаясь в пространстве. Если еда покидает пределы какой-либо области, за ней следуют и животные. Но чтобы встроиться в непредсказуемый источник пищи, как это делает мицелий, нужно быть оборотнем. Мицелий — это живой, растущий, авантюрный исследователь, воплощенное в живой ткани сомнение. В научной среде это называют индетерминизмом: нет двух одинаковых грибниц. Какой формы мицелий? Это все равно что спрашивать о форме воды. На этот вопрос можно ответить, только зная, где он растет. Сравним мицелий с людьми — существами одной конструкции, которые развиваются примерно по одному сценарию. Едва ли вас удивит утверждение, что если мы рождаемся с двумя руками, то и умираем с двумя руками.

Мицелий помещает себя в окружающую среду, но все же число вариантов его развития небесконечно. Разные виды грибов образуют разные виды грибниц. У некоторых видов гифы тонкие, у других — толстые. Некоторые привередливы, другие не очень. Некоторые из них вырастают в эфемерные пушинки, не выходящие за пределы источ-

ников пищи, и могут поместиться на крохотной частичке пыли. Другие виды образуют грибницы-долгожители, покрывающие километры пространства. Некоторые тропические виды вообще не едят соседей, а ведут себя как фильтраторы — отращивают сети из толстых прядей мицелия и используют их для ловли падающих листьев.

Неважно, где растут грибы, они должны внедриться в источник пищи. И для этого они используют давление. Когда мицелию нужно прорвать особенно прочную преграду — как, например, болезнетворным грибам, заражающим растения, — он формирует особые проникающие гифы, которые давят с силой 50–80 атмосфер, чего достаточно, чтобы пробраться внутрь таких твердых пластиков, как майлар и кевлар. Одно из исследований доказало, что если бы гифа была шириной с человеческую руку, она могла бы поднять восьмитонный школьный автобус.

Большинство многоклеточных организмов растут, образуя новые клеточные слои поверх старых. Клетки делятся, чтобы получить новые клетки, которые затем делятся снова. Печень получается, когда клетки печени наслаиваются на



Боровик
Boletus

Зеленушка
Tricholoma

Мухомор
Amanita

существующие клетки печени. Так же происходит с клетками мышц или моркови. Гифы ведут себя по-другому: они растут в длину. При благоприятных условиях они могут достигать невероятных размеров.

На молекулярном уровне всякая клеточная деятельность, грибов ли, других ли существ, — это смешение множества быстрых действий. Так, рост клеток щупалец-гиф — это хаотичное движение, более оживленное, чем на стадионе, где скачут баскетбольные мячи. Гифы некоторых видов растут настолько быстро, что это можно наблюдать в реальном времени. «Щупальца» удлиняются, тем самым продвигаясь вперед. Маленькие пузырьки, наполненные клеточным строительным материалом, подбираются к самому кончику и сливаются с ним со скоростью до 600 пузырьков в секунду.

В 1995 году художник Франсис Алис ходил по Сан-Паулу с банкой синей краски. В дне банки была проделана дыра. Он гулял по городу много дней, и тонкий синий ручеек струился на землю, отмечая его маршрут. След краски нарисовал карту его путешествий, портрет времени. Перформанс Алиса иллюстрировал, как растут гифы. Сам Алис — это растущее щупальце. Извивающийся след, который он оставляет за собой, — это тело гифы. Рост происходит на кончике гифы; если бы кто-нибудь остановил Алиса во время его хождения с банкой краски, линия перестала бы расти. Это похоже на течение жизни. Растущее щупальце — это настоящее, жизненный опыт, который вы приобрели к настоящему моменту, вгрызающийся в будущее по мере того, как он растет. История вашей жизни — это оставшаяся часть гифы, путаные синие линии, которые вы оставили за собой. Грибница — это карта прошлой жизни гриба, и она является полезным напоминанием о том, что все формы жизни на самом деле *процессы*, а не *объекты*. «Вы», каким вы были пять лет назад, составлены из другого вещества, отличного от составляющего «вас» теперешнего. Природа — это событие, которое никогда не прекращается. Как сказал Уильям Бэтсон, создатель термина «генетика», «мы привыкли думать о животных и растениях как о ве-

ществе, а они на самом деле являются системами, через которые постоянно течет вещество». Видя какой-нибудь организм, от гриба до сосны, мы улавливаем лишь момент в его постоянном развитии.

Мицелий обычно имеет вид тонких ветвящихся гиф, но не всегда. Когда гифы соединяются, чтобы создать плодовое тело гриба, они быстро разбухают от воды, которую должны поглощать из окружающей среды, — вот почему грибы появляются после дождя.

Рост грибов может создавать взрывную силу. Когда гриб-гастеромицет семейства веселковых, увеличиваясь в размере, ломает дорожный асфальт, он делает это с силой, достаточной, чтобы поднять объект весом 130 килограммов. В популярной книге о грибах, изданной в 1860-х годах, Мордекай Кук (*Mordecai Cooke*) писал, что «несколько лет назад улицы [английского] города Басингстока выложили каменными плитами, а потом, несколько месяцев спустя, люди заметили, что тротуары почему-то стали неровными. Вскоре загадка разрешилась: некоторые тяжелые плиты были вытолкнуты из своих гнезд обильно разросшимися поганками. Одна из плит была размером 22 × 21 дюйм и весила 83 фунта*».

Когда я размышляю над ростом грибов более минуты, то иной раз чувствую, что мой мозг начинает разбухать и вытягиваться.

В середине 1980-х годов американский музыковед Луи Сарно записал музыку народа ака, живущего в лесах Центральноафриканской Республики. Одна из песен называется «Собирательницы грибов». Бродя в лесу в поисках грибов, двигаясь вдоль грибниц, спрятанных под землей, женщины поют свою песню в окружении голосов лесных зверей. Каждая женщина ведет свою мелодию, каждый голос рассказывает свою музыкальную историю. Многочисленные мелодии переплетаются, но это все еще многоголосье, а не единый звук. Голоса оплетают другие голоса, вливаясь один в другой и существуя бок о бок.

* 55,88 × 53,34 см и 37,6482 кг.

«Собирательницы грибов» — пример музыкальной полифонии. Полифония — это одновременное исполнение более чем одной музыкальной партии, изложение более чем одной истории. В отличие от гармоний парикмахерского квартета, голоса женщин никогда не сливаются в единую мелодию. Ни один голос не теряет своей индивидуальности. Ни один голос не крадет нот чужого. Нет солистки, задающей мелодию. Если эту запись проиграть 10 разным людям и попросить их напеть то, что они услышали, воспроизведенные каждым из них мелодии будут сильно отличаться друг от друга.

Мицелий — это полифония в телесной форме. Голос каждой женщины — это кончик гифы, самостоятельно исследующий звуковое пространство. Хотя каждый голос свободен в своих блужданиях и эти блуждания нельзя отделить друг от друга. Нет солирующего голоса. Нет главной мелодии. Нет плана музыкальной конструкции. И тем не менее возникает форма.

Всякий раз, когда я слушаю «Собирательниц грибов», я вхожу в эту музыку, выбрав один из голосов и следуя его мелодии, как если бы в лесу я мог подойти к одной из женщин и находиться возле нее. Трудно одновременно отслеживать более чем одну линию. Это как пытаться одновременно слушать много разговоров, не переключаясь с одного на другой. В уме смешиваются несколько потоков сознания. Внимание полностью расфокусировано и распределено между несколькими объектами. У меня не получается услышать несколько мелодий одновременно, но всякий раз, когда я перестаю вслушиваться, происходит что-то совершенно особенное. Много песен сливаются в одну, не существующую ни в одном из этих отдельных голосов. Возникает новая песня, которую я не могу опознать, распутывая музыку на отдельные волокна мелодий.

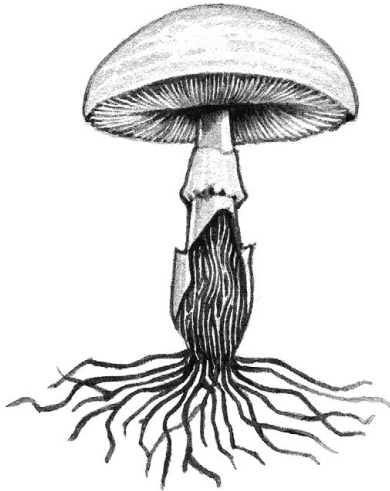
Мицелий — это то, что получается, когда гифы грибов — потоки вещества, а не потоки сознания, — смешиваются. Однако как напомнил мне Алан Рейнер, миколог, специализирующийся на развитии мицелия, «мицелий нельзя рассматривать как аморфный кусок ваты». Гифы могут взаимодействовать для образования сложных структур.

Когда вы смотрите на грибы, вы смотрите на плоды. Представьте себе, что на месте грибов из-под земли растут виноградные гроздья. А теперь вообразите себе виноградную лозу, которая породила их, извивающуюся и ветвящуюся под землей. Ягоды и лоза составлены из разных видов клеток. Срежьте гриб, и вы убедитесь, что он составлен из того же типа клеток, что и мицелий: из клеток гиф.

Гифы вырастают не только в плодовые тела, но и в другие образования. Многие виды грибов формируют сплетения гиф — шнуровидные отростки, известные как ризоморфы. Они сильно отличаются по размеру, от тончайших нитей до волокон толщиной в несколько миллиметров и в сотни метров длиной. И если принять во внимание, что отдельные гифы — это трубы, а не нити — а ведь так легко забыть о том, что внутри гифы заполнены жидкостью, — то получается, что ризоморфы — это большие трубы, сформированные из многих мелких трубочек. Они могут переместить поток жидкости в тысячи раз быстрее, чем одна гифа, — почти 1,5 метра в час, как было установлено в одном из исследований. Так грибницы способны передавать питательные вещества и воду на большие расстояния.

Олссон рассказывал мне, что в одном шведском лесу он обнаружил большую грибницу опенка обыкновенного, *Armillaria*, расположившуюся на площади в два футбольных поля. По этому участку проходил ручей, через который был переброшен маленький мостик. «Я пригляделся к мостику, — вспоминал он, — и увидел, что гриб уже начал загибать свои шнуровидные отростки под мост. Фактически гриб перебирался через ручей с помощью моста». Как грибы координируют рост этих образований, до сих пор неясно.

Шнуровидные образования и ризоморфы являются хорошим напоминанием о том, что грибницы — это транспортные сети. Мицелиальная дорожная карта Бодди также иллюстрирует это утверждение. Еще одно подтверждение — рост плодового тела. Чтобы пробиться через асфальт, плодовое тело должно быть насыщено водой. А чтобы это



Плодовые тела, как и мицелий, состоят из гиф

произошло, вода должна быстро перемещаться по грибнице и направляться в растущее плодовое тело толчкообразно.

На короткие расстояния вещества могут переноситься через мицелий с помощью сети микротрубочек — транспортных артерий из белков, своеобразных переходов между строительными лесами и эскалаторами. Однако перемещение с помощью микротрубочковых «моторов» энергетически затратно, и на большие расстояния содержимое гифы переносится рекой клеточной жидкости. Между тем обоими способами можно преодолеть мицелиевые изгибы достаточно быстро. Эффективное перемещение веществ позволяет разным частям сети грибницы заниматься разной деятельностью. При реставрации английского имения Хэддон-Холл в старой каменной печи нашли домовый гриб, или серпулу (*Serpula*). Отростки его мицелия прошли через восемь метров каменной кладки и проросли в гниющий пол во всем здании. Пол представлял собой питательную среду, а печь оказалась тем местом, где выросли плодовые тела.

Лучший способ оценить интенсивность движения жидкости внутри мицелия — наблюдать за тем, как она курсирует по сети. В 2013 году группа исследователей Калифорнийского университета в Лос-Анджелесе обработала мицелий, и ученые могли видеть клеточные структуры внутри гиф.

Видеозапись показала полчища прибывающих клеточных ядер. В некоторых гифах они перемещаются быстрее, чем в других, где-то и вовсе двигаются разнонаправленно. Иногда образуются пробки, и ядра перенаправляются в другие отростки. Потоки ядер сливаются друг с другом; ритмичные толчки заставляют их двигаться с большой скоростью, разветвляться на перекрестках и устремляться в боковые проходы. Как иронично заметил один из исследователей, это «анархия клеточных ядер» как есть.

Поток помогает объяснить циркуляцию веществ в грибнице, но не может объяснить, почему грибы растут в одном направлении, а не в другом. Гифы чувствительны к стимулам, и в каждый отдельный момент времени они сталкиваются с огромным количеством возможностей. Вместо того чтобы расти по прямой линии с постоянной скоростью, гифы направляются в привлекательные места из непривлекательных. Как?

В 1950-е годы нобелевский лауреат, биофизик Макс Дельбрюк заинтересовался сенсорным поведением. В качестве модельного организма он выбрал фикомицес Блексли, *Phycomyces blakesleeanus*. Дельбрюк был очарован замечательными перцептивными способностями этой «особи». Его спороносные структуры (на деле — гигантские вертикальные гифы) чувствительны к свету примерно настолько же, что и человеческий глаз, и, подобно ему, адаптируются к его интенсивности. Они способны уловить слабый свет, исходящий от всего лишь одной звезды, и могут быть «ослеплены» ярким дневным солнечным светом. Растения реагируют на уровень освещения в сотни раз интенсивнее.

В конце научной карьеры Дельбрюк выражал убеждение, что *этот фикомицес* — «самый умный» из более простых многоклеточных* организмов. Кроме своей великолепной чувствительности к прикосновению — фикомицес предпочитает расти, когда скорость ветра не превышает 1 см/с, или 0,036 км/ч, — этот гриб способен улавливать

* Гифы фикомицесов не имеют перегородок. То есть их мицелий — одна многоядерная клетка, считать его многоклеточным ошибочно. — *Прим. науч. ред.*

присутствие объектов поблизости. Это явление называется реакцией избегания. Несмотря на десятилетия кропотливых исследований, механизм такого поведения остается загадкой. Объекты, находящиеся в пределах нескольких миллиметров от фикомицеса, заставляют спороносные структуры гриба отклоняться, хотя и не касаются его. Каков бы ни был объект — прозрачный или матовый, гладкий или шероховатый, — спорангиеносец фикомицеса начинает уходить от него примерно через две минуты после обнаружения. Воздействие электромагнитных полей, влажности, механических факторов и температуры ученые исключили. Некоторые исследователи предполагают, что фикомицес использует летучий химический сигнал, отклоняющийся и обходящий препятствие под воздействием слабых воздушных потоков, но это еще предстоит доказать.

Хотя *фикомицесы* — чрезвычайно чувствительный вид, есть еще много грибов, способных чувствовать и реагировать на свет (его направление, силу или цвет), температуру, влажность, запас питательных веществ, токсины и электрические поля. Подобно растениям, грибы могут «видеть» цвета всего спектра с помощью рецепторов, чувствительных к синему свету и, в отличие от растений, к красному свету; у грибов также имеются опсины (светочувствительные пигменты), присутствующие в колбочках и палочках глаз животных. Гифы могут также ощущать текстуру поверхностей: по данным исследования, молодые гифы грибка, вызывающего ржавчину фасоли, умеют «нащупывать» канавки глубиной в половину микрометра (это в три раза мельче углубления между лазерными дорожками компакт-диска) на искусственных поверхностях. Когда гифы соединяются, чтобы образовать плодовое тело гриба, они обретают чрезвычайную чувствительность к силе тяжести. И, как мы уже убедились, грибы используют бесчисленное множество каналов химической связи с другими организмами и друг с другом: когда они соединяются или вступают в половые связи, гифы отличают «себя» от «других», а также от разновидностей «других».

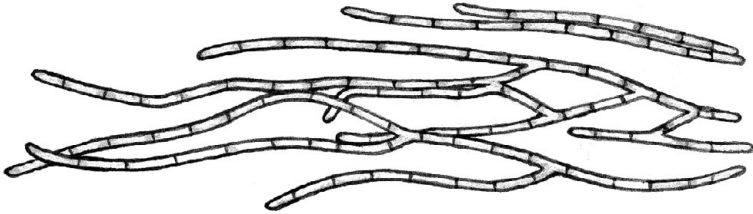
Грибы «варятся» в океане сенсорной информации. И каким-то образом гифы — направляемые кончиками —

способны *интегрировать* многочисленные потоки данных и определять подходящую траекторию для роста. Люди, подобно большинству животных, используют мозг для интеграции сенсорных данных и принятия оптимальных решений. Стало быть, нам интересно локализовать такую интеграцию в организме. Мы хотим ответить на вопрос «где?», но если мы имеем дело с растениями и грибами, этот вопрос, вернее всего, останется без ответа. Грибницы и растения состоят из разных частей, но среди них нет уникальных. Там всего понемногу. Но как же тогда потоки сенсорной информации сливаются внутри грибницы? Как организмы, не имеющие мозга, сочетают ощущение и действие?

Ботаники пытались решить этот вопрос больше ста лет. В 1880 году Чарлз Дарвин и его сын Френсис опубликовали книгу «Движения растений». В заключительном разделе авторы предполагают, что так как кончики корней определяют траекторию роста, именно там интегрируются сигналы от разных частей организма. Кончики корней, писали отец и сын Дарвины, ведут себя «как мозг какого-нибудь низшего животного, <...> принимая сигналы от сенсорных органов и управляя несколькими движениями». Предположение Дарвинов вошло в обиход, но оно, мягко говоря, противоречиво. Не потому, что их наблюдения когда-либо оспаривались: понятно, что кончики действительно направляют движение корней, так же как верхушки растений направляют движение ростков над землей. Но что смущает ботаников, так это использование слова *мозг*. Некоторые из них считают, что такая постановка вопроса может привести нас к более полному пониманию жизни растений. Другим кажется нелепостью предполагать, что растения могут обладать органом, хоть сколько-то напоминающим мозг.

В каком-то смысле слово «мозг» не совсем точное. Основная идея отца и сына Дарвинов состояла в том, что кончики — которые направляют корни под землей и ростки растений над ней — должны быть средоточием потоков информации, местом интеграции сенсорики и моторики, где определяется подходящее направление роста. То же применимо к гифам грибов. Кончики гиф — это части мицелия,

которые растут, меняют направление, ветвятся и сливаются друг с другом. Они делают большую часть работы. И они многочисленны. Отдельная грибница может иметь от сотен до миллиардов кончиков гиф, взаимодействующих друг с другом и обрабатывающих информацию одновременно и в больших количествах.



На кончиках гиф и вправду могут соединяться потоки данных ради определения скорости и направления роста. Но как кончики гиф в одной части мицелия «узнают», что делают их «коллеги» с противоположной стороны грибницы? Мы вынуждены снова вернуться к головоломке Олссона. Его панеллюс (*Panellus*) мог координировать поведение разнесенных в пространстве частей за срок столь короткий, что невероятным было предположение о токе химических веществ от точки *A* до точки *B* как причине перемены. Мицелий некоторых видов грибов образует так называемые ведьмины круги: сеть охватом в сотни метров и возрастом в сотни лет вдруг провоцирует одновременное появление замкнутой цепочки плодовых тел. В экспериментах Бодди с мицелием грибов, вызывающих гниение древесины, только одна часть грибницы обнаружила кусок дерева, но вся она изменила поведение, притом очень быстро. Как устроена коммуникация внутри сети мицелия? Каким образом происходит быстрый перенос информации по сети грибницы?

Есть несколько возможностей. Некоторые исследователи предполагают, что сети мицелия могут передавать сигналы о развитии, используя изменения в давлении или интенсивности потока. Ведь мицелий по сути есть замкнутая гидравлическая система, подобная тормозной системе

автомобиля: внезапное изменение давления в одной части может, в принципе, быстро проявиться в другой. Некоторые ученые заметили, что метаболическая деятельность, например накопление и выделение химических соединений внутри гиф, может иметь форму последовательных импульсов, которые могут помогать синхронизировать поведение всей сети. Что касается Олссона, то он обратил внимание на одну из других немногих возможностей, а именно электричество.

Давно известно, что животные используют электрические импульсы, или потенциалы действия, для связи между разными частями своих тел. Нейроны — удлинённые нервные клетки, передающие информацию посредством электрических импульсов, которые координируют поведение животных, — изучает отдельная наука, нейробиология. Хотя так называемое животное электричество — прерогатива не только животных, не они одни умеют генерировать потенциалы действия. Это под силу еще растениям, в том числе водорослям, а в 1970-е годы стало известно, что и некоторым видам грибов. Бактерии тоже проводят электричество. Кабельные бактерии образуют длинные электропроводные нити — нитевидные нанокристаллы. В 2015 году установили, что колонии бактерий могут координировать свою деятельность, используя для этого волны электрической активности, подобные потенциалам действия. Однако немногие микологи допускают, что это явление может играть важную роль в жизни грибов.

В середине 1990-х годов на том же факультете Лундского университета в Швеции, на котором работал Олссон, группа ученых вела исследование в области нейробиологии насекомых. Они проводили эксперименты по измерению активности нейронов, вводя тонкие стеклянные микроэлектроды в мозг моли. Олссон с их разрешения воспользовался их оборудованием, чтобы ответить на простой вопрос: что произойдет, если заменить в эксперименте мозг моли на грибной мицелий? Нейробиологи были заинтригованы. В принципе, грибные гифы должны быть хорошо приспособлены к проведению электрических импульсов. Они

покрыты белками, которые изолируют их: электроволны в теории могут перемещаться на большие расстояния, не рассеиваясь. Нервные клетки животных имеют аналогичную защиту. Более того, клетки мицелия последовательно соединены друг с другом, что, возможно, позволило бы импульсам, возникшим в одной части сети, достигать другой ее части без сбоев.

Для своего эксперимента Олссон тщательно отобрал виды грибов. Он пришел к выводу, что если у грибов действительно существуют системы электрической связи, то обнаружить их будет легче у тех видов, которым придется координировать поведение частей сети на далеких расстояниях. Чтобы эксперимент удался с большей вероятностью, он выбрал опенок, *Armillaria*, грибница которого — рекордсмен по протяженности (она покрывает километры) и по возрасту (растет тысячи лет). Когда Олссон вставил микроэлектроды в гифы гриба *Armillaria*, он обнаружил регулярные импульсы, схожие с потенциалами действия, которые выстреливали со скоростью, очень близкой к скорости сенсорных нейронов животных — приблизительно четыре импульса в секунду, — и которые перемещались вдоль гифы со скоростью как минимум полмиллиметра в секунду, что примерно в 10 раз быстрее, чем самая высокая скорость жидкости, измеренная в гифах грибов. Это заинтересовало его, хотя данные наблюдений и не доказывали, что электрические импульсы — основа системы быстрой передачи сигналов. Электрическая активность может играть в ней роль, только если она чувствительна к стимуляции. Олссон решил измерить реакцию гриба на куски дерева, которое служит пищей для этого вида. Он установил оборудование для проведения эксперимента и поместил кусок древесины на мицелий в нескольких сантиметрах от электродов. И обнаружил нечто невероятное. Когда дерево пришло в контакт с мицелием, интенсивность импульсов удвоилась. Когда он убрал дерево, интенсивность пришла в норму. Чтобы убедиться, что грибы реагировали не на вес груза, он поместил на мицелий кусок несъедобного пластика такого же размера. Гриб не отреагировал.

Олссон продолжил эксперимент с разными видами грибов, включая микоризные, растущие на корневой системе растений, *Pleurotus* (вешенкой обыкновенной) и *Serpula* (серпулой плачущей, или домовым грибом, обнаруженном в печи Хэддон-Холла). Все они производили импульсы, подобные потенциалам действия, и откликались на большое количество раздражителей. Олссон выдвинул гипотезу: электрические сигналы для многих грибов — способ пересылать сообщения между различными частями мицелия «об источниках пищи, повреждениях, состояниях гриба или присутствии других существ вокруг него».

Многие нейробиологи, с которыми работал Олссон, очень воодушевились, осознав, что сети мицелия могут вести себя подобно мозгу. «Первыми отреагировали эти ребята, работавшие с насекомыми, — вспоминал Олссон. — Они стали фантазировать об этих огромных лесных грибницах, распространяющих электрические сигналы вокруг себя. Они вообразили, что грибница — это большой мозг, лежащий в лесу под землей». Признаюсь, я тоже не мог не заметить это бросающееся в глаза сходство. Выводы Олссона предполагали, что мицелий может образовывать фантастически сложные сети электрически возбудимых клеток. Мозг тоже является фантастически сложной сетью электрически возбудимых клеток.

«Я не думаю, что мицелий — это мозг, — объяснил мне Олссон. — Мне пришлось воздержаться от аналогий с ним. Как только произносят слово “мозг”, люди представляют себе мозг человека, который формирует речь и обрабатывает мысли, принимает решения». Его осторожность весьма обоснованна. «Мозг» — это ключевое слово, обремененное смыслами, по большей части относящимися к животному миру. «Когда мы говорим “мозг”, — продолжал Олссон, — мы думаем о мозге животных». Кроме того, он подчеркнул, что мозг ведет себя как таковой из-за того, как он устроен.

Архитектура мозга животных сильно отличается от архитектуры грибниц. В первом случае нейроны стыкуются с другими нейронами в синапсах, и там сигналы объединяются с другими сигналами. Молекулы-нейромедиаторы

проходят через синапсы и позволяют различным нейронам вести себя по-разному — некоторые возбуждают нейроны, некоторые подавляют их. Сети мицелия не обладают такими особенностями.

Но если бы грибы не использовали электроволны для передачи сигналов по сети мицелия, разве мы не стали бы думать о мицелии как своеобразном прототипе мозга? По мнению Олссона, могут быть и другие способы регулирования электрических импульсов в сети мицелия, чтобы создать «электрические цепи, приемники сигнала и генераторы, подобные тем, что существуют в мозгу». У некоторых грибов гифы разделяются на отсеки септами с порами, проницаемость которых в точности регулируется. Когда пора открывается или закрывается, изменяется сила сигнала, проходящего от одного отсека к другому, будь то химический или электрический сигнал или сигнал об изменении давления. Если внезапное изменение электрического заряда могло бы открыть или закрыть пору, размышлял Олссон, то всплеск частоты импульсов мог бы изменить путь прохождения через гифу последовательных сигналов, и так мицелий «запомнил» новый алгоритм. Более того, гифы ветвятся. Если два импульса сошлись бы в одном месте, оба влияли бы на проводимость пор, интегрируя сигналы из различных ветвей. «Не нужно хорошо разбираться в работе компьютеров, чтобы понять, что такие системы могут создавать точки принятия решений, — сказал мне Олссон. — Если соединить эти системы в гибкую и подвижную сеть, появляется возможность создать “мозг”, который способен учиться и запоминать». Он держался от слова «мозг» на безопасном расстоянии, заключая его в кавычки и подчеркивая тем самым, что использовал его в качестве метафоры.

То, что грибы могут использовать электрические сигналы как основу для быстрой коммуникации, не укрылось от взора Андрея Адамацкого, директора Лаборатории нетрадиционных компьютерных исследований. В 2018 году он внедрил электроды в плодовые тела вешенки, растущие гроздьями из участков мицелия, и обнаружил спонтанные

волны электрической активности. Когда он поднес пламя к плодovому телу, другие плодовые тела той же грозди отреагировали резким скачком напряжения. Вскоре после этого он опубликовал статью *Towards fungal computer* («Изобретая грибной компьютер»). В ней он предположил, что сети мицелия «обрабатывают» информацию, закодированную в пиках электрической активности. Если бы мы знали, как сеть мицелия будет реагировать на такой стимул, считает Адамацкий, мы могли бы рассматривать ее как живую микросхему. Стимулируя мицелий, например с помощью пламени или химических веществ, мы, суть, вводили бы данные в грибной компьютер.

Как бы фантастически ни звучало словосочетание «грибной компьютер», но биокомпьютерные технологии — это стремительно развивающаяся область. Адамацкий потратил несколько лет на разработку способов применения слизевиков в качестве датчиков и «компьютеров». Его прототипы биокомпьютеров используют слизевиков для решения ряда геометрических задач. «Сети»* слизевиков могут модифицироваться, например путем отсечения связи, чтобы изменить набор «логических функций», которые выполняются в конкретной сети. «Грибной компьютер» Адамацкого — это прикладная технология обработки информации слизевиками к другим «сетевым» организмам. По наблюдениям Адамацкого, есть грибницы более приспособленные для информационных технологий, чем «сеть» слизевиков. Это старые грибницы, которые не спешат принимать новые формы. К тому же они крупнее, у них больше связей между гифами. Именно в местах этих соединений, которые Олсон назвал «схемами принятия решений» (*decision gates*), а Адамацкий описывает как «элементарные процессоры», взаимодействуют и объединяются сигналы, идущие от различных ветвей сети. Адамацкий подсчитал, что грибница опенка, покрывающая более 15 гектаров, содержит приблизительно триллион таких «процессоров».

* Дело в том, что у слизевиков, не являющихся грибами, нет грибницы. Их вегетативное тело — плазмодий с псевдоподиями. — *Прим. науч. ред.*

Для Адамацкого предназначение грибных компьютеров не в том, чтобы заменить микросхемы, — они для того слишком неторопливы. Скорее, как он считает, можно было бы использовать мицелий, развивающийся в какой-либо экосистеме, как «большой датчик, отражающий состояние окружающей среды». Грибницы, согласно его рассуждениям, отслеживают большое число потоков данных, и это составляет часть их повседневной жизни. Если бы мы могли подключиться к сетям мицелия и объяснить сигналы, которые они используют для обработки информации, мы могли бы больше узнать о том, что происходит в экосистеме. Грибы могли бы рассказать о качестве почвы, чистоте воды, экологическом загрязнении и других параметрах окружающей среды, к которым они чувствительны.

Но мы несколько отклонились от темы. Обработка информации с помощью живых «сетевых» организмов — совсем новая область, и на многие вопросы еще предстоит ответить. Олссон и Адамацкий показали, что мицелий может реагировать на электрический сигнал, но не смогли провести черты между стимулом и реакцией. Это как если бы вы укололи булавкой большой палец ноги, заметили, как нервный импульс прошел по всему телу, но не смогли измерить реакцию на болевое ощущение.

Все это предстоит выяснить в будущем. За 23 года, что прошли между исследованием мицелия Олссона и исследованием вёшенок Адамацкого, никто больше не отважился на изучение электрических сигналов в грибнице. Если бы у Олссона были ресурсы для продолжения научных разработок, то, как он сказал мне, он бы попытался продемонстрировать явную физиологическую реакцию на изменения в электрической активности и декодировать образцы электрических импульсов. Его мечта — «связать гриб с компьютером и осуществить коммуникацию с ним», использовать электрические сигналы, чтобы заставить гриб изменить свое поведение. «Какие удивительные и потрясающие эксперименты можно будет поставить, если это окажется правильным».

Эти исследования вызывают тучу вопросов. Обладают ли «сетевые» формы жизни — такие, как грибы или слизевики, — познавательными способностями? Можем ли мы считать их поведение разумным? Если разум этих организмов оказался бы непохож на наш разум, то каким он мог бы быть? Заметили бы мы его?

Мнения биологов разделились. Традиционно разум и познание пытались определить с человеческих позиций — как что-то, что требует по крайней мере наличия мозга или скорее сознания. Когнитивистика возникла в процессе изучения людей, и поэтому, разумеется, центральное место в науке занимает разум человека. Без сознания классические проявления когнитивных процессов — язык, логика, система доказательств, узнавание себя в зеркале — кажутся невозможными. Все они задействуют сложные ментальные функции. Но как мы определяем разум и сознание — вопрос вкуса. Для многих концепция, в центре которой находится мозг, слишком ограничена. Представление о том, что можно провести четкую линию между человеком и всеми остальными, у кого нет «настоящего мозга» и «настоящего сознания», было резко отвергнуто философом Даниэлом Деннетом как «архаичный миф».

Мозг не выдумал многих своих «трюков» с нуля, и многие его характерные особенности отражают древние процессы, протекавшие задолго до того, как мозг стал таким, каким мы его знаем.

Чарлз Дарвин в 1817 году стал на прагматическую точку зрения. «Разум — это то, насколько эффективно биологические виды делают то, что необходимо для их выживания». Этой точке зрения вторят многие современные биологи и философы. Латинские корни, из которых сложено английское *intelligence* («ум, разум, интеллект»), означают в совокупности «делать различие между». Многие виды организмов, не имеющих мозга, — растения, грибы и слизевики — гибко реагируют на окружающую среду, решают проблемы и делают выбор в пользу какой-либо альтернативы. Очевидно, обработка сложной информации может быть «поручена» не только мозгу.

Чтобы описать поведение не имеющих мозга систем при решении задач, некоторые исследователи используют термин «роевой интеллект». Другие склонны приписывать наклонности этих «сетевых» форм жизни «минимальному», или «базальному», сознанию. Они аргументируют это тем, что вопрос, который мы должны задавать, вовсе не в том, обладает ли организм способностью к познанию; вместо того мы должны оценить *степень*, до которой организм может считаться познающим. Все эти теории подразумевают, что разумное поведение возможно и без мозга. Все, что нужно, — это подвижная и восприимчивая сетевая структура.

Долгое время мозг считался такой динамической сетевой структурой. В 1940 году нобелевский лауреат, нейробиолог Чарльз Шеррингтон назвал человеческий мозг «волшебным ткацким станком, на котором миллионы мелькающих челноков ткут исчезающий узор». Сетевая нейробиология (*network neuroscience*) — научная дисциплина, изучающая, как деятельность миллионов нейронов складывается в деятельность мозга. Отдельная нейронная сеть в пределах одного мозга не может породить разумное поведение, как и поведение одного термита не может сформировать сложную архитектуру термитника. Одна нейронная сеть «знает» о том, что происходит вокруг, ничуть не более, чем один термит знает о строительстве термитника, но большие количества нейронов могут образовать сеть, которая порождает удивительные явления. Если смотреть на проблему таким образом, то сложные модели поведения, такие как познание и сообразное с жизненным опытом поведение, возникают из сложных сетей гибко перестраивающихся нейронов.

Мозг — это всего одна такая сеть, один способ обработки информации. Даже у животных многие процессы текут без участия мозга. Исследователи из Университета Тафтса проиллюстрировали это в экспериментах с плоскими червями. Плоские черви — хорошо изученные модельные организмы, и все из-за их способности к регенерации. Если отсечь голову плоскому червю, он отращивает другую голо-

ву, мозг и органы. Они также поддаются обучению. Исследователи заинтересовались, сможет ли червь, обученный запоминать особенности окружающей среды и лишившийся головы, сохранить память, отрастив новую голову с новым мозгом. Как ни удивительно, может. Представляется, что память плоских червей локализована где-то еще. Эксперименты указывают также, гибкие сети, которые определяют сложные поведенческие модели, не всегда ограничены небольшой областью внутри головы даже в телах животных, жизнь которых регулируется мозгом. Есть и другие примеры. Например, у осьминогов большая часть нервов концентрируется не в мозгу, а распределяется по всему телу. Многие располагаются в щупальцах, которые исследуют и пробуют на вкус окружающую среду без участия мозга. Даже будучи ампутированными, щупальца не утрачивают способности тянуться и хватать.

Многие организмы развили гибкие сети для решения задач, которые ставит перед ними жизнь. Наверное, мицелиальные организмы сделали это раньше других. В 2017 году исследователи из Шведского королевского музея естественной истории опубликовали доклад, в котором описали окаменевший мицелий, сохранившийся во фрагментах древних потоков лавы. На окаменелости видны ветвящиеся нити, которые «касаются друг друга и спутываются друг с другом». «Запутанная сеть», которую они образуют, размеры гиф, размеры похожих на споры образований и тип распределения растущих частей — все это сильно напоминает современные грибницы. Это удивительное открытие, ведь окаменелостям 2,4 миллиарда лет — они появились на миллиард лет раньше предполагаемой даты появления грибов как отдельного вида на нашей планете. Пока еще нет способа с точностью идентифицировать этот организм. Достоверно одно: настоящий это гриб или нет, у него определенно была привычка формировать грибницу. Это открытие, которое делает мицелий одним из древнейших известных этапов на пути к сложным формам многоклеточной жизни, первым живым сплетением, одной из первых живых «сетей».

В неизменном — на диво — виде мицелий просуществовал более половины из 4 миллиардов лет истории жизни на Земле, пройдя через бесчисленные катаклизмы и глобальные катастрофы.

Барбара Макклинток, награжденная Нобелевской премией за работы по генетике кукурузы, писала, что растения — удивительные существа, «выходящие далеко за пределы наших самых дерзких представлений о них». Не потому, что они нашли способы делать то, что могут делать люди, но потому, что их жизнь — которую они, пригвожденные корнями, как гвоздями, вынуждены коротать на одном месте, — вынудила их изобрести бесчисленные «гениальные механизмы» — ответы на сложные ситуации, от которых животные могли бы просто убежать прочь. То же самое можно сказать и о грибах. Мицелий — одно из таких гениальных решений, блестящее решение некоторых главных проблем, с которыми их сталкивает жизнь. Мицелий не может вести себя так, как мы, но он может опереться на гибкие «сети», которые постоянно перестраивают себя. Он сам — суть, гибкая сеть и бесконечно перестраивает себя.

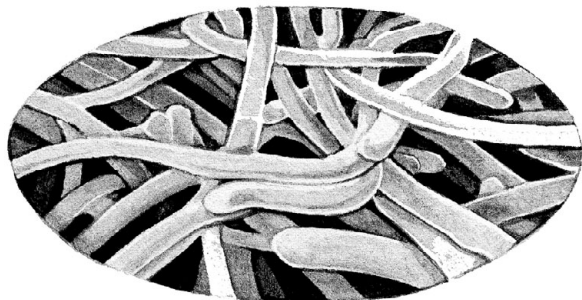
Макклинток подчеркивает, как важно для исследователя «чувствовать организм», научиться терпению, чтобы «услышать послание материала». Если речь идет о грибах, есть ли у нас шанс? Жизнь мицелия так *отличается* от нашей, наши возможности так непохожи. Но, может быть, не так уж сильно, как кажется поначалу. Многие традиционные культуры считают жизнь взаимосвязанным единством. Сегодня мысль о том, что все проявления жизни переплетены друг с другом, так часто высказывается, что стала общим местом. Идея «паутины жизни» лежит в основе современного научного представления о природе; теория систем, возникшая в XX веке, понимает все системы — и воздушные потоки, и правительства, и экосистемы — как динамические сети взаимодействия; создатели искусственного интеллекта решают задачи, используя нейронные сети; многие аспекты человеческой жизни тесно связаны с интернетом; сетевая нейробиология призывает нас рассмотреть самих себя как динамическую сеть. Подобно тренированной мышце, сеть

обрела гипертрофированный статус основы. Трудно представить предмет или явление, для объяснения сути которого не использовались бы сетевые структуры.

А мы все еще пытаемся объяснить, что такое мицелий. Я спросил Бодди, какие аспекты жизни мицелия самые таинственные.

«А... это хороший вопрос, — она задумалась. — На самом деле я не знаю. *Столько всего*. Как мицелий работает *в качестве сети*? Как он ощущает окружающую среду? Как посылает сообщения от одной части грибницы к другой? Как эти сигналы затем интегрируются? Это огромные вопросы, о которых, кажется, едва ли кто-то задумывается. А ведь понимание этих процессов является ключевым, если мы хотим разобраться в том, как грибы делают все, что они делают. У нас есть методы, чтобы проделать эту работу. Но кто изучает биологию грибов? Немногие. Я думаю, что это очень тревожная ситуация. Мы не смогли объединить явления, которые открыли, в единую картину, — она расшлась. — Поле созрело для жатвы. Но не думаю, что многие готовы пожинать плоды».

В 1845 году Александр фон Гумбольдт заметил, что «каждый новый шаг, который мы делаем на пути познания природы, приводит нас к воротам новых лабиринтов». Полифонические песни, подобные «Собирательницам грибов», рождаются из сплетения голосов; мицелий рождается из сплетения гиф. Полное научное понимание мицелия еще возникнет. Мы стоим на пороге одного из старейших лабиринтов жизни.



ГЛАВА ТРЕТЬЯ

БЛИЗОСТЬ НЕЗНАКОМЦЕВ

Проблема была в том, что говоря «мы»,
мы не знали, кого имеем в виду.

— АДРИЕН РИЧ

18 июня 2016 года в унылой степи в Казахстане приземлился спускаемый модуль космического корабля «Союз». Три человека, отработавшие положенный срок на Международной космической станции (МКС), были благополучно извлечены из обожженной капсулы. Космонавты стремительно спускались на поверхность Земли, и не одни. Под сиденьями, плотно упакованные в контейнер, находились сотни живых организмов.

Среди образцов было несколько видов лишайников, посланных в космос на полтора года в рамках эксперимента *Biology and Mars Experiment (BIOMEX)*. *BIOMEX* — это международный проект астробиологов, договорившихся о закреплении модулей на внешней стороне МКС — на платформе *EXPOSE* — для выращивания биологических образцов во взвешенных условиях. «Будем надеяться, что они благополучно вернуться», — заметила Натушка Ли, один из членов команды *BIOMEX*. Она занимается лишайниками и обратилась ко мне за несколько дней до запланированного приземления модуля. Я не был уверен, кого она подразумевает под словом «они». Вскоре после этого Ли связалась со мной и сообщила, что все хорошо. Она получила электронное послание от ведущего исследователя в Германском центре авиации и космонавтики

и с облегчением зачитала вслух главную строчку: «“Модули *EXPOSE* вернулись на Землю”... Скоро, — улыбнулась Ли, — мы получим назад наши образцы».

На орбиту отправили разнообразных экстремофилов — споры микроорганизмов и водорослей-непаразитов, а также обитающих на камнях грибов и тихоходок — микроскопических животных, известных как «водяные медведи»*. Некоторые организмы могут выжить, если их защитить от вредного воздействия солнечной радиации. Но лишь немногие, кроме единичных видов лишайников, способны выдержать условия открытого космоса, если защита от солнечного света отсутствует. У этих лишайников настолько замечательная способность выживать, что астробиологии записали их в число идеальных организмов для определения, как пишет один ученый, «границ возможностей и ограниченности земных форм жизни».

Уже не в первый раз лишайники помогают человечеству постигнуть пределы возможностей жизни — такой, какой мы ее знаем. Лишайники — живые загадки. С XIX века из-за них возникали яростные споры: что, собственно, они есть такое? Чем ближе мы знакомимся с лишайниками, тем более необычными они кажутся. До настоящего времени лишайники искажают и запутывают наше представление об идентичности — и вынуждают задаваться вопросом, где один организм заканчивается, а другой начинается.

В своей богато проиллюстрированной книге «Красота форм в природе» (1904) биолог и художник Эрнст Геккель изображает разнообразные формы лишайников. Его лишайники выпускают безумные ростки и, словно в бреду, наслаиваются друг на друга. Испещренные жилами хребты уступают место гладким пузырям; стебли превращаются в замысловатые зубцы и чаши. Изрезанные побережья переходят в неземные сооружения, в очертаниях которых прячется множество укромных уголков. Именно Геккель в 1866 году придумал слово «экология». Этот термин обозначает

* От нем. *Wasserbär*, как назвал этих животных зоолог И. Гёце. Кальки названия в основном встречаются в западной литературе. — *Прим. изд.*

изучение взаимоотношений организмов и их окружения, места их обитания, а также всех тех дебрей, которые образуют питающие их связи. Вдохновленная работой Александра фон Гумбольдта, экология опирается на ту установку, что все в природе взаимосвязано, что это «система действующих сил». Организмы нельзя понять, изолировав от всего остального.

Через три года, в 1869 году, швейцарский ботаник Симон Швенденер опубликовал статью, в которой выдвигалась гипотеза о «дуальной природе лишайников». В своей работе он высказал радикальное мнение о том, что лишайники не являются единым организмом, как долгое время считали.

Он доказывал, что они состоят из двух различных существ: гриба и водоросли. Швенденер предположил, что «грибной» компонент лишайника (известный сегодня как микобионт) давал физическую защиту и добывал минеральные вещества для себя и клеток водоросли. Водорослевый партнер (известный сегодня как фикобионт, роль которого иногда исполняют фотосинтезирующие бактерии) вбирал в себя свет и углекислый газ, чтобы вырабатывать углеводы, которые обеспечивали организм энергией. По мнению Швенденера, грибные компоненты были «паразитами, пусть и наделенными мудростью государственных мужей». А водоросли были «их рабами, <...> силой принужденных служить грибам». Вместе они составляли зримое тело лишайника. Эта парочка могла существовать там, где по отдельности ни один не выжил бы.

Теория Швенденера вызвала негативную реакцию со стороны его коллег-биологов, специализировавшихся на лишайниках. Мысль о том, что два различных вида могли объединиться для создания нового организма, наделенного собственной индивидуальностью, для многих казалась нелепой и шокирующей. «Полезный и дающий силы паразитизм? — насмешливо восклицал один из современников. — Слыханное ли дело?» Другие отметили ее как «сенсационную фантазию», «противоестественный союз между плененной девой Водорослью и тираном Грибом». Третьи высказывались более сдержанно. «Видите ли, — писала ан-

глийская миколог Беатрис Поттер, больше известная как автор детских книг, — мы не верим в теорию Швенденера».

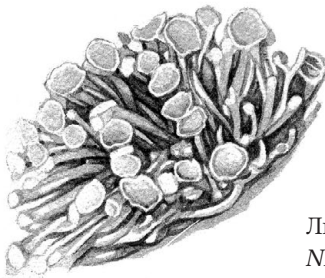
Наиболее тревожной для классификаторов — работавших не покладая рук, чтобы разместить жизнь в аккуратных рамках генеалогии, — была мысль о том, что один организм может состоять из двух разных родов. В соответствии с теорией Чарлза Дарвина об эволюции путем естественного отбора, впервые опубликованной в 1859 году, считалось, что новые виды возникают благодаря дивергенции. Их эволюционные родословные множились, как ветви дерева. Ствол дерева раздваивался, образуя суки, которые делились на веточки, делившиеся на прутьики. Виды были листьями на прутьиках древа жизни. Однако гипотеза о двойственности предполагала, что лишайники были телами, составленными из организмов абсолютно разного происхождения. Внутри лишайников ветви древа жизни, расходившиеся в стороны друг от друга сотни миллионов лет, творили нечто совершенно неожиданное — они *сходились*.

В последующие десятилетия все большее число биологов принимало гипотезу двойственности, но многие не соглашались с тем, как Швенденер обрисовал взаимоотношения в этом партнерстве. И дело было вовсе не в сентиментальности. Метафоры, выбранные Швенденером, мешали восприятию более масштабных вопросов, поднятых гипотезой. В 1877 году немецкий ботаник Альберт Франк выдумал слово «симбиоз» для описания совместной жизни грибного и водорослевого компонентов. В процессе исследования лишайников ему стало очевидно, что необходимо было новое слово, в котором не будет и тени предвзятости по отношению к описываемым отношениям. Вскоре после этого биолог Генрих Антон де Бари воспользовался находкой Франка и превратил его термин в общий, применимый ко всему спектру взаимодействий любых типов организмов — от паразитизма на одном полюсе до взаимовыгодных отношений на противоположном конце.

Ученые сделали целый ряд новых важных наблюдений о симбиозе в последующие годы, включая и паразитические предположения, высказанные Франком, — о том, что

грибы, возможно, помогают растениям добывать питательные вещества из почвы (1885). Поддержки своим идеям все искали в гипотезе двойственности лишайников. Когда обнаружили, что водоросли живут внутри кораллов, губок и зеленых морских огурцов (голотурий), один из исследователей назвал их «животными-лишайниками». Несколькоими годами позже, когда внутри бактерий впервые были найдены вирусы, ученый, совершивший открытие, описал их как «микролишайники».

Иными словами, лишайники вскоре переросли в своего рода биологический принцип. Они стали вратами к идее симбиоза, а она противоречила преобладавшим в эволюционном учении течениям конца XIX и начала XX века. Лучше всего суть этих течений суммировал Томас Генри Гексли в созданной им картине жизни: он сравнил ее с «гладиаторским представлением... в котором самый сильный, быстрый и коварный проживет до следующего сражения». После появления гипотезы двойственности эволюцию уже нельзя было рассматривать только как конкурентную борьбу и конфликт. Лишайники стали образцом сотрудничества между царствами природы.



Лишайник
Niebla

Лишайники покрывают тонким слоем целых 8 % поверхности планеты — больше, чем тропические леса. Они обволакивают камни, деревья, крыши, заборы, скалы и поверхность пустынь. Некоторые окрашены в скучные камуфляжные цвета. Другие — зеленые, цвета лайма или

кислотного желтого цвета. Некоторые выглядят как пятна, другие — как маленькие кустики, третьи — как рога. Четвертые — кожистые и обвисшие, как крылья летучей мыши; пятые, как пишет поэт Бренда Хиллман, «подвешены в хэштегах». Некоторые живут на жуках, чья жизнь зависит от маскировки, обеспечиваемой лишайником. Блуждающие, не прикрепленные ни к чему лишайники разлетаются повсюду и не имеют конкретного места обитания. На «обычном фоне» окружающей их среды, отмечает Керри Кнудсен, курирующий собрание лишайников в коллекции гербариев Калифорнийского университета в Риверсайде, лишайники «выглядят как сказочные персонажи».

Я был чрезвычайно увлечен лишайниками на островах у берегов Британской Колумбии, у западного побережья Канады. Сверху кажется, что береговая линия сливается с океаном. Резкой грани нет. Суша постепенно дробится на бухточки и заливы, затем на каналы и проливы. Сотни островов разбросаны у берегов. Некоторые — не больше кита; самый большой, остров Ванкувера, длиной в пол-Британии. Большинство островов — сплошной гранит; вершины подводных холмов и долины между ними сглажены ледниками.

Каждый год мы с друзьями, всего несколько человек, загружаемся в 28-футовую парусную шлюпку и отправляемся в плавание вокруг островов. У шлюпки «Капер» темно-зеленый корпус, киля нет, но есть один красный парус. Выбраться из «Капера» на сушу — дело рискованное. Мы подходим к берегу на веслах, выскакивающих через раз из уключин маленькой неустойчивой лодки. Подойти вплотную к берегу — настоящее искусство. Волны швыряют лодочку на скалы и утаскивают из-под наших ног, пока мы выкарабкиваемся из нее. Но стоит выбраться на берег, и начинаются лишайники. Я часами могу погружаться в создаваемые ими миры — островки жизни среди моря камня. Слова, используемые для описания лишайников, звучат как названия болезней, скрипящие на зубах: *crustose* (накипный), *foliose* (листоватый), *squamulose* (чешуйчатый), *leprose* (лепрозный), *fruticose* (кустистый). Кустистый ли-

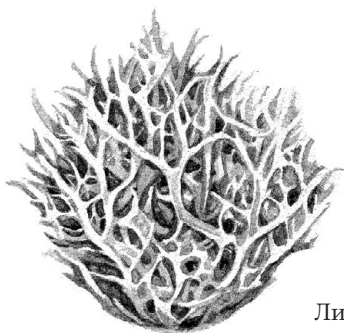
шайник покрывает поверхность складками и растет пучками; лишайники чешуйчатый и накипной ползут и просачиваются; лишайник листоватый наслаивается и шелушится.

Некоторые из них предпочитают жить на поверхностях, обращенных на восток, другие — на запад. Третьи ведут медленные войны, отражая вторжения со стороны соседей или беспokoя их. Некоторые занимают поверхности, оставшиеся без защиты, когда другие лишайники умирают и рассыпаются хлопьями. Они становятся похожи на архипелаги и континенты в неизвестном географическом атласе. Именно так ризокарпон географический, *Rhizocarpon geographicum*, получил свое название. Самые старые поверхности испещрены столетиями жизни и смерти лишайников.

Любовь лишайников к камням изменила поверхность планеты и продолжает менять ее, иногда в буквальном смысле. В 2006 году лица президентов, вырезанные на горе Рашмор, были очищены сжатым воздухом — так власти надеялись продлить жизнь монумента. При этом были сняты слои лишайника, нараставшие более 60 лет. Президенты не одиноки. «У каждого памятника, — пишет поэт Дрю Милн, — лишайниковая подкладка». В 2019 году жители острова Пасхи начали кампанию по очистке от лишайников монументальных каменных голов — моаи. Прозванные местными жителями проказой, лишайники деформируют черты «лиц» статуй и размягчают камень до «консистенции глины».

Лишайники добывают минеральные вещества из камня при помощи двухступенчатого процесса выветривания. Во-первых, они и вправду физически разрушают поверхность камня во время роста. Во-вторых, они используют арсенал сильнодействующих кислот и связывающих вещества соединений, чтобы растворить глыбы. Способность разрушать камень превращает лишайники в геологическую силу, и все же они не только размывают рельеф планеты. Когда лишайники умирают и разлагаются, они дают толчок к развитию первой почвы в новых экосистемах. Именно благодаря лишайникам неживая минеральная масса внутри камней может стать частью метаболических циклов живых организмов. Какая-то часть минеральных веществ в вашем

теле, скорее всего, прошла однажды через какой-нибудь лишайник. Где бы они ни обитали, на надгробной плите или внутри антарктических гранитных валунов, лишайники играют роль посредников между живой и неживой природой. Когда смотришь на скалистый канадский берег из «Капера», это становится совершенно ясным. Более высокие деревья начинают появляться выше линии прилива только за полосой лишайников и мхов в несколько метров, укореняясь в расщелинах — там, куда не может добраться вода и где смогли сформироваться новые почвы.



Лишайник *Ramalina*

Вопрос, что считать островом, а что нет, — главный в изучении экологии и эволюции. Он не менее важен для астробиологов, включая ученых из команды *BIOMEX*, многие из которых ломают голову над концепцией панспермии (от греч. *πᾶν* — «все» и *σπέρμα* — «семя»). Теория панспермии предполагает, что планеты — те же острова и что живая материя может путешествовать в открытом космосе между небесными телами. Эта идея существует с древности, хотя в научную гипотезу она оформилась только в начале XX века. Некоторые поддерживают эту теорию о том, что жизнь попала на Землю с других планет. Другие предполагают, что жизнь развилась на Земле и в других мирах, а существенные эволюционные толчки спровоцировали фрагменты живой материи из космоса. Третьи отстаивают теорию мягкой, или квази-, панспермии, утверждая, что жизнь возникла на Земле, но химический строительный материал,

необходимый для ее возникновения, поступал из космоса. Множество теорий описывают процесс попадания вещества на нашу планету. Большинство из них исходят из того, что организмы, возможно, были заключены внутри астероидов или других космических обломков, оторвавшихся от крупных небесных тел из-за столкновений с метеорами. Материя неслась на них сквозь пространство, пока те не сталкивались с другими планетами, попав на которые организмы либо создавали новую жизнь, либо нет.

В 1950-е годы, когда Соединенные Штаты готовились к запуску космических ракет, биолога Джошуа Ледерберга встревожила возможность космического заражения. (Именно Джошуа Ледерберг придумал термин «микробиом» в 2001 году.) Люди теперь могли перенести земные организмы в другие части Солнечной системы. Но еще более тревожной была мысль о том, что астронавты могут принести на Землю инопланетное биовещество, способное нарушить экологию планеты или, что еще хуже, посеять хаос, вызвав неизвестные болезни. Ледерберг срочно написал в Академию наук, предупреждая о вероятности «космической катастрофы». К нему прислушались, и было выпущено беспокойное официальное заявление. Названия у науки, занимающейся изучением внеземной жизни, все еще не было. Ледерберг предложил термин «экзобиология». Он стал предтечей именованной области, сегодня известной как астробиология.

Ледерберг был гением. В Колумбийский университет он поступил в 15 лет, а когда ему было чуть за 20, сделал открытие, которое помогло изменить наше восприятие истории земной жизни. Он обнаружил, что бактерии могут обмениваться генами между собой: одна бактерия могла приобрести характерную черту другой бактерии «горизонтально», то есть не по наследству от «родителей» («вертикально»). Такой обмен вполне привычен для нас. Когда мы что-то узнаем или учим кого-то, мы вступаем в «горизонтальный» обмен информацией. Человеческая культура и нормы поведения передаются подобным образом. Но обмениваться генами так, как это делают бактерии, для нас — нечто из области фантастики. Хотя некогда, на за-

ре нашей эволюционной истории, такое время от времени происходило. Передача генов по горизонтали означает, что гены — и черты, которые в них закодированы, — сродни инфекции. Предположим, мы заметили некую ничейную черту на обочине, примерили ее на себя и обнаружили, что обзавелись ямочками на щеках. Или, возможно, встретили кого-нибудь на улице и обменялись волосами — вместо своих прямых получив курчавые. Или переняли у незнакомца цвет глаз. Или, проходя мимо волкодава, случайно прикоснулись к нему и вдруг почувствовали стремление мчаться вперед по несколько часов в день.

Открытие Ледерберга сделало его нобелевским лауреатом в 33 года. Прежде чем был обнаружен перенос генов по горизонтали, бактерии, как и все другие организмы, считались изолированными биологическими островами. Геномы были замкнутыми системами. Никаким образом нельзя было обзавестись новой ДНК посередине жизни, приобрести гены, которые развились в другом организме. Горизонтальный перенос генов меняет эту картину и демонстрирует, что геномы — космополиты, что они составлены из генов, которые развивались независимо миллионы лет. Горизонтальный перенос генов подразумевает, как уже демонстрировали лишайники, что ветви эволюционного древа, давно разошедшиеся в стороны, способны сойтись в пределах тела одного организма.

Для бактерий горизонтальный перенос генов — дело обычное. Большинство генов отдельно взятой бактерии имеют разные биографии, но приобретаются «поштучно», как вещи, которые постепенно накапливаются в доме. Таким образом бактерия может получить «готовые» характеристики, во много раз ускорив эволюционный процесс. Обменявшись ДНК, безобидная бактерия может приобрести сопротивляемость к антибиотикам и за один ход превратиться в вирулентную супербактерию. За последние несколько десятилетий стало понятно, что не одни бактерии обладают этой способностью, но они остаются наиболее опытными и искусными в этой области. Перенос генов по горизонтали происходит во всех сферах жизни.

Идеям Ледерберга придала определенную окраску паранойя холодной войны. В их свете панспермия предстала как горизонтальный перенос генов в космическом масштабе. В первый раз за свою историю человечество получило теоретическую возможность населить Землю и другие планеты организмами, эволюционировавшими за их пределами. Жизнь на Земле больше нельзя было рассматривать как генетически замкнутую систему, изолированный остров в море, которое нельзя преодолеть. Точно так же, как бактерии могли ускорить свою эволюцию, получив гены горизонтально, прибытие чужеродной ДНК на Землю могло бы «сократить и выпрямить» «извилистый» путь эволюции с потенциально катастрофическими последствиями.

Одна из главных задач *BIOMEX* — выяснить, могут ли формы жизни выжить в космосе. За пределами защитной оболочки земной атмосферы условия враждебны. Среди многочисленных опасностей — колоссальные уровни радиации Солнца и других звезд; вакуум, который иссушивает биологический материал, включая лишайники, почти мгновенно; и быстрые циклы замораживания, оттаивания и нагрева, сопровождающиеся резкими сменами температуры от -120 до $+120$ °C, и так по кругу в течение 24 часов.

Первая попытка отправить лишайники в космос окончилась плохо. В 2002 году беспилотный космический аппарат «Союз», везущий образцы, взорвался и рухнул на землю через секунды после взлета с космодрома. Месяцы спустя после аварии, когда стаял снег, остатки груза были обнаружены. «Любопытно, — докладывал ведущий исследователь, — контейнер “ЛИШАЙНИКИ. Эксперимент” был одним из немногих узнаваемых предметов, уцелевших во время аварии, и мы обнаружили, что, несмотря на условия, лишайники... все еще проявляли некоторую степень биологической активности».

С тех пор способность лишайников выживать в космосе была продемонстрирована в ряде исследований, и полученные результаты в общем были одинаковы. Самые выносливые виды лишайников могут полностью восстановить мета-

болизм за сутки после регидратации и способны залатать большую часть «причиненных космосом» ран. В действительности у самого стойкого вида *Circinaria gyrosa* такие высокие показатели выживаемости, что в трех недавних экспериментах было решено подвергнуть образцы еще более высоким уровням радиации, чем те, что могут ожидать их в космосе. Так ученые хотят проверить, каков предел их стойкости. Радиация и вправду могла убить лишайники, но необходимая для разрушения их клеток доза огромна. Образцы подвергли 6 килогреям гамма-излучения, что в 6 раз превосходит стандартную дозу для стерилизации пищевых продуктов в США и в 12 000 раз превышает смертельный для людей уровень, и на них это никак не отразилось. Когда доза была удвоена до 12 килогреев — в 2,5 раза выше смертельной для тихоходок дозы, — пострадала репродуктивность лишайников, хотя сами они выжили и продолжали фотосинтез без каких-либо видимых проблем.

Для Тревора Говарда, куратора коллекции лишайников в Университете Британской Колумбии, чрезвычайная выносливость лишайников — пример того, что он называет эффектом лишайникового прута. Лишайники стимулируют вспышки озарения, или, как говорит Говард, «сверхзаряженного понимания». Эффект лишайникового прута описывает то, что происходит, когда лишайники наносят удар по знакомым концепциям, раскалывая их. Симбиоз — одна из таких идей. Выживание в космосе — другая, как и угроза, которую лишайники представляют для биологических классификаций. «Лишайники рассказывают нам новое о жизни! — воскликнул Говард. — Они просвещают нас».

Во-первых — и превыше всего, — Говард одержим лишайниками (он добавил около 30 000 видов к коллекции университета), и, во-вторых, но не в меньшей степени, он классификатор лишайников (он назвал три рода и описал 36 новых видов).

Но в нем есть что-то от мистиков. «Мне нравится говорить, что лишайники колонизировали мой ум много лет назад», — сказал он мне с усмешкой. Он живет на краю большой пустоши в Британской Колумбии и ведет сайт с на-

званием «Способы олишайнивания» (*Ways of Enlichenment*). Говард считает, что глубокое погружение мыслями в мир лишайников изменяет понимание мира природы; они ставят нас перед новыми вопросами и приглашают дать ответ на них. Каковы наши взаимоотношения с миром? Что мы такое, для чего мы? Астробиология задает эти вопросы в космическом масштабе. Неудивительно, что лишайники находятся — если и не заслоняя все, то все же ярко заявляя о себе, — в центре внимания в дебатах о панспермии.

Однако ближе и понятней то, что лишайники и концепция симбиоза, которую они воплощают, поставили нас перед наиболее глубокими экзистенциальными задачками. За XX век концепция сотрудничества между царствами природы изменила научное понимание того, как в процессе эволюции возникали сложные формы жизни. Вопросы Говарда могут звучать театрально, но лишайники с их симбиотическим образом жизни подвели нас к пересмотру нашего отношения к окружающему миру.

Живое относят к трем доменам. Один — бактерии. Археи — одноклеточные микроорганизмы, напоминающие бактерии, но строящие клеточные мембраны иначе, — составляют другой. Эукариоты образуют третий. Мы — эукариоты, как и все многоклеточные организмы, будь то животные, растения, водоросли или грибы. Клетки эукариотов крупнее, чем у бактерий или архей, и организованы из ряда особых структур. Одна из них — ядро, содержащее большую часть ДНК. Митохондрии, или энергетические комплексы, — другая такая структура. У растений и водорослей есть еще хлоропласты, где происходит фотосинтез.

В 1967 году американский биолог Линн Маргулис, отличающаяся профессиональной проницательностью, стала активной сторонницей теории, которая отводила симбиозу центральную роль в эволюции жизни на ее ранних стадиях. Маргулис доказывала, что некоторые из самых значимых этапов эволюции произошли в результате плотного сосуществования разных организмов. Эукариоты возникли, когда одноклеточный организм поглотил бактерию, а та продолжала симбиотическую жизнь внутри его. Митохон-

дрии стали потомками этих бактерий. Хлоропласты были потомками фотосинтезирующих бактерий, поглощенных ранней эукариотической клеткой. Развившаяся впоследствии сложная жизнь, включая и человеческую, — долгая история «близости незнакомцев».

Идея о том, что эукариоты возникли в результате «слияния и поглощения», дрейфовала по биологической мысли, то появляясь, то исчезая, с начала XX века, оставаясь при этом на задворках «благовоспитанного биологического сообщества». К 1967 году мало что изменилось, и рукопись Маргулис возвращали 15 раз, прежде чем она была наконец опубликована. После публикации ее идеи столкнулись с сильной оппозицией, как и аналогичные теории прошлого. (В 1970 году канадский микробиолог Роджер Станиер ядовито заметил, что «эволюционную гипотезу Маргулис <...> можно рассматривать как относительно безобидную привычку, как поедание арахиса, если только она не превращается в одержимость; в таком случае она становится грехом». Тем не менее в 1970-х было доказано, что Маргулис права. Новые методы генетических исследований продемонстрировали, что митохондрии и хлоропласты начинали как независимые бактерии. С тех пор были обнаружены другие примеры эндосимбиоза. Клетки некоторых насекомых населены бактериями, внутри которых тоже живут бактерии.

Предположение Маргулис сводилось, по сути, к дуализму ранней жизни эукариотов. А потому неудивительно, что она мобилизовала лишайники на борьбу за ее дело — так же поступали первые сторонники сходной точки зрения на заре XX века. Первые эукариотические клетки можно рассматривать как «вполне аналогичные» лишайникам, так она утверждала. Лишайники все так же занимали важное место в ее работе в последующие десятилетия. «Лишайники — поразительные примеры инноваций, вытекающих из партнерства, — писала она позднее. — Эта связь куда значительнее, чем простая сумма составных частей».

Эндосимбиотическая теория, или теория симбиогенеза, как она стала известна позднее, переписала историю жиз-

ни. Это был один из самых драматических сдвигов в биологической картине мира XX века. Ботаник-эволюционист Ричард Докинз пошел дальше и поздравил Маргулис с тем, что она «не оставила теорию и прошла с ней до конца, [проделав путь] от “неприемлемой до общепринятой”». «Это одно из величайших достижений эволюционной биологии XX столетия, — продолжил Докинз, — и я восхищен мужеством Линн Маргулис, ее выдержкой».

Философ Даниэль Деннет отзывался о теории Маргулис как об «одной из самых прекрасных идей, которые он когда-либо встречал». Саму же Линн Маргулис он назвал «героем биологии XX столетия».

Среди самых значительных следствий теории эндосимбиоза является то, что целые наборы характеристик приобретаются в одно мгновение в готовом виде, сформировавшимися от организмов, которые не являются ни родителями, ни представителями того же вида, царства и даже домена. Ледерберг продемонстрировал, что бактерии способны получать гены по горизонтали. Теория эндосимбиоза предположила, что одноклеточные организмы по горизонтали получали целые бактерии. Передача генов по горизонтали трансформировала геномы бактерий в космополитные территории; эндосимбиоз преобразовывал клетки в космополитные территории. Предки всех существующих ныне эукариотов по горизонтали получили по бактерии с уже существующей, врожденной способностью превращать кислород в энергию. Подобным же образом предки существующих сегодня растений приобрели бактерии с развитой способностью к фотосинтезу.

Однако такая формулировка не совсем точна. Предки ныне живущих растений не получали по бактерии со способностью к фотосинтезу; они возникли в результате объединения организмов, использовавших фотосинтез, с организмами, не способными к нему. За 2 миллиарда лет совместной жизни каждый из партнеров становился все более зависимым от другого. А ныне мы наблюдаем, что существовать друг без друга они уже не могут. Внутри эукариотических клеток отдаленные ветви дерева жизни

переплетаются и сливаются в новую неразделимую генеалогическую линию, в новую родословную; они сливаются, или объединяются, в ходе анастомоза, как грибные гифы.

Лишайники не то чтобы повторяют процесс создания эукариотической клетки; они, как говорит Говард, «рифмуются» с ним. Лишайники — тела космополитные; это области, где встречаются представители живой природы. Сам по себе гриб не способен к фотосинтезу, но объединившись с водорослью или фотосинтезирующей бактерией, он может обзавестись этой способностью по горизонтали. Подобным же образом водоросли или фотосинтезирующие бактерии, не умеющие выращивать жесткие и прочные слои защитных тканей или переваривать камни, заключают союз с грибом и получают доступ к этим умениям — вдруг. Вместе эти таксономически очень далекие друг от друга организмы строят сложносоставные формы жизни, обладающие совершенно новыми возможностями. Но по сравнению с клетками растений, неотделимыми от хлоропластов, отношения лишайников с их партнерами открыты. Это делает их более гибкими.

Иногда лишайники размножаются, не разрывая существующих отношений: фрагменты лишайника, содержащие всех симбионтов, как единое целое транспортируются на новое место и вырастают там в новый лишайник. В других случаях лишайники производят споры, которые отправляются в путь одни. Прибыв на новое место, грибная спора должна встретиться с совместимым фикобионтом (водорослевым компонентом) и заново построить отношения.

В таком тесном союзе грибы стали немного фикобионтами, а фикобионты — немного микобионтами, то есть грибами. И все же лишайники не похожи ни на одного из них. Как водород и кислород, объединяясь, образуют воду — вещество, абсолютно непохожее ни на один из составляющих элементов, так и лишайники — совершенно новые явления, превосходящие по сути простую сумму составляющих. Как подчеркивает Говард, это настолько простая мысль, что ее очень сложно осознать. «Я часто повторяю, что единственные, кто *не в состоянии увидеть* лишайник, это лишеноло-

ги. Все потому, что они рассматривают их по частям, как их и учили. Беда в том, что если вы смотрите только на части, *самих лишайников вы не видите*».

Именно новые формы лишайников интересны с астро-биологической точки зрения. Как было сказано в одной научной работе, «трудно представить себе биологическую систему, которая бы лучше суммировала характеристики живого на Земле». Лишайники — маленькие биосферы, включающие в себя как фотосинтезирующие, так и нефотосинтезирующие организмы, таким образом объединяя главные метаболические процессы планеты. В некотором смысле лишайники — это микропланеты, целые миры, уменьшенные в размерах.

Но чем же занимаются лишайники, вращаясь на орбите вокруг Земли? Чтобы справиться с проблемой наблюдения за образцами в космосе, члены *BIOMEX* собрали самые выносливые лишайники вида *Circinaria gyrosa* с засушливых высокогорий в Центральной Испании и отправили их на тренажер, имитирующий марсианские условия. Поместив лишайники в условия, близкие к условиям открытого космоса, они надеялись в режиме реального времени измерить жизненную активность лишайников. Как выяснилось, измерять было особенно нечего. В течение часа после того, как был «включен» марсианский режим, лишайники почти прекратили фотосинтез. Они находились в спящем состоянии все оставшееся время в тренажере и возобновили нормальную жизнедеятельность после регидратации через 30 дней.

Хорошо известно, что способность лишайников выживать в экстремальных условиях связана с тем, что они впадают в «анабиоз». Исследователи обнаружили, что их можно успешно реанимировать после 10 лет пребывания в высушенном состоянии. Если их ткани полностью обезвожены, то замораживание, оттаивание и нагрев не причиняют им никакого особенного вреда. Высушивание также защищает их от наиболее опасного воздействия космических лучей — крайне вредных для структуры ДНК свободных радикалов. Они возникают в результате расщепления молекулы воды на две составляющие под воздействием излучения.

«Анабиоз» — наиболее важная стратегия выживания лишайников, но не единственная. Наиболее выносливые виды лишайников снабжены коровым слоем, который защищает их от вредных лучей. Кроме того, они способны вырабатывать более тысячи химических соединений, которые нельзя найти больше ни в одной форме земной жизни; некоторые соединения действуют как защитные экраны от солнечных лучей. Эти химические соединения — продукт инновационного метаболизма — породили разного рода взаимоотношения с людьми. Мы используем лишайники в медицине (антибиотики), парфюмерии (дубовый мох), как красители (твид, тартан, лакмусовый индикатор pH) и употребляем их в пищу — один из лишайников является основой смеси специй «гарам масала». Многие грибы, которые производят важные для людей соединения, включая пенициллиновые плесневые грибы, были лишайниками на более ранних этапах эволюционной истории, но затем бросили это дело. Некоторые ученые предполагают, что ряд таких соединений, включая пенициллин, могли служить защитой предкам-лишайникам и продолжают существовать по сей день как метаболическое наследие этих отношений.

Лишайники — экстремофилы, то есть способны выживать в совершенно иных, враждебных нам мирах. Их выносливость непостижима. Соберите образцы из вулканических источников, из сверхгорячих геотермальных ручьев, из-под километровой толщи антарктического льда, и вы обнаружите живых микробов, пребывающих там, по всей видимости, в полном здравии. Недавние находки ученых Обсерватории глубинного углерода (*Deep Carbon Observatory*) говорят о том, что больше половины всех бактерий и архей — инфраземлян, как иногда называют их, — живут на глубине нескольких километров и подвергаются колоссальному давлению и высочайшей температуре. Эти подземные миры так же разнообразны, как тропические леса Амазонки, и содержат миллиарды тонн микробов, что в сотни раз превышает суммарный вес живущих на планете людей. Некоторым видам тысячи лет.

Лишайники поражают не меньше. В действительности их способность выживать в разных экстремальных условиях позволяет классифицировать их как полиэкстремофилов. В самых жарких и засушливых пустынях мира вы найдете лишайники, процветающие в виде коросты на обожженной земле. Здесь лишайники играют важнейшую экологическую роль, стабилизируя песчаную поверхность пустыни, уменьшая силу и число песчаных бурь и предотвращая дальнейшее опустынивание земель. Некоторые лишайники растут в трещинах, или кавернах, твердых пород. Авторы одной научной работы сообщали о лишайниках, обнаруженных *внутри* кусков гранита, и признавались, что не имеют ни малейшего представления о том, как те могли туда попасть. Несколько видов лишайников достигли ошеломительного успеха в выживании в Сухих долинах Мак-Мердо (бесснежных просторах антарктических оазисов) — экосистеме с такими лютыми условиями, что ее используют для имитации условий на Марсе. Длительные периоды отрицательных температур, сильнейшее ультрафиолетовое облучение и почти полное отсутствие воды их, кажется, совершенно не тревожат. Даже после погружения в жидкий азот температурой $-195\text{ }^{\circ}\text{C}$ лишайники быстро оживают. Лишайник-рекордсмен живет в шведской провинции Лапланд уже более 9000 лет.

В мире экстремофилов, удивительном по определению, лишайники выделяются по двум причинам. Во-первых, это сложные многоклеточные организмы. Во-вторых, они возникли благодаря симбиозу. Большинство экстремофилов не создают ни таких мудреных форм, ни длительных устойчивых взаимоотношений. Именно это так привлекает астробиологов. Лишайник, аккуратный набор жизненных форм, движущийся в космосе, — целая экосистема, но и единое целое. Можно ли найти более подходящие для межпланетных путешествий организмы?

Хотя в ряде работ была продемонстрирована способность лишайников выживать в открытом космосе, для транспортировки между планетами им пришлось бы выдержать еще два испытания. Во-первых, катапультирова-

ние с планеты на метеорите. Во-вторых, повторное вхождение в атмосферу планеты. И то и другое сулит немалую опасность. Однако покидание планеты и связанный с этим шок вряд ли представляет непреодолимое препятствие для лишайников. В 2007 году исследователи показали, что лишайники способны выдержать ударные волны силой 10–50 гигапаскалей, что в 100–500 раз больше, чем давление на дне Марианской впадины, самого глубокого места на Земле. Это в пределах ударной нагрузки, испытываемой камнями, которые метеориты выбивают с поверхности Марса, задавая им вторую космическую скорость. Повторное вхождение в атмосферу планеты может оказаться более серьезной проблемой.

В 2007 году образцы бактерий и живущих на камнях лишайников были закреплены на теплозащитном щите спускаемого аппарата, который должен был снова войти в атмосферу. Объятая пламенем капсула летела сквозь атмосферу Земли, и образцы 30 секунд подвергались воздействию температур выше 2000 °С. Камни частично оплавившись и приняли новую форму. При анализе никаких абсолютно живых клеток найдено не было. Этот результат не сломил астробиологов. Некоторые утверждают, что формы жизни, заключенные внутри метеоритов, защищены от подобных экстремальных воздействий. Другие указывают на то, что большая часть того, что попадает на Землю из космоса, — это микрометеориты, космическая пыль. Эти мелкие частицы испытывают меньшее трение и подвергаются потому более низким температурам, проходя через атмосферу. Стало быть, у них больше шансов благополучно донести до поверхности Земли жизненные формы, чем у капсул космических ракет. Как бодро заявляют многие исследователи, вопрос остается открытым.

Никто не знает, когда лишайники появились. Самые ранние окаменелости относятся к эпохе, предшествующей рубежу в 400 миллионов лет назад, но вполне вероятно, что организмы, подобные лишайникам, существовали и раньше. С того момента лишайники как независимые организмы пережили от 9 до 12 трансформаций. Сегодня

один из пяти известных видов грибов образует лишайник. Некоторые грибы (например, пенициллиновые плесневые грибы) образовывали когда-то лишайниковые союзы, но после перестали; они больше не являются частью лишайникового партнерства. Другие грибы переключились на иные типы фотосинтезирующих партнеров, то есть снова вступили в «лишайниковые» отношения, в ходе эволюции. Для третьей группы грибов вступление в симбиотические отношения остается опцией; они могут жить как лишайники в зависимости от обстоятельств.

Как выясняется, грибы и водоросли сходятся при малейшей возможности. Попробуйте вырастить много типов самостоятельных грибов и водорослей вместе, и в течение нескольких дней они объединятся во взаимовыгодном симбиозе. Разные виды грибов, разные виды водорослей — это, кажется, неважно. Совершенно новые симбиотические отношения зарождаются быстрее, чем отходит струп. Эти замечательные изыскания, редкие наблюдения за рождением симбиотических отношений были опубликованы в 2014 году исследователями Гарвардского университета. Когда грибы выращивали вместе с водорослями, они образовывали единства, походящие на мягкие зеленые шары. Это были не те замысловатые формы, которые изображали Эрнст Геккель и Беатрис Поттер. Но, с другой стороны, они и не проводили в обществе друг друга миллионы лет.

Не всякий гриб может вступить в партнерство со всякой водорослью. Чтобы симбиоз состоялся, должно выполняться одно условие: каждый из симбионтов должен уметь делать то, на что не способен другой. «Личность» каждого из партнеров не так важна, как их экологическая совместимость. По словам теоретика эволюции У. Форда Дулитла, «песня, а не певец» оказалась важнее. Этот вывод проливает свет на способность лишайников выживать в экстремальных условиях. Как отмечает Говард, лишайники по своей природе — своего рода «брак под дулом пистолета», который заключается в условиях, слишком суровых для выживания любого из партнеров в одиночку. Когда бы лишайники ни возникли, само их существование подразу-

мевало, что жизнь вокруг была невыносимой для каждого из симбионтов и что только вместе они могли составить метаболическую «мелодию», которую в одиночку ни один из них не вытянул бы. Если подходить к вопросу с этого угла, экстремофилия лишайников, их способность жить на грани, так же стара, как сами лишайники, и является прямым следствием их симбиотического образа жизни.

Чтобы наблюдать экстремофилию лишайников в действии, совсем необязательно отправляться в Сухие долины или на Марс. Большая часть береговых линий прекрасно подойдет для этой цели. Именно на скалистом побережье Британской Колумбии, как мне показалось, цепкость и живучесть лишайников больше всего бросаются в глаза. В футе или около того над ракушками — там, куда не доходят самые высокие волны, — тянется черная полоса примерно в два фута шириной. Вблизи она напоминает потрескавшуюся смолу на стенке причала. Эта траурная лента опоясывает береговую линию, и она важна, когда мы отправляемся в плавание вокруг островов. Мы ориентируемся на нее, когда встаем на якорь, она помогает нам бороться с приливом, точно указывая, куда не достает вода. Это маркер суши.

Черный налет — это вид лишайника, хотя и не слишком похоже, что это живой организм. И конечно, он не разрастается в витиеватые структуры. Тем не менее на севере западного побережья Северной Америки этот вид, *Hydropunctaria maura* (с латинского — «полночь в брызгах воды»), — первый организм, обитающий там, куда не достают волны. Посмотрите на линию прилива в любой точке мира, и вы увидите нечто подобное. Большая часть скалистых побережий опоясана лишайниками. Там, где заканчиваются морские водоросли, начинаются лишайники, а некоторые из них спускаются и в воду. Когда посредине Тихого океана возникает вулканический остров, первое, что начинает развиваться на голых скалах, это лишайники, которые птицы или ветер заносят туда в виде спор или отдельных фрагментов. То же происходит, когда сходит ледник. Рост лишайников на только что открывшейся

поверхности камня — это вариация на тему панспермии. Эти голые поверхности — негостеприимные островки, мало приспособленные для развития большинства организмов. Пустынные, подставленные безжалостному солнцу, не защищенные от диких бурь и резких перепадов температур, они вполне могли бы быть другими планетами.

Лишайники — это области, где организм «расплетается», превращаясь в экосистему, и где экосистема «сворачивается» в организм. Они балансируют между «единым целым» и «набором составляющих». Если рассматривать их то с одной, то другой позиции, несложно быть сбитым с толку. Слово «индивид» происходит от латинского «неделимый». Так что же, индивид ли лишайник? Или индивидами считать микобионт и фикобионт? И правильно ли вообще задавать такой вопрос? Лишайники — это не столько сумма слагаемых, сколько продукт взаимодействия между ними. Лишайники — стабильные системы отношений; они не перестают разрастаться; они — не только существительное, но и глагол.

Один из тех, кому эти категории не дают покоя, — лихенолог из Монтаны Тони Сприбилл. В 2016 году Сприбилл с коллегами опубликовал статью в журнале *Science*, которая прямо-таки выбила почву из-под ног дуалистической гипотезы. Сприбилл описал нового грибного участника основных «династий» лишайников, остававшегося совершенно незамеченным, несмотря на полтора столетия пристального наблюдения. Он сделал открытие случайно. Приятель предложил ему измельчить лишайник и выделить ДНК всех участвующих в партнерстве организмов. Он предвидел, что результат будет ясным и ожидаемым. «Во всех учебниках ясно говорится, — сказал он мне, — что партнеров может быть только двое». Однако чем внимательней изучал Сприбилл образец, тем очевидней становилось, что это не так.

Каждый раз, когда он анализировал лишайник такого типа, он находил дополнительные организмы помимо ожидаемых гриба и водоросли. «Я долго разбирался с этими “примесными” организмами, — вспоминал он, — пока не убедился, что не существует лишайника без “примесей”,

и мы обнаружили, что все инфильтранты были на удивление постоянны. Чем глубже мы копали, тем прочнее утверждались во мнении, что это скорее правило, чем исключение».

Исследователи давно выдвинули гипотезу о том, что лишайники, возможно, привлекают дополнительных симбиотических партнеров. В конце концов, лишайники не содержат микробиомов. Они сами микробиомы, заполненные грибами и бактериями помимо двух всем известных игроков. И тем не менее до 2016 года ни одного нового устойчивого партнерства изучено и описано не было. Один из инфильтрантов, одноклеточный дрожжевой грибок, как обнаружил Сприбилл, оказался персонажем посерьезнее временного жильца. Его находят в лишайниках на шести континентах, и его вклад в жизнь этих организмов весьма существенен: он может придать им вид совершенно иного биологического вида. Дрожжевой грибок оказался важнейшим третьим симбионтом. Однако сногсшибательное открытие Сприбилла было только началом. Через два года он и его команда обнаружили, что летария волчья, один из наиболее изученных видов, включает еще один микобионт, *четвертого* грибного партнера. Индивидуальность лишайников раскололась на мелкие осколки. И все же, как сказал мне Сприбилл, это слишком упрощенное представление о лишайниках. «Ситуация неизмеримо более сложная, чем та, что описана в наших предыдущих публикациях. “Базовый набор” партнеров в каждой группе лишайников разный. У каких-то бактерий больше, у каких-то — меньше; у каких-то только один вид дрожжевого грибка, у других — два, а у третьих нет вообще. Что самое интересное, мы до сих пор еще не нашли ни одного лишайника, который бы подходил под традиционное определение партнерства одного гриба и одной водоросли».

Я спросил, чем, собственно, вновь обнаруженные грибные партнеры *занимаются* в лишайнике. «Мы точно не знаем, — ответил Сприбилл. — Каждый раз, как мы начинаем выяснять, кто что делает, мы совершенно запутываемся. Вместо того чтобы определить роли каждого симбионта, мы

натыкаемся на все новых. Чем глубже мы проникаем, тем больше новых участников находим».

Выводы Сприбилла беспокоят некоторых ученых, потому что заставляют предположить, что лишайниковый симбиоз вовсе не такой замкнутый, каким его долгое время считали. «Некоторым симбиоз представляется таким набором “сделай сам” из *IKEA*, — объясняет Сприбилл, — где у всякой детали своя функция и в котором есть инструкция по сборке». Вместо этого его находки предполагают, что образовать лишайник может широкий диапазон различных организмов. Главное, чтобы они «подходили друг другу, были совместимы». Речь идет не столько о «личностях», сколько о том, что они делают, о той метаболической «партии», которую каждый из них ведет. С этой точки зрения, лишайники — скорее динамические *системы*, нежели каталог взаимодействующих составляющих.

Получается картина, сильно отличающаяся от той, что рисовала гипотеза о двойственности лишайников. С тех пор как Швенденер изобразил гриб господином, а водоросль — рабыней, биологи спорят, какой из двух партнеров контролирует другого. Но теперь дуэт превратился в трио, трио — в квартет, да и тот уже больше походит на целый хор. Сприбилла не смущает то, что невозможно найти одно стабильное определение лишайника. Это обстоятельство, к которому, наслаждаясь его абсурдностью, часто возвращается Говард: «Как, существует целая дисциплина, которая не может определить, что конкретно в ее рамках изучают?» «Неважно, как вы их назовете, — пишет Хиллман о лишайниках. — Нечто столь радикальное и обыденное одновременно что-то да означает». Более 100 лет лишайники провоцировали нас и будут, вероятно, продолжать компрометировать наше понимание того, что представляют собой живые организмы.

Тем временем Сприбилл исследует новые многообещающие направления. «Лишайники до отказа набиты бактериями», — сказал он мне. В действительности лишайники содержат столько бактерий, что некоторые исследователи выдвигают теорию (и тут тема панспермии открывается

нам с новой стороны) о том, что лишайники — по сути резервуар для микроорганизмов и что они засевают пустующие площади необходимыми штаммами бактерий. Внутри лишайников некоторые бактерии обеспечивают защиту; другие вырабатывают витамины и гормоны. Сприбилл подозревает, что у них есть и другие функции. «Я думаю, некоторые из этих бактерий необходимы, чтобы связать лишайниковую систему воедино, чтобы они стали чем-то большим, чем сгусток в лабораторной чашке».

Сприбилл рассказал мне о работе под названием «Квир-теория лишайников» (*Queer theory for lichens*). (Это первое, что всплывает на мониторе, когда вы вводите в *Google* слова *queer* («странный, гомосексуальный») и *lichen* («лишайник»). Ее автор утверждает, что лишайники — необычные существа, которые подталкивают нас к образу мыслей, выходящему за жесткие рамки бинарной системы: «идентичность» лишайников — это вопрос, на который не может быть заранее заготовленного верного ответа. Сприбилл, в свою очередь, находит «квир-теорию» полезной схемой, приложимой к лишайникам. «Наше бинарное мышление мешает задавать вопросы, не укладывающиеся в бинарную систему, — объясняет он. — Табу из области половых отношений мешают нам задавать вопросы о половых отношениях. Мы исходим из нашего культурного контекста, поэтому нам чрезвычайно трудно осознать сложные симбиозы, подобные лишайникам: мы воспринимаем себя как автономных индивидов, и нам сложно соотносить себя с ними».

Сприбилл описывает лишайники как самый «открытый для общения» симбиоз. Невозможно воспринимать какой-либо организм, включая человеческий, в отдельности от сообществ микроорганизмов, которые обитают внутри его. Биологическая идентичность большинства организмов не может быть отделена от жизни симбионтов-микробов. Слово «экология» происходит из греческого языка — от *οἶκος* («дом, семья»). Наши тела, как и тела других организмов, это места обитания. Жизнь — это вложенные друг в друга биомы, до самого низа.

Нас нельзя описать только анатомически, потому что мы делим наши тела с микробами: в нас больше микробных клеток, чем наших «собственных». Коровы, к примеру, траву есть не могут, а их микробное население может, и коровьи тела в процессе эволюции стали кровом для микроорганизмов, поддерживающих их существование. Нельзя нас также определить только с позиции развития, то есть как организм, начавший быть в момент оплодотворения яйцеклетки, потому что, как и все млекопитающие, мы зависим от наших симбионтов, управляющих отдельными циклами наших программ развития. И генетически нас тоже невозможно классифицировать как организмы, состоящие из клеток с идентичным геномом: многие из микробов-симбионтов унаследованы нами от матерей вместе с нашими «собственными» ДНК. В некоторый момент нашей эволюционной истории микробы пробрались в клетки своих хозяев и поселились там навсегда: наши митохондрии несут собственный геном, как и хлоропласты растений; по крайней мере 8 % человеческого генома унаследовано от вирусов (мы даже можем обмениваться клетками с другими людьми, превращаемся в «химер»: мать и плод обмениваются в утробе генетическим материалом). Наша иммунная система также не может быть использована для оценки нашей индивидуальности, хотя считается, что иммунные клетки отвечают за нас на этот вопрос, отличая своих от чужих. Иммунная система в равной степени озабочена регулированием наших взаимоотношений с проживающими в нас микробами и борьбой с внешними захватчиками и, кажется, настроена позволять микробам колонизировать наш организм, а не предотвращать такую колонизацию. И к чему это нас приводит? Или, вернее, всех вас?

Некоторые исследователи используют термин «холобионт». Он описывает «коллектив» организмов, которые ведут себя как единое целое. Это слово происходит от греческого *όλος* («целый, единый»). Холобионты — лишайники этого мира, и они тоже есть больше простой суммы их частей. Подобно словам «симбиоз» и «экология», слово «холобионт» выполняет полезную работу. Если у нас есть

слова, обозначающие тесно связанных автономных индивидуумов, нам проще представить себе, что они действительно существуют.

Холобионт — не утопия. Сотрудничество всегда подразумевает соперничество и взаимодействие. Существует множество примеров, когда интересы не всех симбионтов совпадают. Некий вид бактерий в нашем кишечнике может быть главным игроком пищеварительного процесса, но если эти бактерии попадут в кровь, может возникнуть смертельное заболевание. Мы привыкли к этой мысли. Семья может функционировать как ячейка общества, гастроллирующая джаз-группа может устроить захватывающий концерт, и в то же время отношения и тех и других могут быть сдобрены трениями и конфликтами.

В конце концов, нам не так уж и сложно соотнести себя с лишайниками. Эта разновидность отношений воплощает самую старую эволюционную максиму. Если слово «киборг» (сокращение от «кибернетический организм») описывает существ, сочетающих облик и функции людей и машин, то мы, как и все жизненные формы, являемся «симборгами», или симбиотическими организмами. Авторы основополагающей работы о симбиотическом взгляде на жизнь ясно выражают свою позицию по этому вопросу. «Индивидуумов никогда не существовало, — заявляют они. — Мы все лишайники».

Мы шли вниз по течению на «Капере» и проводили много времени, разглядывая морские карты. На них море и суша поменялись ролями. Массивы земли изображены большими пустыми пятнами бежевого цвета. Пространство воды испещрено указателями и контурами, собирающимися морщинами вокруг скал. Безликие хлопья земли покрыты шнуровкой разветвляющихся, соединяющихся фарватеров. Движение океана по сети фарватеров и морских путей непредсказуемо. По некоторым из них можно пройти на судне только в определенное время дня. Когда приливная волна мчится к суше по одному узкому опасному каналу, она может вырасти на полтора метра над сушей — неподвижная водяная стена, которая и не думает опадать. В од-

ном особенно коварном проходе между двумя островами образуются приливные водовороты диаметром 15 метров, затягивающие вглубь плавающие на поверхности бревна.

По краям многих из этих проливов стоят скалы. Гранитные утесы обрушиваются в море. Деревья наклоняются, падая как в замедленной съемке. Вдоль берега деревья, мох и лишайники смывают приливы, обнажая валуны и уступы, на многих из которых видны оставленные ледником отметины. Сложно забыть, что большую часть суши составляет сплошной, медленно разрушающийся камень. Неровные выступы сначала плавно спускаются и вдруг круто обрываются к воде. Мы с братом часто спим на этих уступах ночью. Лишайники повсюду, и когда я просыпаюсь, нахожу их и на своем лице. Много дней потом я вытряхиваю из карманов брюк кусочки лишайника. Я выворачиваю карманы и, чувствуя себя человеком-метеоритом, пытаюсь представить, сколько лишайников приживется в неожиданных для себя местах, где оказались.

ГЛАВА ЧЕТВЕРТАЯ

МИЦЕЛИЕВОЕ СОЗНАНИЕ

За пределами нашего есть иной мир. <...> Этот мир разговаривает. У него свой язык. Я передаю то, что он говорит. Священный гриб берет меня за руку и вводит туда, где известно все. <...> Я задаю вопросы, и мне отвечают.

— МАРИЯ САБИНА

По пятибалльной шкале, где 1 — «совсем нет», а 5 — «чрезвычайно», как бы вы оценили чувство утраты идентичности? Как бы вы оценили ощущение чистого бытия? Как бы вы оценили ощущение слияния с огромным целым?

Я лежал на койке в отделении по тестированию лекарственных препаратов в конце моего ЛСД-трипа и ломал голову над этими вопросами. Стены палаты, казалось, незаметно дышали, и мне было трудно сосредоточиться на словах на экране. Где-то в районе желудка раздавалось тихое бормотание, а за окном раскачивались зеленые, яркие и живые, ивы.

ЛСД, подобно натуральному псилоцибину, активному ингредиенту многих видов псилоцибиновых грибов, классифицируется и как психоделик, и как галлюциноген. Это химическое вещество ослабляет рамки повседневных представлений, проникает в сознание, затрагивает личность, вызывая широкий диапазон реакций, от слуховых и зрительных галлюцинаций до сильнейших сдвигов в когнитивном и эмоциональном восприятии окружающего, растворения пространства и времени. Многие сообщают о мистических

ощущениях, или об общении с божествами, или о чувстве единения с природой и потере границ своего Я.

Психометрический опросник, который я мучительно пытался заполнить, был составлен для оценки впечатлений и опыта подобного рода. Но чем больше я старался впихнуть мои ощущения в пятибалльную шкалу, тем больше запутывался. Как можно измерить ощущение полного отсутствия времени? Как можно измерить чувство слияния с предельной, высшей реальностью? Это категории качества, не количества. Но наука имеет дело с количественными показателями.

Я повертелся, сделал несколько глубоких вдохов и выдохов и попробовал подойти к вопросам с другой стороны. *Как вы оцениваете ощущение изумления?* Казалось, что кровать мягко покачивалась, и стайка мыслей быстро заметалась по моему мозгу, как испуганные рыбешки. *Как вы оцениваете ощущение бесконечности?* Я чувствовал, как от напряжения из-за кажущегося невыполнимым задание стонет научная методология. *Как вы измерите потерю привычного чувства времени?* Я не выдержал и безудержно рассмеялся — обычная реакция на ЛСД, как меня предупреждали во время подготовки к эксперименту, описывая возможные осложнения. *Как вы оцените потерю привычного ощущения пространства?* Приступ неконтролируемого смеха прекратился, и я взглянул на потолок. Если уж на то пошло, как я здесь *очутился?* Некий гриб создал в процессе своего развития некое химическое вещество, которое было использовано для изготовления некоего препарата. Совершенно случайно обнаружили, что этот препарат изменяет человеческие ощущения. В течение семи десятилетий или около того специфическое воздействие ЛСД на наши умы вызывало удивление, озадаченность, проповеднический пыл, панику среди моралистов и прочее. Проходя через фильтр XX столетия, псилоцибин оставил неизгладимый культурный осадок, с которым мы все еще пытаемся разобраться. Я лежал в больничной палате, что было частью клинических испытаний, потому что воздействие ЛСД по-прежнему столь же ошеломляюще, что и в прошлом.

Неудивительно, что я был озадачен. ЛСД и псилоцибин — это так или иначе продукты гриба, которые оказались сложным образом переплетены с человеческой жизнью именно потому, что опровергают и запутывают наши установки, в том числе и самую фундаментальную — представление о собственном Я. Именно способность заводить сознание в неожиданные места стала причиной того, что действие «магических грибов», вырабатывающих псилоцибин, с древних времен вплеталось в ритуалы и духовные учения. Именно их способность ослаблять привычные жесткие рамки превращает это вещество в сильнодействующие лекарства, способные ослабить пагубные привычки, наркотическую зависимость, не излечимую иным способом депрессию или состояние хронической тревожности, которые могут последовать, если у кого-то диагностировано смертельное заболевание*. И именно их способность модифицировать наше внутреннее ощущение изменило понимание их природы в научном контексте. Однако почему конкретные виды грибов развили в себе эти способности, остается загадкой.

Я потерял глаза, перевернулся и набрался храбрости, чтобы снова взглянуть на слова в анкете. *Оцените чувство того, что ощущение нельзя адекватно описать словами.*

Наиболее многочисленными и изобретательными манипуляторами поведением животных является группа грибов, которые селятся в телах насекомых. Они способны изменить поведение своих хозяев с максимальной выгодой для себя: захватывая насекомое, гриб получает возможность рассеять споры и завершить жизненный цикл. Одним из наиболее изученных является кордицепс однобокий, *Ophiocordyceps unilateralis*, устраивающий свою жизнь за счет муравьев-древоточцев. Будучи зараженными грибом, муравьи теряют боязнь высоты, покидают относительно безопасные муравейники и забираются на ближайшее высокое растение. В нужный момент гриб вынуждает муравья сом-

* Исследования ведутся в основном за рубежом, в частности в США. Тема широко освещается и в СМИ, и в профессиональных медицинских журналах, например здесь: <https://ascpt.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1002/cpt.557>; <https://www.nature.com/articles/s41429-020-0311-8>. — Прим. изд.

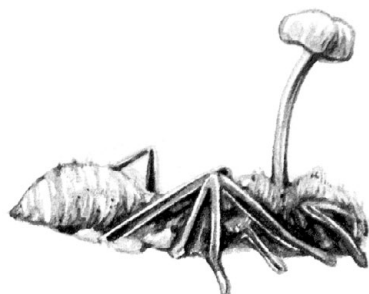
кнуть челюсти на растении смертельной хваткой. Мицелий прорастает сквозь ножки муравья и «пришивает» их к поверхности растения. Затем гриб переваривает тело муравья и выпускает «стебель» — строму с плодовым телом — из его головы. С верхушки этого отростка на муравьев, проползающих внизу, обрушивается поток спор. Если спора не попадает в цель, она производит дополнительные липкие споры, вытягивающиеся на стебельках наружу и действующие как растяжки на войне.

Грибы-манипуляторы контролируют поведение своих жертв-насекомых с поразительной точностью. Кордицепс заставляет муравьев совершить смертельный захват в зоне с именно такими температурой и влажностью, которые позволят грибу произвести потомство: на высоте 25 сантиметров над лесной подстилкой. Гриб ориентирует муравьев по солнцу, и зараженные насекомые вцепляются в растение в полдень — синхронно. Они не кусают любое место на изнанке листа. В 98 случаях из 100 муравьи смыкают челюсти на главной прожилке.

Исследователи уже давно пытаются понять, каким образом грибы контролируют умы своих жертв. В 2017 году исследовательская группа, возглавляемая Дэвидом Хьюзом, ведущим экспертом по грибам-манипуляторам, заразила лабораторных муравьев кордицепсом. Ученые законсервировали тела муравьев в момент смертельного укуса, сделали несколько тонких замороженных срезов и реконструировали трехмерную модель гриба, живущего внутри их тканей. Они обнаружили, что гриб дестабилизирует тело насекомого, обретая роль самостоятельного чужеродного органа. Гриб составляет до 40 % биомассы зараженного муравья. Гифы, извиваясь, проходят через все полости тела, от головы до конечностей, покрывают сеткой мышечные волокна и координируют их действия посредством взаимосвязанной мицелиевой сети. Но в мозге муравья гриб демонстративно отсутствует. Хьюз и его команда не были к этому готовы. Они ожидали, что гриб непременно обнаружится там, чтобы осуществлять точный контроль над поведением муравьев.

Вместо этого гриб, кажется, использует фармакологические методы воздействия. Исследователи подозревают, что он, как кукловод, управляет движениями муравьев, выделяя химические вещества, которые воздействуют на их мышцы и центральную нервную систему, даже если физически гриб в мозге отсутствует. Неизвестно, о каких именно химических веществах идет речь. Неизвестно также, способен ли гриб отключать муравьиный мозг от остального тела и непосредственно координировать мышечные сокращения. Тем не менее кордицепс — близкий родственник гриба спорыньи, из которого швейцарский химик Альберт Хофман выделил особые соединения и использовал их для создания ЛСД. Кордицепс, стало быть, может производить так называемые алкалоиды спорыньи; к этой группе относятся и ЛСД. Внутри муравьев части генома кордицепса, отвечающие за производство алкалоидов, активируются, и это позволяет предположить, что они играют какую-то роль в управлении поведением муравьев.

Как бы они этого ни добивались, но, с точки зрения человека, искусность грибов при вторжении в чужой организм поразительна. После десятилетий исследований и миллиардов долларов, вложенных в них, способность манипулировать человеческим поведением при помощи лекарственных препаратов можно описать как угодно, но только не словосочетанием «тонко настроенная». Нейролептические препараты, например, не могут спровоцировать конкретного поведения, они просто успокаивают. Сравните это с 98 % успеха кордицепса (*Ophiocordyceps*): он заставляет муравья не просто забраться наверх и впиться в растение — это всегда происходит, — но и вцепиться челюстями в конкретную часть листа с оптимальными условиями для размножения гриба. Справедливости ради нужно сказать, что у кордицепса, как и у многих грибов такого рода, было много времени, чтобы отточить навыки. Действия зараженных муравьев не проходят бесследно. Мертвая хватка муравьиных челюстей оставляет отчетливые шрамы на жилках листьев, а следы на окаменелостях отодвигают истоки этого поведения в эоцен, на 40 милли-



Строма кордицепса (*Ophiocordyceps*),
прорастающая из муравья

оных лет назад. Вполне возможно, грибы манипулируют сознанием животных большую часть времени — с того момента, как появилось сознание, которым можно управлять.

Мне было семь, когда я обнаружил, что можно изменить сознание, поедая другие организмы. Мои родители отвезли меня с братом на Гавайи пожить у их друга, эксцентричного автора, философа и этноботаника Теренса Маккенны. Растения и грибы, влияющие на сознание, были его страстью. В Мумбаи он занимался контрабандой гашиша, в Индонезии коллекционировал бабочек, а в Северной Калифорнии выращивал псилоцибиновые грибы. На Гавайях он жил в некоем диковинном убежище под названием «Ботанические измерения». Оно стояло на склоне вулкана Мауна-Лоа, в двух километрах от подножия — вверх по ухабистой дороге. На своей земле на Гавайях он устроил лесной сад — собрание психотропных и лекарственных растений, редких и не очень, добытых в различных уголках тропического мира. Чтобы добраться до уборной, нужно было пройти по извивающейся лесной тропинке, нагибаясь под лианами и листьями, с которых скатывались капли воды. В нескольких километрах вниз по дороге потоки лавы стекали в море, заставляя его кипеть и пениться.

Псилоцибиновые грибы вызывали у Маккенны больше всего энтузиазма. Впервые он их попробовал, путешествуя по колумбийской Амазонии с братом Деннисом в начале

1970-х. В последующие годы, разжигаемый регулярными «героическими» дозами грибов, Маккенна обнаружил в себе редкий дар — хорошо подвешенный язык и талант к публичным выступлениям. «Я понял, что моя врожденная ирландская способность восторженно и с энтузиазмом вещать на публику была усилена годами употребления псилоцибиновых грибов, — вспоминал он. — Я мог говорить с, казалось, электризующим эффектом перед небольшими группами людей... необычно о сверхъестественных материях». Бардовские размышления Маккенны — красноречивые и расхожие — по-прежнему превозносят и осуждают примерно в равной мере.

Проведя несколько дней в «Ботанических измерениях», я свалился с лихорадкой. Помню, как лежал под москитной сеткой, наблюдая, как Маккенна в большой ступке пестиком измельчает какой-то препарат. Я предположил, что он готовит мне лекарство, и спросил, что он делает. Звонким голосом, забавно растягивая слова, он объяснил, что и не думал готовить мне лекарство. Это растение, как и некоторые виды грибов, может вызывать видения. Если повезет, эти организмы даже заговорят с нами. Это сильнодействующие лекарства, давным-давно используемые людьми. Но они также могут быть пугающими. Он улыбнулся своей ленивой томной улыбкой. «Когда ты будешь постарше, — сказал он, — ты сможешь попробовать немного этого препарата». Это был изменяющий сознание «кузен» шалфея — *Salvia divinorum* (шалфей предсказателей). Я застыл, пораженный.

В животном мире существует много примеров интоксикации: птицы клюют опьяняющие ягоды, лемуры лизжут тысяченожек, мотыльки пьют нектар психотропных цветов. Вполне вероятно, что и мы начали использовать изменяющие сознание наркотические вещества задолго до того, как стали людьми. Воздействие этих субстанций «часто необъяснимо и в действительности странно и пугающе», как писал Ричард Эванс Шультеc, профессор биологии в Гарварде и ведущий специалист по психотропным растениям и грибам. «Несомненно, [эти соединения] известны уже давно и используются человеком со времен первых

экспериментов с местной растительностью, — продолжает он. — Многие обладают странным, таинственным и запутывающим, сбивающим с толку воздействием и, подобно псилоцибиновым грибам, тесно связаны с культурными традициями и духовными обрядами».

Ряд грибов обладают свойствами, изменяющими сознание. Классический пример — красный с белыми пятнами на шляпке мухомор, *Amanita muscaria*, который едят шаманы в некоторых частях Сибири. Он вызывает душевный подъем и видения, похожие на галлюцинации. Спорынья провоцирует целый устрашающий набор реакций, от галлюцинаций до конвульсий, и ощущение невыносимого жжения. Непроизвольные мышечные судороги — один из основных симптомов эрготизма, или отравления алкалоидами спорыньи, а способность эргоалкалоидов вызывать мышечные сокращения у людей вторит их роли в поведении муравьев, зараженных кордицепсом. Считается, что Иеронима Босха, художника нидерландского Возрождения, на изображение некоторых ужасных мучений вдохновили симптомы отравления спорыньей; существует также гипотеза, что причиной многочисленных вспышек хореи, или танцевальной мании, между XIV и XVII столетием, когда сотни горожан пускались в пляс и много дней «танцевали» без остановки, были конвульсии, спровоцированные эрготизмом.

Лучше всего задокументировано использование псилоцибиновых грибов в Мексике, притом документы охватывают наиболее длительный период. Доминиканский монах Диего Дуран сообщал, что влияющие на сознание грибы, известные как «плоть богов», подавались на коронации императора ацтеков в 1486 году. Франсиско Эрнандес, врач короля Испании, описывал грибы, которые, «будучи съеденными, вызывают не смерть, но безумие, временами продолжительное, симптомом которого становится своего рода неконтролируемый смех. <...> Существуют и другие [грибы], благодаря которым, хотя они и не вызывают приступов смеха, перед глазами возникают всевозможные видения, такие как войны и нечто, напоминающее демонов». Францисканский монах Бернардино де Саагун (1499–1590)

оставил одно из самых ярких описаний употребления грибов: «Они ели эти грибки с медом, и когда наступило вызванное ими возбуждение, они пустились танцевать, кто-то с песнями, другие с рыданиями... Третьи не желали петь, но садились в своих жилищах и оставались там, словно предаваясь размышлениям. Некоторым были видения, в которых они умирали, и они плакали; другим виделось, что их пожирает дикий зверь... Когда опьянение от грибов прошло, они заговорили между собой, рассказывая друг другу о своих видениях».

Самые ранние свидетельства употребления грибов в Центральной Америке, подлинность которых не вызывает сомнений, относятся к XV веку, но употреблять псилоцибиновые грибы почти наверняка начали раньше. Были найдены сотни статуй в форме грибов, относящихся ко II тысячелетию до н. э., а в рукописных памятниках эпохи, предшествовавшей испанскому завоеванию, изображаются украшенные перьями божества, поедающие грибы и поднимающие их вверх.

С точки зрения Маккенны, потребление человечеством псилоцибиновых грибов — еще более древнее явление, лежащее в основе его биологической, культурной и духовной эволюции. Указания на религиозную деятельность, сложную социальную организацию, ведение торговли и самые ранние формы изобразительного искусства появляются в относительно короткий период человеческой истории, около 50–70 тысяч лет назад. Неизвестно, что послужило толчком к этим эволюционным изменениям. Некоторые ученые приписывают их возникновению сложных языковых форм. Другие выдвигают гипотезу о генетических мутациях, из-за которых изменилось строение мозга. Для Маккенны искрой, разжегшей первые мерцающие вспышки самосознания, языкового самовыражения и духовности где-то в протокультурном тумане палеолита, были псилоцибиновые грибы. Грибы были первым Древом познания.

Наскальные рисунки в пещерах, сохранные сухим жаром пустыни Сахара в Южном Алжире, обеспечили Маккенну весьма впечатляющим свидетельством употре-

бления грибов в пищу в древности. Среди рисунков, сохранившихся на камне на плато Тассилин-Аджер и относящихся к периоду между 9000 и 7000 годом до н. э., есть изображение божества со звериной головой, из рук и плеч которого расходятся похожие на грибы формы. Пока наши предки бродили по «усыпанным грибами саваннам тропической и субтропической Африки», выдвинул предположение Маккенна, «им попадались содержащие псилоцибин грибы, которые они съедали и, обожествляя, поклонялись им. Во мраке сознания гоминидов зародились речь, поэзия, ритуалы и мышление».

Эта его теория получила неформальное название «теория пьяной обезьяны», и у нее есть много вариантов, но, как и все прочие теории происхождения, ее очень трудно доказать или опровергнуть. Где бы псилоцибиновые грибы ни потребляли в пищу, вокруг них расцветают пышным цветом всевозможные предположения и гипотезы. Сохранившиеся тексты отрывочны и всегда неоднозначны. Показывает ли рисунок с Тассилин-Аджера грибное божество? Возможно. Но может, и нет. Доказательства в виде зубного налета неандертальца, тела Этци и прочих хорошо сохранившихся останков указывают, что люди употребляли грибы в пищу и как лекарство тысячи лет назад. Тем не менее ученым не удалось обнаружить внутри наших предков никаких следов псилоцибиновых грибов. Известно, что некоторые приматы отыскивают и поедают грибы; эпизодически появляются сообщения об употреблении ими псилоцибиновых грибов, но эти примеры недостаточно хорошо описаны. Некоторые исследователи подозревают, что древнее население Евразии использовало псилоцибиновые грибы в религиозных церемониях, наиболее известными из которых являются Элевсинские мистерии, древнегреческие тайные обряды, которые, как предполагают, посещали уважаемые люди, например Платон. Однако достоверных источников так и нет. И все же отсутствие источников не доказывает отсутствия феномена. И это неизбежно приводит к домыслам и предположениям. Маккенна, заряженный псилоцибином, в этом был истинным мастером.



Псилоцибе кубинская
(*Psilocybe cubensis*)

Кордицепс однобокий послужил вдохновением для создания по крайней мере двух выдуманных монстров: каннибалов в видеоигре *The Last of Us* («Последние из нас») и зомби в книге «Девушка со всеми талантами» (*The Girl with All the Gifts*). Это странно, но это реальный особый случай — побочная ветвь эволюции. И все же кордицепс — это лишь один хорошо изученный пример. Подобного рода манипуляции по отношению к другим организмам — не исключение. Они встречаются в царстве грибов многократно в разных семействах и генеалогических линиях, совершенно не связанных родством. Кроме того, существуют многочисленные паразиты, помимо грибов, способные управлять умами и сознанием своих жертв.

Грибы используют разные методы, чтобы подправить биохимические часы, регулирующие поведение их жертв. Некоторые используют иммуноподавляющие вещества, чтобы погасить защитные реакции насекомых. Два таких «грибных» соединения попали в традиционную медицину именно благодаря своим свойствам. Циклоспорин — иммуноподавляющий препарат, дающий возможность проводить пересадку органов. Мириоцин превратился в финголимод — лидер продаж среди лекарственных препаратов от

рассеянного склероза. Изначально мириоцин был экстрагирован из зараженных грибом ос, которых едят в некоторых регионах Китая как тайное средство для сохранения вечной молодости.

В 2018 году ученые Калифорнийского университета в Беркли опубликовали работу, где описали поразительную методику гриба энтомофтора (*Entomophthora*), паразита мух, изменяющего сознание этих насекомых. Здесь прослеживаются параллели с кордицепсом. Зараженные мухи забираются высоко вверх. Когда они вытягивают хоботки, чтобы поест, клейкое вещество, вырабатываемое грибом, приклеивает их к любой поверхности, которой они касаются. Переварив тело мухи — сначала то, что пожирнее, а после жизненно важные органы, — грибок выпускает строму, проталкивает ее сквозь спинку мухи и выбрасывает споры в воздух.

Исследователи, к своему удивлению, обнаружили, что гриб энтомофтора переносит в себе разновидность вируса, который заражает насекомых, но не грибы. Руководитель исследования и автор статьи назвал это «одним из самых убийственных открытий» своего времени в науке. Убийственным здесь является напрашивающийся вывод о том, что гриб использует вирус, чтобы воздействовать на сознание насекомых. Это все еще гипотеза, но очень убедительная. Один такой вирус вводят божьим коровкам осы, паразитирующие на них. Божьи коровки дрожат и замирают на месте как вкопанные, становясь таким образом опекунами осиной кладки яиц. Другой аналогичный вирус делает медоносных пчел более агрессивными. Обуздав и приручив вирус, воздействующий на сознание, гриб уже не нуждается в способности манипулировать своими жертвами-насекомыми.

Еще более удивительный поворот в истории зомбирующих грибов описал Мэтт Кэссон и его команда из Университета Западной Виргинии. Он изучает гриб массоспора (*Massospora*), паразитирующий на цикадах и вызывающий полное разложение задней трети их тел, что позволяет грибу выстреливать спорами из тыла цикад. Зараженные мужские особи — «летающие солонки смерти», если цитировать Кэссона, — становятся гиперактивными и отчаянно привлекают

самок, несмотря на отсутствие гениталий, что свидетельствует о том, как профессионально действует гриб. Однако центральная нервная система цикад остается невредимой.

В 2018 году Кэссон и его команда провели химический анализ «пробок», которые гриб выращивает в покалеченных телах цикад. Они были поражены, обнаружив, что гриб вырабатывает катинон, амфетамин того же класса, что и мефедрон, легкий наркотик. В природе катинон встречается в листьях каты (*Catha edulis*), растения, выращиваемого в Африке на мысе Горн и на Ближнем Востоке именно ради его листьев. Их люди жуют уже много веков ради их стимулирующего действия. Нигде, кроме растений, катинон раньше не замечали. Еще удивительнее было присутствие в «пробках» псилоцибина, который доминировал среди всех обнаруженных соединений. Хотя чтобы испытать самое слабое его действие, пришлось бы съесть несколько сотен зараженных грибом цикад. Это удивительно, потому что массоспора относится к совершенно другому отделу грибного царства, она не родственна грибам, которые, как нам известно, производят псилоцибин; их разделяют сотни миллионов лет эволюции. Мало кто мог предположить, что псилоцибин проявится на такой дальней ветви грибного эволюционного древа и станет главным манипулятором в совершенно иной истории.

Чего конкретно сможет добиться массоспора, накачивая свои жертвы психоделиком и амфетамином? Исследователи предполагают, что эти наркотики участвуют в манипуляции насекомыми. Но как именно — неизвестно.

Описания ощущений от приема психоделиков зачастую пестрят упоминаниями гибридных существ, стоящих на перекрестье видов. Мифы и сказки также строятся на необычном поведении неизвестных науке животных — от оборотней и кентавров до сфинксов и химер. «Метаморфозы» Овидия — каталог трансформаций одного существа в другое; упоминается там и земля, где люди вырастали из омытого дождем гриба*. Во многих традиционных культу-

* «Древних людей при начале веков тут явилось / Смертное племя, — его дождевые грибы породили» (пер. с лат. С. В. Шервинского). — Прим. изд.

рах считается, что составленные из разных видов создания действительно существуют и что границы между организмами подвижны и гибки.

Антрополог Эдуарду Вивейруш де Кастру сообщает, что шаманы коренных общин Амазонии верят, что могут временно поселиться в сознании и теле другого животного или растения. Юкагиры, населяющие Северо-Восточную Сибирь, как пишет антрополог Рейн Виллерслев, одеваются и ведут себя как лоси, когда охотятся на лосей.

Эти описания, кажется, выходят за рамки биологически возможного и редко воспринимаются серьезно в современных научных кругах. И все же изучение симбиоза проливает свет на тот факт, что жизнь во многих случаях представлена гибридными формами, такими как лишайники, составленные из нескольких различных организмов. И действительно, в какой-то степени все растения, грибы и животные, включая нас, существа составные. Клетки-эукариоты — тоже гибриды, и свои тела мы делим со множеством микроорганизмов, без которых не могли бы расти, совершать поступки и производить потомство — все то, что мы делаем сейчас. Возможно, многие из этих полезных для нас микроорганизмов заимствуют техники манипуляции у таких паразитов, как кордицепс однобокий. Все больше исследований связывают поведение животных с триллионами бактерий и грибов, живущих в кишечнике и вырабатывающих химические вещества, влияющие на нервную систему. Взаимодействие кишечных микробов и мозга, так называемая ось кишечник — мозг, имеет столько следствий, что родилась новая научная область — нейромикробиология. И все же манипулирующие сознанием грибы остаются самым ярким примером сложносоставных организмов. Выражаясь словами Хьюза, зараженный муравей — это «гриб, переодетый муравьем».

В рамках науки можно поискать смысл в такого рода сменах ипостаси. В своей работе «Расширенный фенотип» (*Extended Phenotype*) Ричард Докинз указывает на то, что гены не просто содержат инструкции для развития, но и задают некоторые типы поведения. Птичье гнездо — внешнее

проявление генома птицы. Бобровая плотина — выражение генома бобра. А вот смертельная хватка муравья — проявление генома кордицепса однобокого. Посредством наследуемых типов поведения, утверждает Докинз, гены существа, или его фенотип, входят в мир.

Докинз проявил осторожность и наложил «строгие ограничительные требования» на идею расширенного фенотипа. Хотя это гипотетическая концепция, он не устает напоминать нам, что теория имеет строгие рамки. Существуют три условия, которые следует соблюдать, чтобы понятие фенотипа все же не слишком расширилось (если бобровая плотина — выражение бобрового генома, то что можно сказать о пруде, образовавшемся выше по течению от плотины, и рыбе в этом пруду, и?..).

Первое: расширенные характерные черты должны наследоваться. Кордицепс однобокий, например, наследует фармакологический талант к заражению муравьев и манипуляции их поведением. Второе: расширенные характеристики должны изменяться от поколения к поколению. Так, некоторые «особи» кордицепса манипулируют поведением муравьев лучше, чем другие. Третье, и самое главное: эти изменения должны сказываться на способности организма выживать и производить потомство, то есть он должен уметь адаптироваться (кордицепсы, точнее контролирующие движения своей жертвы, лучше рассеивают свои споры). Если все эти условия соблюдены — характерные черты наследуются, изменяются, и эти изменения сказываются на приспособленности организма к выживанию, — улучшенный фенотип будет отобран в процессе естественного отбора и найдет выражение в следующем поколении живых существ. Бобры, строящие более надежные плотины, имеют больше шансов выжить и передать потомкам умение строить такие плотины. Но возведенные нами плотины, или, если уж на то пошло, любые человеческие постройки, не являются проявлением нашего фенотипа, потому что мы не рождаемся с инстинктом строить какие-либо сооружения, влияющие на нашу способность выживать.

Стремление ввысь и предсмертная хватка, с другой стороны, полностью подходят под определение поведения гриба, а не муравья. У гриба нет подвижного, мускулистого, звериного тела с центральной нервной системой или способности ходить, летать или кусать. Поэтому гриб такое тело присваивает. Эта стратегия настолько действенна, что он потерял способность выживать без нее. Часть своей жизни кордицепс однобокий вынужден «носить» муравьиное тело. В спиритических кружках XIX столетия бытовало представление, что медиумами овладевают души усопших. Не имея собственных тел или голосов, духи, как говорили, заимствовали человеческие тела, чтобы с их помощью говорить и действовать. Аналогичным образом грибы, манипулирующие чужим сознанием, овладевают телами насекомых, которых заражают. Зараженные муравьи перестают вести себя как собратья и становятся медиумами для грибов. Именно это имел в виду Хьюз, заметивший о муравье, зараженном кордицепсом, что это «гриб, переодетый муравьем». Понукаемый грибом, муравей отклоняется с рельсов своей собственной эволюционной истории, которые задавали его поведение и правила взаимодействия с другими муравьями и миром, и становится частью эволюционной истории кордицепса. С физиологической, этиологической и эволюционной точки зрения, муравей *становится грибом*.

У кордицепса однобокого и других грибов, манипулирующих насекомыми, развилась поразительная способность причинять вред животным, на которых они паразитируют. Псилоцибиновые грибы, как сообщается во все большем числе исследовательских работ, развили удивительную способность излечивать широкий диапазон человеческих заболеваний. С одной стороны, это нечто новое. С 2000-х годов испытания, поставленные под строгий контроль, и передовое оборудование для сканирования мозга помогают исследователям переводить психоделические ощущения на язык науки: новая волна интереса к психоделикам привела меня в больницу для участия в эксперименте с использованием ЛСД. Недавние открытия в общих чертах подтвердили мнение многих ученых, еще в 1950–1960-х годах пришедших

к выводу, что ЛСД и псилоцибин — чудотворные средства для лечения целого ряда психических проблем. С другой стороны, правда, большая часть исследований с участием новейших методов и технологий в общем и целом подтверждает то, что прекрасно известно в традиционных национальных культурах. Внутри их психотропные растения и грибы используются с глубокой древности и как лекарства, и как посредники между мирами — нашим и духовным. С этой точки зрения, наука догоняет саму себя.

Многие недавние находки просто экстраординарны по меркам традиционной фармацевтики. В 2016 году в ходе двух схожих исследований в Нью-Йоркском университете и Университете Джона Хопкинса пациентам, страдавшим хронической тревожностью, депрессией и «экзистенциальной тревогой», наступившими после того, как им был поставлен диагноз «рак в неизлечимой стадии», параллельно с курсом психотерапии ввели курс псилоцибина. После одной лишь дозы у 80 % пациентов куда менее выраженными стали симптомы психологического расстройства, и эффект сохранялся в течение по крайней мере шести месяцев. Благодаря ему пациенты не чувствовали себя «деморализованными, [не испытывали] чувства безнадежности, [он] упрочил ощущение душевного благополучия и улучшил качество жизни». Участники эксперимента говорили о «душевном подъеме, восторженных чувствах, радости, блаженстве и любви» и «переходе от ощущения отстраненности к чувству взаимосвязи с миром». Более 70 % участников оценили то, что они испытали, как одно из пяти самых значимых событий в жизни.

«Вы можете сказать: “Ну и что?” — заметил во время интервью Роланд Гриффитс, возглавлявший исследование. — Сначала я пытался понять, не была ли их обычная жизнь довольно скучной. Но нет». Участники сравнивали испытанное ими с рождением первенца или смертью одного из родителей. Эти исследования считаются одними из самых удачных психиатрических вмешательств в истории современной медицины.

Глубокие личностные изменения и перемены в сознании происходят редко; то, что они имели место в столь

тесном промежутке времени, просто поразительно. И тем не менее эти результаты — вовсе не аномалия. Несколько свежих работ демонстрируют активное воздействие псилоцибина на сознание людей, их восприятие мира и воззрения. С помощью некоторых психометрических опросников, с которыми я мучился, было выявлено, что псилоцибин с высокой частотой может становиться причиной так называемого истического опыта. Имеются в виду чувства благоговения, взаимосвязанности всего в мире, преодоления пространства и времени, глубокого интуитивного понимания природы реальности, глубокой любви, умиротворенности или радости. Это также часто подразумевает утрату ясного восприятия себя.

Псилоцибин надолго впечатывается в сознание человека, как улыбка Чеширского кота из «Алисы в Стране чудес», которая «долго парила в воздухе, когда все остальное уже пропало»*. Группа исследователей сообщила, что единственная сильная доза псилоцибина увеличила готовность к новым впечатлениям, ощущение благополучия и удовлетворенности жизнью у здоровых волонтеров и этот эффект сохранялся в большинстве случаев больше года. В ходе других исследований установили, что псилоцибин помог курильщикам и алкоголезависимым отказаться от пагубных привычек. Другая группа ученых заявляла об усилении у подопытных чувства единения с природой.

В ворохе научных работ последних лет все отчетливее проступает несколько главных тем. Одна из самых интересных — как участники экспериментов разбираются в своих впечатлениях. Как пишет Майкл Поллан в книге «Мир иной» (*How to Change Your Mind*)** , большинство принявших псилоцибин для описания опыта не используют механистическую терминологию современной биологии, например не сообщают ничего о перемещении по мозгу молекул. Совсем наоборот. Поллан обнаружил, что многие из тех, кого он опрашивал, «начинали свой духовный путь

* Перевод Н. М. Демуровой.

** Издательство АСТ, 2020.

завзятыми материалистами и атеистами <...>, и тем не менее на некоторых из них снизошел “мистический опыт”, возрадивший в них непоколебимое убеждение в том, что в мире имеется много такого, о чем мы даже не подозреваем, — некая “запредельная реальность”, лежащая за этой материальной вселенной и составляющая <...> целый особый мир»*. Эти воздействия ставят перед нами загадку. То, что химическое вещество может спровоцировать ощущение таинственности, казалось бы, подтверждает преобладающую в науке точку зрения о том, что наши субъективные миры поддерживаются химической активностью нашего мозга; что мир духовных верований и ощущение божественного может возникнуть из материального, биохимического явления. Однако, как указывает Поллан, те же самые впечатления настолько сильны, что способны убедить людей, что нематериальная реальность — сырьевая составляющая религиозных верований — существует.

Кордицепс однобокий и кишечные микроорганизмы влияют на разум животных, потому как населяют их тело и точно настраивают химическую секрецию. К псилоцибиновым грибам это не относится. Можно ввести человеку синтетический псилоцибин и вызвать полный диапазон психодуховных реакций. Как это происходит? Оказавшись внутри тела, псилоцибин преобразуется в алкалоид псилоцин. Псилоцин вмешивается в работу мозга, стимулируя рецепторы, на которые обычно воздействует нейротрансмиттер серотонином. Имитируя это соединение, псилоцибин, как и ЛСД, проникает в нервную систему, непосредственно влияет на прохождение электрических импульсов по телу и даже изменяет структуру нейронов.

В 2000-х годах ученые в рамках Программы исследования психоделиков при поддержке Фонда Бекли и Имперского колледжа Лондона (*Beckley/Imperial Psychedelic Research Programme*) дали испытуемым псилоцибин и проанализировали их мозговую деятельность. До тех пор не было точно известно, как псилоцибин влияет на активность

* Перевод В. Спарова. Цит. по изданию выше.

нейронов. Результаты оказались удивительными: сканирование показало, что псилоцибин не усиливал активность мозга, как можно было бы предположить исходя из его воздействия на сознание и когнитивные способности; скорее он сокращал активность некоторых ключевых зон.

Мозговая активность, снижаемая псилоцибином, — ключ к пониманию термина «сеть пассивного режима работы мозга (СППРМ)» (англ. *default mode network, DMN*). Если мы не сосредоточены ни на чем, наш рассудок «предается праздности»; когда мы занимаемся самоанализом, думаем о прошлом или строим планы на будущее, включается СППРМ. Эту сеть ученые прозвали «столицей мозга» и «главной корпорацией». Среди беспорядочных мозговых процессов, не прекращающихся ни на минуту, СППРМ, как предполагают ученые, поддерживает своего рода порядок — как учитель в шумном, беспокойном классе.

Исследование продемонстрировало, что у испытуемых, сообщавших о наиболее сильном ощущении «растворения личности», или потери себя, под воздействием псилоцибина наиболее резко сокращалась активность СППРМ. Отключите эту сеть, и мозг «сорвет с петель». Связи в мозге нарушаются, и возникает беспорядочное нагромождение новых нейронных путей. Сети активности, до того разобщенные, образуют соединения. Используя метафору Олдоса Хаксли из его исторического исследования психоделических впечатлений «Двери восприятия», можно сказать, что псилоцибин перекрывает «редукционный клапан» нашего сознания. Результат? «Ничем не ограниченный стиль познания». Авторы исследования приходят к выводу, что способность псилоцибина изменять человеческое сознание имеет отношение к этим неконтролируемым потокам в мозге.

Мы сумели визуализировать работу мозга и таким образом приблизились к пониманию того, как психоделики воздействуют на наши тела. Однако они почти не касаются чувств, ведь, в конце концов, именно люди испытывают впечатления, не мозг. И именно эти впечатления, кажется, усиливают терапевтическое действие псилоцибина. В исследовании, где измеряли действие псилоцибина на паци-

ентов с неизлечимыми формами рака, те из них, у кого ощущение мистического проявлялось наиболее сильно, демонстрировали самые явные признаки снижения депрессивности и тревожности. Подобным же образом в работе по изучению воздействия псилоцибина на заядлых курильщиков пациенты, продемонстрировавшие лучшие результаты, испытали самые сильные мистические впечатления. Псилоцибин, судя по всему, достигает наибольшей действенности, не нажимая на определенный набор биохимических кнопок, а раскрывая сознание пациентов, предлагая им новые способы осознания их жизни и поведения.

Эти находки, по сути, во многом вторят открытиям ученых, исследовавших ЛСД и псилоцибин в первую волну научного интереса к психоделике в середине XX века. Абрам Хоффер, канадский психиатр и исследователь действия ЛСД в 1950-х, отметил, что «с самого начала мы рассматривали в качестве ключевого фактора в терапии не химическое вещество, а впечатления[, им спровоцированные]». Это заявление может сегодня звучать очень здраво, но в то время, когда на вещи смотрели с позиции механистической медицины, оно воспринималось как радикальная мысль. Общепринятым подходом к лечению тогда (как в значительной степени и теперь) было использовать *нечто* — лекарства или хирургические инструменты — для лечения *чего-то*, из чего сделано тело, как мы используем инструменты для ремонта некоего механизма. Предполагается, что лекарственные препараты действуют на неисправный участок по химической цепочке, не затрагивая сознание и разум: лекарство влияет на рецептор, который провоцирует смену симптомов. Псилоцибин, как ЛСД и другие психоделики, напротив, действует на симптомы душевного заболевания *через разум*. Стандартная цепочка удлиняется: лекарство воздействует на рецептор, который провоцирует изменения в разуме, который провоцирует изменение симптомов. То есть психоделический опыт пациентов выступает в роли лекарства.

По словам Мэтью Джонсона, психиатра и исследователя в Университете Джонса Хопкинса, психоделики, например псилоцибин, «выталкивают людей из их биографии, накачав

дурью. По сути, это перезагрузка системы... Психоделики освобождают место для гибкости разума, и она распространяется на модели, согласно которым мы организуем реальность». Укоренившиеся привычки, как пристрастие к различным веществам или те, что усугубляют «пессимизм» депрессивных, становятся податливее. Смягчая жесткие рамки человеческого опыта, псилоцибин и другие психоделики способны открыть новые возможности для познания.

Одна из самых надежных и прочных подсознательных моделей — наше собственное Я. Именно нашу идентичность псилоцибин и другие психоделики, кажется, и разрушают. Некоторые называют это «растворением эго». Другие сообщают, что перестали понимать, где заканчиваются они сами и начинается окружающий их мир. «Я» как линия обороны, на которую мы так полагаемся, может пасть или съежиться, постепенно исчезнуть, раствориться в другой сущности. Результат? Чувство единства с чем-то большим, вновь обретенное ощущение взаимосвязи с миром. Во многих случаях — если говорить и о лишайниках, и о бесконечно раздвигающем границы мицелии — грибы бросают вызов поизносившимся понятиям личности и индивидуальности. Вырабатывающие псилоцибин грибы, подобно ЛСД, делают то же, но в самой интимной обстановке — внутри нашего рассудка, нашего сознания.

Когда речь идет о кордицепсе однобоком, поведение зараженного им муравья можно считать поведением гриба. Мертвая хватка, стремление к верхушке — это расширенные характеристики гриба, его расширенный фенотип. Можно ли и изменение человеческого сознания и поведения, спровоцированное употреблением псилоцибиновых грибов, считать грибным фенотипом? Выходящее за традиционные рамки фенотипа кордицепса поведение оставляет отпечаток в виде окаменелых шрамов на «изнаночной» стороне ископаемых листьев. Можно ли относиться к церемониям, ритуалам, песнопениям и другим культурным и технологическим продуктам психоделического опыта как к отпечатку, который расширенное фенотипичное поведение псилоцибиновых грибов оставляет в мире? «Наряжа-

ются» ли псилоцибиновые грибы в наше сознание, как кордицепс и массоспора «наряжаются» в тела насекомых?

Терренс Маккенна был горячим защитником этой точки зрения. При приеме достаточно большой дозы, утверждал он, можно ожидать, что грибы заговорят — ясно и «красноречиво [расскажут] о себе в прохладной ночи нашего сознания». У грибов нет рук и ног, чтобы манипулировать миром, но, используя псилоцибин как химический императив, они могут позаимствовать человеческое тело, воспользоваться мозгом и чувствами, чтобы объясниться. Маккенна считал, что грибы способны примерить наше сознание, разум, чувства и, что самое главное, транслировать знание о другом мире. Кроме всего прочего, грибы могут использовать псилоцибин для влияния на людей — чтобы отвлечь нас как вид от пагубных привычек. С точки зрения Маккенны, это и есть симбиотическое партнерство, дающее возможности «богаче и даже причудливее», чем те, что были доступны людям или грибам по отдельности.

Как напоминает нам Докинз, то, насколько далеко мы готовы пойти, зависит от того, насколько смелы мы в своих предположениях. Предположения, в свою очередь, зависят от наших пристрастий и предубеждений. «Вы полагаете, что мир таков, каким выглядит в ясный погожий полдень, — заметил однажды философ Альфред Норт Уайтхед своему бывшему студенту Бертрану Расселу. — Мне же мир представляется таким, каким кажется ранним утром, когда пробуждаешься от глубокого сна».

С позиции Уайтхеда, Докинз строил предположения в погожий полдень. Он прикладывает все усилия, чтобы его рассуждения о расширенном фенотипе были «четко структурированными» и «не выходили за строгие рамки». Он прекрасно понимает, что фенотипы могут преодолевать границы тела, но они не должны *слишком* уж выступать. Маккенна, напротив, рассуждал на заре. Его требования не столь строги, его объяснения не так четко очерчены. Между этими двумя полюсами лежит целый континент возможных мнений.

Как же псилоцибиновые грибы соответствуют трем «строгим критериям» Докинза?

Способность гриба вырабатывать псилоцибин, конечно же, наследуется. Она также варьирует в пределах как рода, так и вида. Тем не менее чтобы «грибной» дурман — видения, мистические ощущения, растворение эго и утрата собственного Я — считался проявлением расширенного грибного фенотипа, нужно, что бы соблюдалось последнее ключевое условие. Грибы, способствующие изменениям к лучшему в сознании и разуме — что бы это ни значило, — должны передавать свои гены более активно. Грибы должны отличаться друг от друга в способности влиять на людей; те, что обеспечивают более красочные и желанные впечатления, должны выигрывать на фоне тех, которым это удастся хуже.

На первый взгляд, третье условие кажется определяющим. Вырабатывающие псилоцибин грибы, возможно, влияют на человеческое поведение, но, в отличие от кордицепса однобокого, внутри наших тел не живут. Более того, рассуждения Маккенны сложно согласовать с тем, что в истории псилоцибина люди появились одними из последних. Псилоцибин вырабатывался грибами за десятки миллионов лет до появления человечества. Последняя и наиболее точная оценка относит появление первых «магических» грибов к периоду около 75 миллионов лет назад. Более 95 % эволюционной истории псилоцибиновые грибы провели на планете, где не было ни одного человека, и у них все было просто замечательно. Если грибы что-то и выигрывают от нашего измененного душевного состояния, то длится это не так уж и долго.

Так какое же все-таки преимущество давал псилоцибин грибам, у которых в процессе эволюции возникла способность его вырабатывать? Зачем им вообще было создавать его? Над этим вопросом ломают голову уже не одно десятилетие как микологи, так и энтузиасты-любители. Вполне возможно, что до появления людей псилоцибин не играл какой-то особенной роли в жизни вырабатывавших его грибов. В грибах и растениях есть множество соединений, накапливающихся в тихих биохимических заводах и играющих незначительную роль в их жизни; это всего лишь побочные продукты метаболизма. Иногда эти второстепен-

ные соединения сталкиваются с животным, которое привлекают, сбивают с толку или убивают; с этого момента эти соединения начинают приносить пользу грибу и тогда превращаются в рычаг эволюции. Но иногда они никакой особенной функции не выполняют, только создают вариации на биохимическую тему, которые когда-нибудь, возможно, окажутся полезными. А может, и нет.

Две работы, опубликованные в 2018 году, предполагают, что псилоцибин действительно обеспечивал некую фору псилоцибиновым грибам. Анализ ДНК одного из таких видов доказывает, что способность вырабатывать псилоцибин появлялась в процессе эволюции не единожды. Еще интересней такое открытие: кластер генов, необходимый для производства псилоцибина, за свою историю несколько раз мигрировал путем горизонтального переноса генов между грибными династиями. Мы уже убедились, что горизонтальный перенос обеспечивает передачу генов и закодированных в них свойств без полового общения и производства потомства. Это повседневное явление у бактерий — так сопротивляемость антибиотикам быстро распространяется по всей бактериальной популяции. Однако среди выращивающих плодовые тела грибов это редкость. Еще реже сложный кластер генов в нетронутом виде переходит от одного вида к другому. То, что кластер «псилоцибиновых» генов оставался целым, переходя от вида к виду, позволяет предположить, что он обеспечивал значительное преимущество любому грибу, в котором проявлялся. Если бы это было не так, это свойство очень быстро исчезло бы.

Но в чем же могло состоять это преимущество? Кластер «псилоцибиновых» генов переходил между видами гриба с похожим образом жизни — обитавшими в гниющей древесине и помете животных. В такой среде обитают многочисленные насекомые, которые «поедают грибы или соперничают» с ними. Все они должны быть чувствительны к сильному действию псилоцибина. Вполне возможно, что эволюционная ценность псилоцибина заключалась в его способности влиять на поведение животных. Но как, до конца не ясно. У грибов и насекомых очень длинная

и запутанная историю. Некоторые грибы, такие как кордицепс и массоспора, насекомых убивают. Другие с ними сотрудничают в течение протяженных периодов эволюции, например грибы, живущие с муравьями-листорезами и термитами.

И в первом, и в других случаях грибы используют химические вещества для изменения поведения насекомых. Массоспора заходит настолько далеко, что использует для этого псилоцибин. Какова же эволюционная цель этого вещества? Мнения разделились. Отслеживать воздействие псилоцибина на организмы, которые его поглощают, непросто, даже когда подопытными являются люди, которые по крайней мере могут попытаться рассказать о своих впечатлениях и заполнить психометрические опросники. А каковы шансы выяснить, что делает псилоцибин с сознанием и разумом насекомого? Исследования с участием животных крайне редки, что также усложняет дело.

Мог ли псилоцибин отпугивать насекомых-вредителей от производивших его грибов, сбивая их с толку? Если это так, то он, видимо, не слишком эффективен. Существуют виды комаров и мух, которые регулярно селятся внутри псилоцибиновых грибов. Улитки и слизняки пожирают их без каких-либо вредных для себя последствий. Не раз наблюдали, как муравьи-листорезы активно разыскивают определенные виды грибов для еды и уносят их целиком в муравейник. Все эти открытия заставляют некоторых исследователей предположить, что псилоцибин не только не был отпугивающим веществом, но, наоборот, служил приманкой, каким-то образом настраивая насекомых в пользу гриба.

Истина, вероятно, где-то посередине. Псилоцибиновые грибы, ядовитые для одних существ, могли служить вполне съедобной пищей для тех, что смогли стать устойчивыми к грибным токсинам. Некоторые виды мух, например, невосприимчивы к яду бледной поганки и, соответственно, обладают практически исключительными правами на нее. Могли ли насекомые, устойчивые к псилоцибину, помочь грибу распространять споры? Защищать его от других вредителей? Нам остается только гадать.

Мы, может, и не знаем, как псилоцибин служил грибным интересам в первые несколько миллионов лет своего существования. Но с нашей выигрышной позиции понятно, что взаимодействие человеческого разума и псилоцибина изменило эволюционную судьбу тех грибов, что его вырабатывают. Псилоцибиновые грибы легко устанавливают контакт с людьми. Псилоцибин не только не действует отпугивающе — чтобы случилась передозировка и отравление, человеку пришлось бы съесть в тысячу раз больше грибов, чем необходимо для обычного «путешествия в страну грез». Нет, он заставляет людей выискивать грибы, переносить их с места на место и искать способы искусственно выращивать их. Так, мы уже давно помогаем распространять их споры, достаточно легкие, чтобы ветер отнес их на большое расстояние, и достаточно обильные: единственный гриб, если оставить его на любой поверхности всего на несколько часов, выбросит столько спор, что вокруг него образуется пятно густого черного цвета. Столкнувшись с новым животным, химическое вещество, которое когда-то, вероятно, служило, чтобы сбивать с толку и отпугивать вредителей, за несколько быстрых ходов превратилось в эффективную приманку. «Магические» грибы превратились из золушек в звезды международного уровня всего за несколько десятилетий XX века, и это один из самых драматических эпизодов в долгой истории взаимоотношений человека и грибов.

Гарвардский ботаник Ричард Эванс Шультес, прочитав в 1930-х описания «плоти богов», составленные испанскими монахами XV века, был заинтригован этими записями. Из немногочисленных сохранившихся источников стало понятно, что в некоторых частях Центральной Америки псилоцибиновые грибы превратились в центры культурного и духовного притяжения. Они были обнаружены в руках местных божеств, а их употребление питало канал связи с божественным началом, в которой сами грибы играли существенную роль.

Можно ли было найти эти грибы в современной Мексике? Один мексиканский ботаник подсказал Шультесу, куда нужно ехать, и в 1938 году он отправился в долины

северо-восточного штата Оахака на поиски. (В том же году Альберт Хофман впервые выделил ЛСД из спорыньи в фармакологической лаборатории в Швейцарии). Шультеc обнаружил, что масатеки использовали грибы для поддержания здоровья и благополучия. Курандерос, или целители, регулярно устраивали грибные бдения, чтобы излечивать больных, находить пропавшую собственность и давать советы. Грибы росли в изобилии на пастбищах вокруг деревень. Шультеc собрал образцы и опубликовал свои изыскания. Он сообщал, что употребление этих грибов приводило к «безудержному веселью, бессвязной речи и... фантастическим многокрасочным и ярким видениям».

В 1952 году Гордон Уоссон, миколог-любитель и вице-президент банка *J. P. Morgan*, получил письмо от поэта и ученого Роберта Грейвса с описанием работы Шультеcа. Известия об изменяющих сознание грибах из «плоти богов» чрезвычайно заинтересовали Уоссона, и он отправился в Мексику, в штат Оахака, на их поиски. Там Уоссон познакомился с целительницей по имени Мария Сабина, пригласившей его на грибную церемонию. Уоссон описал свои впечатления как «потрясающие душу». В 1957 году он опубликовал отчет о своей поездке в журнале *Life*. Статья была озаглавлена «На поиски магических грибов, или Нью-Йоркский банкир отправляется в горы Мексики для участия в древних ритуалах индейцев, которые жуют странные наросты, вызывающие видения».

Статья Уоссона стала сенсацией, ее прочли миллионы. К тому времени свойства ЛСД были известны уже 14 лет и изучением его воздействия активно занималось сообщество исследователей. Тем не менее работа Уоссона о грибах-психоделиках была первой, что достигла широкой общественности. Словосочетание «магические грибы» стало почти что термином. Более того, оно наметило кое-какие новые пути в науке. В автобиографии Деннис Маккенна вспоминает, как его брат Терренс, тогда развитый не по годам 10-летний мальчуган, «ходил по пятам за матерью, размахивая журналом и требуя продолжения истории. Но ей, конечно, добавить было нечего».

События развивались стремительно. Участник экспедиции Уоссона послал Хофману образцы магических грибов, и вскоре активный ингредиент был идентифицирован, экстрагирован и назван. Им оказался псилоцибин. В 1960 году глубоко уважаемый гарвардский академик Тимоти Лири услышал о магических грибах от друга и отправился в Мексику попробовать их. Его впечатления — «путешествие в мир фантастических грез» — оказали на него глубочайшее воздействие, и он вернулся «другим человеком». Оказавшись снова в Гарварде, вдохновленный своим опытом с магическими грибами, Лири забросил исследовательскую программу, которую вел до того, и начал новый Гарвардский псилоцибиновый проект. «Съев семь грибов в мексиканском саду, — писал он позже о своем откровении, — я посвятил всю свою энергию и время исследованию и описанию этих странных глубинных сфер».

Методы Лири были весьма противоречивыми. Он оставил Гарвард и всерьез начал пропагандировать свое видение того, что культурной революции и духовного просветления можно достигнуть при помощи психоделиков. Вскоре он обрел скандальную известность. Во время многочисленных появлений на телевидении и радио он проповедовал пользу ЛСД и многочисленные положительные качества наркотика. В интервью журналу *Playboy* он уверял, что во время обычного психоделического трипа женщины могли испытать тысячу оргазмов. Он попытался соперничать с Рональдом Рейганом за кресло губернатора Калифорнии, но проиграл выборы.

Контркультура 1960-х годов, отчасти подогреваемая проповедями Лири, пытавшегося обратить всех в свою веру, набирала размах. В 1967 году в Сан-Франциско Лири, к тому времени уже «верховный жрец» психоделического движения, обратился к «Сбору племен» (*Human Be-In*), на котором присутствовали десятки тысяч человек. Вскоре после этого в тумане негативной реакции и тине скандала, замутнившими информационный фон, ЛСД и псилоцибин были запрещены. К концу десятилетия почти все исследования психоделиков были прекращены или вынуждены были перейти на нелегальное положение.

Полный запрет на псилоцибин и ЛСД отметил начало новой главы в эволюционной истории псилоцибиновых грибов. В 1950-х и 1960-х годах бóльшая часть исследований психоделиков задействовала ЛСД или синтетический псилоцибин в форме пилюль, в основном производимых Хофманом в Швейцарии. Но в начале 1970-х годов отчасти из-за риска быть наказанным за незаконную торговлю чистым псилоцибином и ЛСД, отчасти из-за их недостатка интерес к магическим грибам вырос. К середине 1970-х во многих частях света, от Соединенных Штатов до Австралии, выявили новые виды псилоцибиновых грибов. Однако поставки дикорастущих грибов сезонны и локальны. Вернувшись из Колумбии в начале 1970-х годов, Деннис и Терренс Маккенна начали поиски более стабильных поставщиков. Решение они нашли радикальное. В 1976 году братья Маккенна опубликовали небольшую книжку под заголовком «Псилоцибин. Руководство по выращиванию магических грибов». Вооружившись этой брошюрой и не покидая сарая на заднем дворе, как уверяли братья, при помощи скороварок и банок любой мог произвести неограниченное количество сильнодействующего психоделика. Процесс, утверждали они, был лишь чуть сложнее, чем приготовление джема, и даже новичок, по словам Терренса, скоро мог оказаться «по шею в алхимическом золоте».

Братья Маккенна не были первыми, кто начал выращивать псилоцибиновые грибы, но они первыми опубликовали надежное руководство по выращиванию большого количества грибов без специального лабораторного оборудования. Руководство имело сногсшибательный успех, и за пять лет было продано более 100 000 экземпляров. Это дало резкий толчок к развитию новой области — независимой любительской микологии — и повлияло на молодого миколога Пола Стемеца, открывшего четыре новых вида псилоцибиновых грибов и составившего атлас-определитель.

Стемец уже тогда работал над новыми способами выращивания целого ряда «деликатесных и лечебных» плодов и в 1983 году издал работу «Как выращивать грибы», что упростило доступ к его технологии. В 1990-х, когда

в интернете стали появляться форумы грибных фермеров, голландские предприниматели нашли законную лазейку, позволявшую им открыто торговать псилоцибиновыми грибами. Многие производители тогда переключились на их выращивание. К началу 2000-х это безумие дошло до Англии, и на центральных улицах Лондона стали продаваться ящиками свежие психоделики в грибном облике. К 2004 году только компания *Camden Mushroom Company* продавала по 100 кило грибов в неделю, что соответствует примерно 25 000 трипов. Вскоре после этого открытую продажу запретили, но секрет уже перестал быть секретом. Сегодня в интернете можно купить готовые наборы растворимых псилоцибов. Скрещиванием видов получают гибриды, от «Золотого учителя» (*Golden Teacher*) до «Мккеннэ» (*Mc Kennai*), каждый со своим оттенком действия.

Все то время, пока люди отыскивали и собирали псилоцибиновые грибы — то есть с энтузиазмом распространяли их споры, — эти грибы выигрывали от способности подправлять наше сознание. С 1930-х годов эти преимущества многократно возросли. До поездки Уоссона в Мексику мало кто, помимо коренных сообществ Центральной Америки, знал о существовании псилоцибиновых грибов. А через два десятилетия после их прибытия в Северную Америку началась история их одомашнивания. В буфетах, спальнях и в гаражах несколько видов тропических грибов обретали новую жизнь, несмотря на неподходящий климат умеренных широт. Более того, с момента первой статьи Шультеза в конце 1930-х было описано более 200 новых видов, производящих псилоцибин, включая псилоцибиновый лишайник из тропических лесов Эквадора. Оказывается, эти грибы растут почти во всех средах, если выпадает достаточно осадков. Как заметил один из исследователей, псилоцибиновые грибы «встречаются в изобилии в любом месте, изобилующем микологами». Путеводители и руководства позволяют людям найти, опознать и собрать — таким образом рассеивая их споры — псилоцибиновые грибы, которые еще несколько десятилетий назад было бы не сыскать днем с огнем. Некоторые из этих видов, кажется,

имеют склонность к потревоженным цивилизацией местам обитания и легко обживаются в том беспорядке, который остается после нас. Как с усмешкой признается Стемец, у многих из них возникла любовь к общественным местам, включая «парки, жилые кварталы, школы, церкви, поля для гольфа, промышленные комплексы, ясли, сады, зоны отдыха у трасс и правительственные здания, включая окружные суды и тюрьмы и суды и тюрьмы штатов».

Приблизили ли нас события последних нескольких десятилетий к удовлетворению третьего критерия Докинза? Можно ли считать, что эти грибы заимствуют человеческий мозг для мышления и человеческое сознание — для чувств? Попадает ли одурманенный грибом человек в самом деле под его влияние — как муравей от кордицепса? Чтобы считать наше измененное состояние расширением фенотипа гриба, одурманенный должен был бы служить репродуктивным интересам того самого гриба, который съел. Однако этого, кажется, не происходит. Выращивают лишь небольшое количество видов грибов, и по большей части «фермеры» делают выбор в пользу того, что менее требователен и дает более обильный урожай. Непонятно, насколько важно при этом «качество» грибного дурмана. Проблема также состоит в том, что, если бы все люди вымерли в одно мгновение, большая часть псилоцибиновых грибов продолжала бы жить как ни в чем не бывало. Они не зависят целиком от нашего измененного состояния — как кордицепс, полностью зависимый от поведения муравьев. Десятки миллионов лет они прекрасно росли и производили потомство без помощи людей и, скорее всего, продолжают это делать без нас.

Имеет ли это какое-либо значение? «Можно было бы предположить, что после выделения псилоцибина и псилоцина грибы Мексики утратят свою волшебную притягательность», — писали Шульте и Хофман в 1992 году. На складах Амстердама можно выращивать сотни килограммов одомашненных псилоцибиновых грибов. После выделения псилоцибина сеть пассивного режима работы мозга (СПРРМ) можно отключить по требованию на сканнерах работы головного мозга. Мистический опыт, чувство бла-

гоговения и потери собственного Я могут посетить вас на больничной койке. Насколько ближе все эти достижения подводят нас к пониманию того, как именно псилоцибин влияет на человеческое сознание?

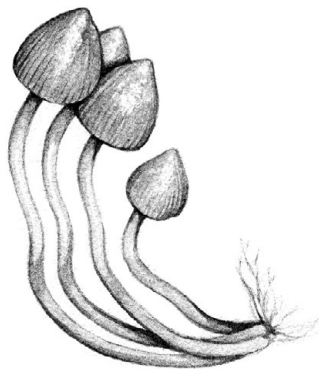
Для Шульгеса и Хофмана ответ был «не очень». Мистический опыт и ощущения по определению плохо поддаются рациональному объяснению. Их трудно оценить по числовым шкалам психометрических опросников. Они смущают и озадачивают. Несомненно лишь то, что они существуют. По словам Хофмана и Шульгеса, исследования структуры псилоцибина и псилоцина «просто продемонстрировали, что магические свойства грибов — это свойства двух кристаллических соединений». Это открытие, которое отодвигает решение ключевого вопроса в неопределенное будущее. «Их воздействие на человеческое сознание и разум так же необъяснимо и так же волшебно, как и сами грибы».

Эффект от псилоцибиновых грибов можно и не считать их расширенным фенотипом. Но означает ли это, что мы должны отказаться от теории Терренса Маккенны? Возможно, торопиться не стоит. «Наше сознание в состоянии бодрствования, — писал философ и психолог Уильям Джеймс в 1902 году, — является лишь одним типом сознания, а вокруг него, отделенные тончайшими экранами, находятся потенциально совершенно иные формы сознания». По плохо понятным причинам некоторые грибы уводят людей из знакомых обстоятельств к совершенно новым мирам и к грани новых вопросов. «Никакое описание Вселенной во всей ее полноте не может быть окончательным, если оно оставляет совершенно без внимания эти другие формы сознания», — сделал вывод Джеймс.

Для исследователя, пациента и стороннего наблюдателя самое любопытное в этих химических веществах — именно вызываемые ими ощущения. Подогретое употреблением грибов предположение Маккенны может раздвинуть пределы биологических возможностей и границы сознания. Но в том-то все и дело: воздействие псилоцибина на человека раздвигает пределы того, что *кажется* возможным. В культуре масатеков тот факт, что грибы говорят, не требует дока-

тельств. Любой попробовавший их может убедиться в этом сам. Бытующего в этой традиционной культуре мнения придерживаются и многие другие аналогичные сообщества, использующие в ритуалах галлюциногенные растения или грибы. Так же думают многие эмансипированные гурманы: они сообщают о том, что границы между Я и «другим» истончаются и что они ощущают «слияние» с ним.

Таков ли мир, каким он кажется в погожий полдень? Или он такой, каким мы видим его ранним утром, пробудившись от глубокого сна? Возможно, есть то, с чем могут согласиться все. Говорят ли грибы посредством людей и занимают ли они наши чувства или нет, но их влияние на наши мысли достаточно реально. Если бы мы вообразили, что гриб «одет» в наш разум и плещется в нашем сознании, что бы мы ожидали увидеть? О грибах могут петь песни, их могут увековечивать в скульптуре и живописи, в мифах и легендах; могут существовать церемонии, прославляющие грибы, и мировое сообщество независимых микологов, выдумывающих новые способы выращивания грибов дома, и проповедники грибов, подобные Полу Стемецу, выступающие перед большими аудиториями с речами о том, что грибы могут спасти мир. И такие люди, как Терренс Маккенна, утверждающий, что умеет разговаривать с грибами на понятном для них языке.



Псилоцибе полуланцетовидная (*Psilocybe semilanceata*),
или веселушка, или колпак свободы

ГЛАВА ПЯТАЯ

ЧТО БЫЛО ДО КОРНЕЙ

Ты никогда не освободишься от меня.
Он в дерево превратит меня.

«До свиданья» не говори мне.
Как выглядит небо, опиши мне.

— *ТОМ УЭЙТС / КЭТЛИН БРЕННАН*

Около 600 миллионов лет назад зеленые водоросли начали выбираться из пресного мелководья на сушу. Это были предки всех существующих на Земле растений. Эволюция флоры преобразовала планету и ее атмосферу; она стала одним из главных переходных этапов в истории жизни — колоссальным прорывом в биологической перспективе. Сегодня растения составляют 80 % биомассы и являются основой пищевых цепочек, поддерживающих существование почти всех земных организмов.

До появления растений Земля была обожжена и пустынна. Условия были экстремальными: резкие перепады температуры, каменистые пейзажи. Не существовало ничего похожего на почву. Питательные вещества были заключены внутри камней и минералов, а климат был засушливым. Это не значит, что жизнь полностью отсутствовала. Фотосинтезирующие бактерии, водоросли-экстремофилы и грибы, образовав своеобразную коросту, смогли прижиться на открытом воздухе. Однако суровые условия подразумевали, что жизнь на Земле развивалась преимущественно в водной среде. Мелкие теплые моря и лагуны кишели водорослями и животными. Морские скорпионы — эвриптериды — в не-

сколько метров длиной бродили по дну океана; трилобиты распахивали илистые донные отложения лопатообразными мордами. Отдельные кораллы начали образовывать рифы. Благоденствовали моллюски.

Несмотря на сравнительно негостеприимные условия, суша представляла многочисленные возможности для любых фотосинтезирующих организмов, которые могли справиться с имевшимися трудностями. Свет, проходя через водяной фильтр, не становился менее интенсивным, и углекислый газ был более доступен — важный стимул для тех, кто его поглощает. Но у водорослей — предков современных растений — не было ни корней, ни других инструментов для запасаания или перемещения воды и никакого опыта по извлечению питательных веществ из твердой почвы. Как же им удалось преодолеть эти трудности и завершить переход к жизни на суше?

Когда доходит до объединения отдельных биографий живых организмов, ученым трудно достичь согласия. Убедительных доказательств, как правило, мало, а существующие фрагментарные свидетельства могут быть использованы для подтверждения разных точек зрения. И все же в тлеющих спорах вокруг истоков жизни приводится одно обстоятельство, в отношении которого мнения сходятся: водоросли смогли выбраться на сушу только благодаря тому, что завязали отношения с грибами.

Эти ранние союзы превратились в то, что мы сейчас называем микоризными отношениями. Сегодня более 90 % всех видов растений зависят от микоризных грибов. Это правило, а не исключение: грибы — более прочная основа растительного мира, чем плоды, цветы, листья, древесина и даже корни. На этом тесном, интимном партнерстве, в котором есть все — сотрудничество, конфликты и соперничество, — растения и грибы строят коллективное процветание, на котором держатся наше прошлое, настоящее и будущее. Мы немислимы без них, но как редко о них думаем. Какой ценой обходится нам это небрежение, уже очевидно. Мы не можем позволить себе относиться к этому так и дальше.

Как мы уже могли убедиться, водоросли и грибы имеют обыкновение сотрудничать. Их объединения могут принимать различные формы. Одним примером являются лишайники. Водоросли, в том числе микроскопические, — другой пример; многие водоросли, выброшенные волнами на берег, зависят от грибов, обеспечивающих их питанием и не дающих им высохнуть*. Кроме того, есть еще мягкие зеленые шары, выращенные за несколько дней исследователями в Гарварде: они представили друг другу независимо растущие грибы и микроскопические водоросли. До тех пор пока грибы и водоросли сочетаются с точки зрения экологии, пока они вместе исполняют метаболическую «мелодию», которую ни один из них не вытянет в отдельности, они будут формировать все новые и новые симбиотические отношения. В этом плане союз грибов и водорослей, из которого возникли растения, — часть большой истории, эволюционный рефрен.

В то время как в рамках лишайника партнеры образуют «тело», совершенно непохожее на собственные «тела», с партнерами в микоризных отношениях такого не происходит: растения по-прежнему выглядят как растения, а в грибах можно легко узнать грибы. Так образуется совершенно иной, более свободный тип симбиоза, в котором одно растение может одновременно союзничать со многими грибами, а один гриб — со многими растениями.

Чтобы отношения процветали, и растение, и гриб должны подходить друг другу в метаболическом плане. Это знакомое условие. В процессе фотосинтеза растения забирают углерод из атмосферы и создают углеводы и липиды, от которых зависит большая часть жизни. Развиваясь внутри корней растений, грибы получают привилегированный доступ к этим источникам энергии — питанию. Однако для поддержания жизни одного фотосинтеза недостаточно. Растениям и грибам нужно нечто большее, чем источник энер-

* Если речь о современных экосистемах, то грибы едва ли смогут обеспечить питанием и защитой выброшенные на сушу растения. Вероятно, речь о тех, что растут у уреза воды и при ее отступлении оказываются на суше. Или же речь об ископаемых экосистемах. — *Прим. науч. ред.*

гии. Из почвы, наполненной волокнами и микропорами, полостями и лабиринтами гниющих растительных остатков, нужно добыть минеральные вещества. Грибы ловко находят дорогу в этих дебрях и могут добывать пищу так, как не могут растения. Приютив грибы в своих корнях, растения получают усовершенствованный «лаз» к источникам этих питательных веществ. Они тоже получают пищу. Заключив союз с грибом, растение получает грибной «протез», а гриб — растительный. Оба используют друг друга, чтобы расширить возможности. Это пример того, что Линн Маргулис нарекла «близостью незнакомцев». Только вряд ли их теперь можно назвать незнакомцами. Взгляните на корни, и вам все станет понятно. Под микроскопом корни превращаются в целые миры. Я на много недель погрузился в их изучение, иногда был увлечен, а иногда — разочарован. Опустите свежие тонкие корни в блюдо с водой, и вы увидите расползающиеся гифы. Прокипятите корни в красителе и расправьте на предметном стекле, и вы увидите переплетения. Грибные гифы раздваиваются и сливаются, взрываются внутри клеток растения буйством разветвляющихся нитей-отростков. Растение и гриб обнимаются и прижимаются друг к другу. Трудно вообразить более интимные позы.

Самое странное, что я когда-либо видел под микроскопом, — прорастающие семена-пылинки. Это самые мелкие семена на свете. Одно семечко можно рассмотреть невооруженным глазом — оно размером с кончик волоса или ресницы. Такие семена производят орхидеи и другие растения. Они почти ничего не весят и легко разносятся ветром и дождем. И они не прорастут, пока не встретятся с грибом. Я провел много времени, пытаюсь поймать их за этим занятием. Я зарывал тысячи семян-пылинок в маленьких мешочках и откапывал их через несколько месяцев, надеясь, что какие-то из них дали ростки. Я передвигал их иглой по стеклянной чашке Петри, пытаюсь рассмотреть под микроскопом хоть какие-то признаки жизни. Через несколько дней я нашел то, что искал. Некоторые семена набухли и превратились в толстые комочки, опутанные грибными

гифами, расплзавшимися по стеклу узкими длинными липкими лентами. Внутри развивающихся корней гифы сплывались в узлы и кольца. Это не было похоже на половые отношения: грибные клетки и клетки растения не слились и не объединили свою генетическую информацию. Но по сути это было ими: клетки двух разных существ встретились, объединились и начали сотрудничать ради новой жизни. Представлять будущее растение отделенным от гриба было бы абсурдом.

Неясно, как впервые возникли микоризные отношения. Некоторые решились предположить, что первые встречи были спонтанными и проходили во влажной обстановке: грибы разыскивали еду и пристанище внутри водорослей, выброшенных на грязные берега озер и рек. Другие, наоборот, предполагают, что водоросли прибыли на сушу уже со своими грибными партнерами. В любом случае, как объясняет Кейти Филд, профессор Лидского университета, «они вскоре стали зависеть друг от друга».

Филд — блестящий экспериментатор. Она годами изучает самые древние роды существующих сегодня растений. При помощи радиоактивных меченых атомов она оценивает обмен веществ между растениями и грибами в температурных камерах, имитирующих погодные условия древности. Их симбиотические манеры подсказывают, как растения и грибы вели себя по отношению друг к другу на самых ранних стадиях миграции на сушу. Окаменелости также позволяют узнать поразительные детали этих ранних союзов. Самые лучшие образцы относятся к эпохе примерно 400 миллионов лет назад и несут на себе следы неоспоримого присутствия в них грибов: пушистые комочки — точно такие же, какие мы наблюдаем сегодня. «Можно увидеть гриб, живший в клетках растений», — восхищалась Филд.

Самые первые растения были больше всего похожи на зеленые лужицы — без корней и других специализированных структур. Со временем у них появились грубые толстые органы, чтобы дать пристанище грибным помощникам, которые блуждали по почве в поисках питательных веществ и воды. Когда возникли первые корни, микориз-

ным отношениям было уже примерно 50 миллионов лет. Микоризные грибы — это основа всех появившихся впоследствии форм жизни на Земле. Да и само слово «микориза» (*mycorrhiza*) указывает на это: корни (*rhiza*) появились вслед за грибами (*mykes*).

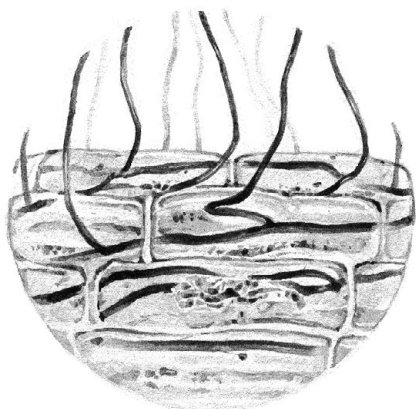
Сегодня, сотни миллионов лет эволюции спустя, у растений развились более тонкие, быстро растущие, гибкие и предприимчивые корни, которые ведут себя почти как грибы. Но корням не угнаться за ними, если дело касается исследования почвы. Гифы микоризных грибов в 50 раз тоньше самого тонкого корешка, и они могут превосходить корни в длину в 100 раз. Они появились до корней и проникают за их пределы. Некоторые исследователи идут еще дальше. «У растений нет корней, — признался один из моих преподавателей базового университетского курса озадаченным студентам. — У них есть грибы-корни — мико-ризы».

Микоризные грибы настолько плодовиты, что их мицелий составляет от трети до половины всей массы живого в почве. Цифры просто астрономические. По всей планете полная длина микоризных гиф в верхнем 10-сантиметровом слое почвы составляет примерно половину ширины нашей Галактики ($4,5 \times 10^{17}$ километров гиф против $9,5 \times 10^{17}$ километров космического пространства). Если бы гифы можно было бы разгладить в плоскую простыню, ею можно было бы два с половиной раза покрыть каждый клочок суши. Но гифы не задерживаются на одном месте. Микоризные гифы отмирают и вырастают заново так быстро — от 10 до 60 раз в год, — что за миллион лет их общая длина превзошла бы диаметр известной нам Вселенной ($4,8 \times 10^{10}$ световых лет гиф против $9,1 \times 10^9$ световых лет космоса). Учитывая, что микоризные грибы существуют уже около 500 миллионов лет и не ограничены верхним 10-сантиметровым слоем почвы, эти цифры сильно приуменьшены.

В союзе растений и грибов симбионты выполняют поллярные функции: побеги растения «занимаются» светом и воздухом, а корни и грибы поглощены почвой. Растения

упаковывают свет и углекислый газ, превращая их в углеводы и липиды. Микоризные грибы распаковывают питательные вещества, закупоренные в камнях и разлагающихся тканях. Это грибы, занимающие двойную нишу: часть их жизни проходит внутри растения, а часть — в почве. Они размещены у точки входа углерода в земные жизненные циклы и связывают атмосферу и Землю отношениями. До сего дня микоризные грибы помогают растениям справляться с засухами, жарой и многими другими стрессами, которым их с самого начала подвергает жизнь на суше. То же самое делают грибы, живущие в листьях и стеблях растений. То, что мы называем растениями, в действительности является грибами, которые в процессе эволюции научились выращивать водоросли, и водорослями, развившими способность выращивать грибы.

Слово «микориза» придумал в 1885 году немецкий биолог Альберт Франк — тот самый, чье увлечение лишайниками привело к созданию термина «симбиоз» за восемь лет до того. После этого он работал в Министерстве сельского хозяйства и лесных угодий королевства Пруссия, чтобы «создать условия для выращивания трюфелей». И эта работа заставила его вплотную заняться почвой. Как и для многих до него и после, трюфели оказались той приманкой, которая завела его в грибное подземное царство.



Микоризный гриб внутри корня растения

В разведении трюфелей Франк не преуспел, зато в живых подробностях описал запутанные отношения между древесными корнями и мицелием трюфельных грибов. Его рисунки и схемы изображают кончики корней, переплетающиеся внутри мицелиевого рукава, и гифы, выползающие, извиваясь, на лист бумаги. Франк был поражен интимностью этой связи и предположил, что отношения между корнями растений и их компаньонами-грибами, возможно, носят взаимовыгодный характер, а не паразитический. Как и было принято тогда среди ученых, занимавшихся симбиозом, чтобы разобраться в микоризных отношениях, в качестве основы он использовал лишайник. По мнению Франка, растения и микоризные грибы были связаны «тесной взаимной зависимостью». Микоризный мицелий выполнял роль «кормилицы» и поставлял «дереву полный комплекс питательных веществ из почвы».

Идеи Франка подверглись яростной критике, как в свое время и гипотеза двойственной природы лишайников Швенденера. Для противников теории Франка идея о том, что симбиоз может быть взаимно полезным — то есть называться мутуализмом, — была сентиментальной фантазией. Если кажется, что один из партнеров выигрывает от сожительства, он наверняка за это чем-то расплачивается. Любой симбиоз, представляющийся взаимовыгодным, только маскируется, «умалчивая» о конфликтах и паразитизме. Франк, на которого критика не оказала никакого влияния, продолжал работать над изучением отношений растений и их грибных «кормилиц» еще 10 лет. Он проводил изящные эксперименты с саженцами сосен. Некоторые из них он выращивал в стерилизованной почве; другие — в земле, принесенной из ближайшего соснового леса. Те саженцы, что росли в лесной почве, завязывали грибные отношения и развивались лучше, становясь здоровыми молодыми деревцами быстрее, чем саженцы, росшие в стерильных условиях.

Изыскания Франка привлекли внимание Дж. Р. Р. Толкина, чья любовь к растениям, особенно деревьям, была хорошо известна. Микоризные грибы вскоре стали персонажами «Властелина колец». «Для вас, маленький садовод

и любитель деревьев, — сказала она [повелительница эльфов Галадриэль] Сэму [Гэмджи], — у меня лишь скромный подарок. <...> В ящичке земля из моего сада и все благословения <...>. Если вы сохраните [мой подарок] и вновь увидите свой дом, тогда, быть может, он вознаградит вас. Пусть все будет уничтожено и пустынно, но мало найдется в Средиземье таких цветущих садов, какой будет у вас, если вы бросите на него эту землю*». Когда он наконец вернулся домой в разоренный Шир, Сэм Гэмджи посадил саженцы в тех местах, где были когда-то самые красивые и любимые деревья, теперь уничтоженные, а под корень каждому из них положил по крупинке земли, подаренной волшебницей. Всю зиму он как мог сохранял спокойствие и старался не сбегать ежечасно в сад, чтобы проверить, не взросло ли там чего. Весна превзошла самые смелые его ожидания. Деревья пустили побеги и тянулись ввысь, словно время торопилось и стремилось за год создать то, на что обычно уходило 20 лет.

Описание Толкина вполне могло относиться к росту растений в девонский период, 300–400 миллионов лет назад. Уже вполне обосновавшиеся на земле, питаемые большим количеством света и углекислого газа растения расселились по всему миру и стали развиваться в более сложные и крупные формы быстрее, чем когда-либо ранее. Деревья в метр высотой превратились в 30-метровые за несколько миллионов лет. За этот период — по мере того, как росло благополучие растений, — содержание углекислого газа в атмосфере упало на 95 %, что спровоцировало начало периода глобального похолодания. Возможно ли, что растения и их партнеры грибы сыграли какую-либо роль в этом колоссальном атмосферном изменении? Ряд исследователей, включая и Филд, считают, что это вполне вероятно.

«Уровень углекислого газа в атмосфере сильно падает в то самое время, когда растения развиваются во все более сложные структуры», — объяснила Филд. Повышение продуктивности растений, в свою очередь, зависело от их

* Перевод с английского В. С. Муравьева, А. А. Кистяковского.

микоризных партнеров. Такая последовательность событий вполне предсказуема. Один из самых серьезных факторов, ограничивающих рост растений, — недостаток фосфора. А уж что микоризные грибы делают лучше всего — это одна из их самых выдающихся метаболических «арий», — так это добывают фосфор из почвы и передают его партнерам-растениям. Если растения удобрены фосфором, они растут лучше и становятся больше. Чем больше растения, тем больше углекислого газа они забирают из атмосферы. Чем больше на земле растений, тем больше их умирает и больше углерода оказывается погребенным в почвенных отложениях. Чем больше углерода копится в почве, тем меньше его остается в атмосфере.

Фосфор — лишь часть истории. Микоризные грибы применяют кислоту и высокое давление, чтобы прорывать ходы в твердых каменистых породах. С их помощью растения в девонский период добывали из почвы такие минералы, как кальций и кремний. Высвобожденные из камня, они вступают в реакцию с углекислым газом, извлекая его из атмосферы. Получающиеся в результате соединения — соли угольной и кремниевой кислоты — попадают в океаны, где морские организмы используют их для создания панцирей и раковин. Когда эти организмы умирают, их раковины и панцири погружаются на глубину и скапливаются на океанском дне, залегая слоями в сотни метров толщиной — тоже огромные хранилища углерода. Сложите все эти факторы, и климатические условия начнут меняться.

Интересно, можно ли высчитать, какое воздействие оказывали микоризные грибы на мировой климат в древности? — задался я вопросом. «И да, и нет, — ответила Филд. — Я попробовала недавно». Для этого она привлекла к работе биогеохимика Бенджамина Миллза из Университета Лидса. Он работает с прогностическими компьютерными моделями, описывающими изменения климата и состава атмосферы. Компьютерные модели строят многие исследователи. Метеорологи и климатологи нуждаются в этих цифровых симуляциях для создания сценариев развития. От моделей также зависят исследователи, воссоздающие

перемены в прошлом планеты. Подставляя числа, можно опробовать различные гипотезы изменения климата Земли. Увеличим содержание углекислого газа, и к чему это приведет? А если снизить количество фосфора, которое доступно растениям? Модели не могут точно сказать, что происходило, но они могут указать на факторы, способные вызвать изменения.

До того, как Филд обратилась к Миллзу, он не включал микоризные грибы в свои расчетные модели. Миллз мог изменить количество получаемого растениями фосфора, но, если не принимать в расчет микоризные грибы, невозможно сделать реалистичный расчет фосфора, доступного растениям. Филд могла помочь. Проведя ряд экспериментов в климатических камерах, она выяснила, что результат микоризных отношений варьировался в зависимости от климатических условий. Иногда растения больше выигрывали от этих отношений, иногда — меньше. Эту особенность она назвала симбиотической эффективностью. Если растения объединяются с эффективным микоризным партнером, они получают больше фосфора и лучше растут. Филд удалось примерно рассчитать, насколько эффективным должен был быть микоризный обмен около 450 миллионов лет назад, когда уровень содержания углекислого газа в атмосфере был в несколько раз выше, чем сегодня.

Когда Миллз добавил микоризные грибы в модель, используя вычисления Филд, он обнаружил, что изменить климат на планете можно было, просто повысив или понизив симбиотическую эффективность. Количество углекислого газа и кислорода в атмосфере, а также температура — все менялось в зависимости от эффективности обмена веществами. В соответствии с данными Филд микоризные грибы могли внести существенный вклад в кардинальное снижение уровня углекислого газа, которое последовало за процветанием растений в девонский период. «Это один из тех моментов, когда вы думаете: “Ух ты! И правда!” — воскликнула Филд. — Наши результаты предполагают, что микоризные отношения сыграли роль в эволюции большей части жизни на Земле».

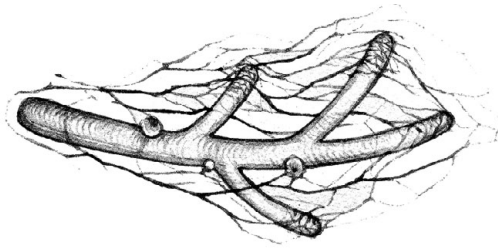
И они продолжают ее играть. В книге пророка Исаии Ветхого Завета сказано, что «всякая плоть — трава». Это утверждение вполне научно: в телах животных трава становится плотью. Однако зачем на этом останавливаться? Трава становится травой, если ее поддерживают грибы, живущие в ее корнях. Значит ли это, что вся трава — это гриб? Если вся трава — гриб и вся плоть — трава, следует ли из этого, что вся плоть — это гриб? Может быть, и не вся, но часть — точно. Микоризные грибы могут обеспечивать растениям до 80 % азота и до 100 % фосфора. Грибы поставляют им и другие необходимые питательные вещества, такие как цинк и медь. Они также обеспечивают растения водой и помогают им пережить засуху, что делали с незапамятных времен, с первых дней существования жизни. Взамен растения отдают своим микоризным партнерам вплоть до 30 % углерода, который добывают. Что именно происходит между растением и микоризным грибом в конкретный момент, зависит от того, кто участвует в отношениях. Быть растением и быть грибом можно по-разному. И по-разному могут складываться микоризные отношения: это образ жизни, который заново формировался в процессе эволюции более 60 раз в различных грибных родах, с тех пор как водоросли впервые выбрались на сушу. Как и в случае со многими характерными свойствами, возникавшими вопреки обстоятельствам не один раз — будь то способность охотиться на червей-нематод, или образовывать лишайники, или манипулировать поведением живых существ, — трудно отделаться от чувства, что эти грибы натолкнулись на стратегию, ведущую к победе.

Грибные партнеры растения могут оказать заметное воздействие на его рост — и на его плоть. Несколько лет назад, на конференции, посвященной микоризным отношениям, я встретил одного исследователя, который выращивал клубнику с разными микоризными грибами. Эксперимент был прост. Если один и тот же сорт клубники выращивать с различными видами грибов, изменится ли вкус клубники? Он проводил дегустацию вслепую и выяснил, что разные сообщества микоризных грибов действительно

меняли вкусовые свойства ягод. У некоторых из них вкус становился насыщеннее, другие делались более сочными, а третьи — более сладкими. Когда он повторил эксперимент на второй год, непредсказуемые погодные условия затушевали воздействие микоризных грибов на вкус клубники, но обнаружился ряд других поразительных эффектов. Шмелей больше привлекали цветы на клубничных кустах, выросших с одним видом микоризных грибов, и меньше — те, что выросли с другими видами. Растения, выращенные с некоторыми видами грибов, давали больше ягод, чем выращенные с другими видами. Внешний вид ягод тоже менялся в зависимости от того, с каким видом гриба состояло в партнерстве растение. Некоторые грибные сообщества придавали ягодам более приятный вид, чем другие.

Не только клубника чувствительна к личности своего грибного партнера. Большинство растений — от декоративного горшечного львиного зева до гигантской секвойи — будут по-разному развиваться в зависимости от того, с каким сообществом микоризных грибов сотрудничают. У базилика, например, меняются оттенки ароматических масел, определяющих его вкус, в зависимости от обитающего в корнях гриба. Обнаружили, что благодаря некоторым грибам помидоры становятся слаще; другие меняют основные свойства масел фенхеля, кориандра и мяты; третьи увеличивают концентрацию железа и каротиноидов в листьях салата, антиоксидантные свойства артишока или концентрацию лекарственных соединений в зверобое и эхинацее. В 2013 году группа итальянских ученых выпекла буханки хлеба из муки, пшеница для которой выращивалась с разными микоризными сообществами. В дегустации хлеба участвовали «электронный нос» и комиссия, составленная из 10 «хорошо обученных дегустаторов», прошедших профессиональную подготовку в Университете гастрономических наук в Бра, Италия. (Каждый дегустатор, как заверяли авторы эксперимента, «имел по крайней мере два года опыта в сенсорной/органолептической оценке».) Удивительно, учитывая количество промежуточных стадий между уборкой урожая зерна и дегустацией (помол, вымешивание

и выпекание, не говоря уже о добавлении дрожжей), — но и комиссия, и «электронный нос» смогли почувствовать разницу между буханками хлеба. Хлеб, выращенный с усиленным сообществом микоризных грибов, обладал «ярче выраженным вкусом» и лучшей «эластичностью и рассычатостью». Нюхая цветок, пробуя на вкус сучки, листья или кору, выпивая какое-нибудь вино, сколько еще проявлений подземного микоризного влияния на растения мы смогли бы почувствовать? Я часто задаю себе этот вопрос.



Кончик корня с микоризой

«Насколько тонким должен быть механизм, регулирующий и поддерживающий равновесие между населяющими почву организмами», — размышляла миколог Мейбл Рейнер в своей книге о микоризных отношениях «Деревья и поганки» (*Trees and Toadstools*), опубликованной в 1945 году. Разные виды микоризных грибов могут изменить вкус листа базилика или сделать ягоды клубники более привлекательными на вид. Но каким образом? Неужели одни грибы являются лучшими партнерами, чем другие? Могут ли растения и грибы отличать одних партнеров от других? Со времен публикации Рейнер прошли десятилетия, а мы только начинаем разбираться в тонкостях поведения, которые поддерживают симбиотический баланс между растениями и микоризными грибами.

Общение требует много усилий. Некоторые эволюционные психологи уверены, что большой мозг и гибкий интеллект развились у людей, именно чтобы помочь нам сориентироваться в сложных социальных ситуациях. Даже

самое незначительное взаимодействие встроено в постоянно изменяющееся социальное созвездие. В соответствии с этимологическим словарем Чемберса (*Chambers Dictionary of Etymology*) английское слово *entangle* («запутывать») изначально использовалось для описания запутанных социальных взаимодействий или вовлеченности в «сложные отношения». Только позже это слово приобрело другие значения. Мы, люди, стали такими умными — аргументируют ученые, — потому что постоянно оказывались впутанными в шквал жестких взаимодействий.

У растений и микоризных грибов нет ярко выраженного мозга или интеллекта, но жизнь они действительно ведут запутанную, и им пришлось найти способы управлять своими сложными отношениями. Действия растений объясняют, что происходит в мире восприятия их грибных партнеров. Подобным же образом поведение грибов зиждится на том, что творится в восприятии партнеров-растений. Используя информацию, поступающую от 15–20 различных анализаторов, побеги и листья растения исследуют воздух и регулируют свое поведение в соответствии с постоянными, но почти незаметными изменениями в окружающей их среде. От тысяч до миллиардов корешков исследуют почву, и каждый из них способен завязать многочисленные связи с различными видами грибов. Тем временем микоризный гриб должен вынюхивать и отыскивать источники питательных веществ, разрастаться внутри их, смешиваться с толпой других микроорганизмов — грибов ли, бактерий или каких-то других, — впитывать питательные вещества и направлять их по хаотично извивающейся сети своего тела. Информация должна быть внедрена в огромное количество отростков гиф, которые в любой отдельно взятый момент могут быть вытянуты между несколькими различными растениями и простираться более чем на десятки метров.

Тоби Кирс, профессор Амстердамского свободного университета, — одна из исследователей, что больше всех сделали, чтобы выяснить, как растения и грибы поддерживают баланс. Используя радиоактивные метки, сотрудники ее группы способны отследить движение углерода от корней

растений в грибные гифы и перемещение фосфора от грибов в корни растения. Тщательно измеряя эти потоки, она смогла описать некоторые способы управления обменом веществ со стороны обоих партнеров. Я спросил у Кирс о том, как растения и микоризные грибы ориентируются в очень требовательных и сложных социальных ландшафтах. Она рассмеялась: «Мы и вправду хотим досконально изучить сложность того, что происходит. Мы знаем, что идет обмен. Вопрос в том, сможем ли мы прогнозировать, как будут меняться его стратегии. Сложность задачи кажется непреодолимой, но почему бы не попробовать?»

Результаты Кирс удивительны, потому как предполагают, что ни растение, ни гриб не контролируют полностью свои взаимоотношения. Они могут приходиться к компромиссным решениям, совершать сделки, применять изощренные торговые стратегии. В одной серии экспериментов она выяснила, что корни растений могут отдавать предпочтение — то есть снабжать большим количеством углерода — тем разновидностям грибов, которые поставляют им больше фосфора. В свою очередь грибы, получающие больше углерода от растений, увеличивают поставки фосфора. Обмен стал в некотором смысле результатом договора между сторонами, нуждавшимися в ресурсах. Кирс выдвинула гипотезу, что «взаимовыгодность» помогала сохранять стабильность отношений между растениями и грибами на протяжении эволюции. Так как оба партнера вместе контролируют обмен веществами, ни один из них не сможет узурпировать эти отношения исключительно для своей пользы.

Хотя и растения, и грибы в общем и целом имеют тенденцию выигрывать от своих взаимоотношений, симбиотическая манера поведения у разных видов грибов и растений разная. Из некоторых грибов получают более приятные партнеры, из других — менее сговорчивые: вместо того чтобы обмениваться фосфором со своим партнером-растением, они запасают и накапливают его. Однако даже грибы-накопители могут иногда прекращать запасать фосфор. У них гибкая модель поведения — ряд непрекращающихся переговоров и сделок, зависящих от того, что

происходит вокруг них и в других частях их системы. Мы немного знаем о том, как конкретно строится их поведение, но очевидно, что в любой конкретный момент у растений и грибов есть целый ряд возможностей. А возможности означают выбор, как бы этот выбор ни делался — в уме человека, внутри бессознательного компьютерного алгоритма или чего-то между ними.

Принимают ли грибы и растения решения, пусть мозг и не участвует в этом? — задавал я себе вопрос. «Я все время пользуюсь словом “решение”, — сказала мне Кирс. — Существует несколько опций, и информация каким-то образом должна быть интегрирована, и одна из опций должна быть выбрана. Я думаю, что по большей части мы изучаем микрорешения». Выбор может происходить по-разному, по множеству сценариев. «Принимаются ли в каждом ответвлении гифы *абсолютные, самостоятельные* решения? — размышляла Кирс. — Или все это относительно? В таком случае то, что происходит, зависит, вероятно, от того, что еще творится в сети».

Заинтригованная этими вопросами, Кирс прочла работу Томаса Пикетти о неравномерном распределении материальных благ в человеческих обществах и стала думать о роли неравенства в грибных сетях. Она и ее команда предоставили одному и тому же микоризному грибу неравные запасы фосфора. У одной части мицелиевой сети был доступ к обильному источнику фосфора; другой части достались небольшие залежи. Ей хотелось посмотреть, как это повлияет на «торговые» решения гриба в разных частях. Возникло несколько вполне узнаваемых схем. В той части, где фосфора не хватало, растение платило более «высокую цену», поставляя грибу больше углерода за каждую полученную порцию фосфора. Там, где фосфора было в достатке, гриб получал углерод по менее выгодному «обменному курсу». Цена фосфора, казалось, регулировалась знакомой динамикой спроса и предложения.

Чрезвычайно удивительным было то, как гриб координировал свое «торговое» поведение по всей сети. Кирс опознала стратегию «купить дешевле, продать дороже».

Гриб активно транспортировал фосфор — используя свои динамические микроканалы — из частей сети, где он был в изобилии и где шел по низкой цене, при обмене с корнем растения в области дефицита, где спрос на него был выше и цена лучше. Благодаря этим перемещениям гриб мог переводить растению большую часть своего фосфора по более выгодному обменному курсу, таким образом получая больше углерода в ответ.

Как контролируются эти действия? Способен ли гриб выявить разницу в курсе обмена по всей своей сети и активно транспортировать фосфор, чтобы система работала? Или он всегда перемещает фосфор по сети из мест, где его много, в места, где его не хватает, иногда получая вознаграждение от растения, а иногда нет? Мы все еще не знаем этого. Тем не менее работа Кирс проливает свет на некоторые тонкости обмена между растением и грибом и демонстрирует, как рождаются решения сложных задач. Такое поведение иллюстрирует общую тенденцию. Как конкретный гриб или конкретное растение ведет себя, зависит от того, *кто* их партнер и где они находятся. Вообразите себе микоризные отношения растянутыми в пространственно-временном континууме: на одном полюсе находятся паразитирующие особи, а на другом — готовые к сотрудничеству мутуалисты. Некоторые растения выигрывают от сотрудничества со своими грибами-партнерами только при определенных условиях. Вырастите растения с большим количеством фосфора, и, возможно, они станут не так разборчивы в выборе грибного партнера. Вырастите готовые к сотрудничеству грибы рядом с другими такими же, и они могут стать менее сговорчивыми. Один и тот же гриб, одно и то же растение в разных условиях и разном окружении — результаты разные.

Один из моих коллег, профессор в Университете Марбурга, рассказал мне о скульптуре, которую видел ребенком. «Вертикальный километр» — это бронзовый шест длиной в километр, зарытый в землю. Единственная видимая часть этой скульптуры — самый ее конец — бронзовый кружок на полу, который выглядит как монета. Он описывал вы-

званное воображением головокружение, ощущение, что он плавает на поверхности океана, заглядывая в его глубины. Это событие стало истоком его увлечения корнями и микоризными грибами — на всю жизнь. Я испытываю такое же головокружение, когда думаю о сложности микоризных отношений — километрах запутанной жизни, теснящейся под моими ногами.

Голова по-настоящему начинает идти кругом, когда я пытаюсь представить себе все в масштабе от очень маленького до очень большого, от микроскопических «торговых» решений, происходящих на клеточном уровне, до всей планеты, атмосферы, трех с чем-то триллионов деревьев, живущих и растущих на Земле, и квадриллионах километров микоризных грибов, вплетающих их в свои отношения с почвой. Наш разум плохо удерживает равновесие, сталкиваясь с такими огромными числами. И все же история микоризных отношений совершает множество подобных головокружительных прыжков — от очень большого к очень маленькому и обратно.

Масштаб — серьезный вопрос в области грибных исследований. Микоризные отношения скрыты от глаз. Их сложно ощутить, увидеть или коснуться. Их недосыгаемость означает, что больше всего информации о микоризном поведении приходит из исследований, проводимых в контролируемых условиях лабораторий или теплиц. Масштабирование полученных *in vitro* результатов до реальных экосистем не всегда возможно. Чаще всего мы видим лишь крохотную часть общей картины. В результате ученые знают больше о том, на что способны микоризные грибы, чем о том, чем они действительно занимаются. Даже в контролируемых условиях трудно получить представление о поведении грибов в ту или иную минуту.

Противовес работе Кирс составляют ситуации, в которых обмен веществами между грибами и растениями не подчиняется разумным торговым стратегиям. Быть может, в нашей картине чего-то недостает? Никто не может сказать с уверенностью. Мы очень слабо представляем, как по правде происходит обмен и как он контролируется на кле-

точном уровне. «Мы стремимся изучить, как материя перемещается по сети, — сказала мне Кирс. — Мы пытаемся записать об этом видео. Там творится что-то безумное. Эта работа очень сложна. Я не удивлена, что люди предпочитают работать с другими организмами». Многие микологи разделяют это смешанное чувство волнения и отчаяния.

Существует ли другой способ осмыслить эти альянсы, остановить головокружение? Некоторые из моих коллег интуитивно находят выход микоризному энтузиазму. Некоторые из них страстные грибники. Разыскивая грибы — трюфели, белые, лисички и мацутакэ, — они спонтанно включаются в микоризные отношения. Другие часами изучают микоризные грибы под микроскопом — это примерно то же, что погружение биолога океана в морские глубины. Третьи часами просеивают почву в поисках микоризных спор — разноцветных шариков, под микроскопом блестящих, как рыба икра. Один из моих коллег в Панаме был опытным охотником за спорами. Иногда вечерами мы готовили закуску из спор, кусочков крекера и сметаны: малюсенькие крошки микоризной икры, которую приходилось готовить под микроскопом и пинцетом отправлять в рот. Нового мы узнавали мало, да это и не было целью. Это было упражнение по сохранению равновесия: мы уходили в крен, двигаясь от малого к большому. Это были редкие моменты прямого, без посредников, контакта с исследуемыми в эксперименте субъектами. Это были приятные глупости, чтобы напомнить нам, что микоризные грибы — не механизмы, не схематические величины (нельзя же съесть механизм или концепцию), а живые организмы, участвующие в жизненных процессах, которые мы все еще силимся понять.

Растения остаются самым простым способом заглянуть внутрь. Именно через растения подземная микоризная феерия чаще всего врывается в повседневную человеческую жизнь. Бесчисленные микроскопические взаимодействия, которые происходят между корнями и грибами, находят свое выражение в формах, росте, вкусе и запахе растений. Сэм Гэмджи, как и Альберт Франк, мог наблюдать результат микоризных отношений молодых деревьев сво-

ими собственными глазами: деревца «начинали давать побеги и тянуться вверх, словно время спешило вперед». Вы съедаете растение — и пробуете на вкус плод микоризных отношений. Выращиваете растения — в горшке, на клумбе, в саду или городском парке, — и культивируете микоризные отношения. Увеличьте масштаб, и микроскопические торговые сделки, заключаемые растениями и грибами, выльются в лесные популяции на всех континентах. Последний ледниковый период окончился примерно 11 000 лет назад. Когда сошел гигантский Лаврентийский ледниковый щит, обнажились миллионы квадратных километров Северной Америки. За несколько тысяч лет леса разрослись в северном направлении. Проводя анализ пыльцы, можно восстановить хронологию миграции разных видов деревьев. Некоторые из них — бук, ольха, сосна, ель и клен — двигались быстро, перемещаясь в год более чем на 100 метров. Другие — платан, дуб, береза и гикори (кария) — медленнее, покрывая около 10 метров в год.

Что же в этих различных видах деревьев определяло их реакцию на изменяющиеся климатические условия? Взаимодействие грибов и предков растений позволило им мигрировать на сушу. Могли ли микоризные отношения продолжать играть какую-либо роль в перемещении растений по планете миллионы лет спустя? Вполне возможно. Ни растения, ни грибы не переходят друг к другу по наследству. Они наследуют склонность к созданию связи, но они «проповедают» то, что, по меркам многих других древних симбиозов, является открытыми, свободными отношениями. Как и в самые первые дни жизни на суше, растения вступают в союзы исходя из того, кто находится рядом с ними. То же самое можно сказать и о грибах. Хотя это можно считать недостатком — семя растения, не обнаружившее совместимый с ним гриб, вряд ли выживет, — способность перестраивать отношения или строить новые может дать возможность партнерам своевременно реагировать на изменение условий. Работа, опубликованная в 2018 году исследователями Университета Британской Колумбии, предполагает, что скорость миграции деревьев дей-

ствительно могла зависеть от их склонности к микоризным связям. Некоторые виды деревьев ведут более свободный образ жизни и способны завязывать отношения со многими видами грибов. Когда сошел Лаврентийский ледяной щит, виды деревьев, более свободные в выборе партнеров, мигрировали быстрее, и у них было больше шансов встретить подходящий гриб, когда они оказывались в новом месте.

Грибы, обитающие в листьях и побегах растений — известные как эндофиты, — могут иметь такое же важное влияние на способность растения приживаться на новом месте. Возьмите траву с морских прибрежных соленых почв и вырастите ее без грибов-эндофитов — она не выживет в своей родной соленой среде обитания. То же самое происходит и с травами, растущими в горячих грунтах вокруг геотермальных источников. Ученые, авторы упомянутой работы, поменяли местами грибы-эндофиты, жившие в каждом виде трав: травы с морского побережья выращивались с грибами трав, растущих на геотермальных почвах, и наоборот. Изменилась на противоположную и способность трав выживать в определенных средах. Травы побережья больше не могли расти в соленых прибрежных почвах, зато процветали в горячих геотермальных грунтах. Травы из геотермальных почв не могли в них выжить, зато прекрасно развивались в соленых почвах морского побережья.

Грибы могут определить, где будет расти то или иное растение; они даже могут стимулировать развитие нового вида, изолируя популяции растений друг от друга. Остров Лорд-Хау в длину вытянут на девять километров, а в ширину — примерно на километр, и расположен он между Австралией и Новой Зеландией. На нем растут два вида пальм, произошедшие от одного и того же предка. Один вид, ховея Белмора, *Howea belmoreana*, растет на закисленных вулканических почвах, в то время как ее сестра, ховея Форстера, живет на щелочных меловых почвах. Для ботаников долго оставалось загадкой, отчего ховеи так разошлись географически. Статья, опубликованная в 2017 году исследователями Имперского колледжа Лондона, объясняет, что большую часть ответственности за это несут ми-

коризные грибы. Британские ученые обнаружили, что эти два вида пальм поддерживают отношения с двумя разными грибными общностями. Ховея Форстера способна образовывать связь с микоризными грибами, которые дают ей возможность расти в щелочной песчаной почве. Однако по этой причине ей сложно завязывать отношения с грибами, обитающими в родной для ее предков вулканической почве. Это значит, что эта пальма выигрывает только от союза с грибами, присутствующими в песчаной почве, тогда как благополучие ховеи Белмора зависит только от грибов — обитателей вулканической почвы. Со временем один вид пальм разделился на два расселившихся по двум микоризным островам, оставаясь на одном острове на карте мира.

Способность микоризных грибов и растений перестраивать свои отношения имеет глубокие последствия. Нам знаком этот предмет: в течение всей истории человечества партнерство с другими организмами расширяло возможности как человека, так и другого участника такого союза. Человеческие отношения с зерновыми привели к появлению новых форм цивилизации. Взаимоотношения с лошадьми привели к появлению новых видов транспорта. Взаимоотношения с дрожжевыми грибами — к новым видам алкогольной продукции и ее распространению. В каждом случае возможности и человека, и его партнеров, не принадлежавших к человеческому миру, определялись по-новому.

Люди и лошади остаются отдельными организмами, как растения и микоризные грибы, но и те и другие отражают тенденцию живого к созданию связей. Антропологи Наташа Майерс и Карла Хустак утверждают, что слово «эволюция», которое в буквальном переводе означает «вращаться наружу», не передает готовности организмов ко взаимному участию в жизни друг друга. Майерс и Хустак считают, что неологизм «инволюция» — от слова «вовлекать» — лучше описывает это свойство — «вращаться, катиться, заворачиваться внутрь». С их точки зрения, концепция вовлеченности лучше описывает, как организмы беспорядочно тянут и толкаются, «постоянно изобретая новые способы ужиться друг с другом». Именно стремление вмешиваться

в жизнь других позволило растениям позаимствовать корневую систему на 50 миллионов лет, пока они не создали собственную. Сегодня, когда у всех есть корни, почти все растения нуждаются в грибе — дирижере их подземной жизни. Грибы благодаря вовлеченности в жизнь других смогли устроить свои атмосферные дела за счет фотосинтезирующих водорослей. И они пользуются ими. Растения и грибы должны постоянно строить и перестраивать свои отношения. «Инволюция» постоянна и беспредельна: устанавливая связь друг с другом, все участники выходят за пределы прежних границ.

Сталкиваясь с катастрофическим изменением окружающей среды, большая часть живого начинает зависеть от способности растений и грибов приспосабливаться к новым условиям, будь то загрязненные, обеслесенные ландшафты или рукотворные среды, такие как озелененные крыши в городах. Повышение содержания углекислого газа в атмосфере и сопряженное с ним изменение климата влияют на микроскопические торговые сделки между корнями растений и грибами. Влияние условий этих сделок давно уже увеличивается в масштабе и выплескивается на целые экосистемы, целые природные массивы. В солидном труде, изданном в 2018 году, выдвигалось предположение, что «пугающее ухудшение» здоровья деревьев по всей Европе было вызвано нарушением их микоризных отношений, причиной которого стало азотное загрязнение. Микоризные связи, зародившиеся в антропоцене, определяют большую часть человеческой способности адаптироваться к резкой деградации среды. Нигде эти возможности — и ошибки — не заметны так, как в сельском хозяйстве. «От эффективности микоризной связи будет зависеть благосостояние и здоровье всего человечества», — писал Альберт Говард, основатель современного движения органического земледелия и страстный защитник микоризных грибов. В 1940-х годах Говард утверждал, что широко распространенное применение химических удобрений непременно нарушит микоризные связи, посредством которых «возникает <...> союз плодородной почвы и дерева, которое она питает». Последствия

этого нарушения будут сказываться очень долго. Перерезать эти «живые грибные нити» означает ухудшить здоровье почвы. В свою очередь обязательно пострадают здоровье и урожайность посевов, как и люди и животные, питающиеся ими. «Способно ли человечество управлять своими делами так, чтобы его главное достояние — плодородность почвы — было сохранено? — взывал Говард. — От ответа на этот вопрос зависит будущее человеческой цивилизации».

Тон Говарда патетичен, и 80 лет спустя его вопросы затрагивают суть. В какой-то степени современное промышленное земледелие вполне успешно: за вторую половину XX века урожайность зерновых удвоилась. Но сосредоточенность на повышении производительности и прибыли привела к резкому увеличению себестоимости и расходов. Промышленное земледелие стало причиной широкомасштабного разорения окружающей среды и попадания в атмосферу четверти мирового объема парниковых газов. От 20 до 40 % урожая ежегодно пропадает из-за болезней и вредителей, несмотря на колоссальные объемы пестицидов. Урожайность в мировом масштабе перестала расти, несмотря на 700-кратное увеличение объема удобрений за вторую половину XX века. Ежеминутно во всем мире из-за эрозии уничтожается верхний плодородный слой почвы площадью 30 футбольных полей. И все же треть продуктов питания выбрасывается, а спрос на урожаи зерновых должен удвоиться к 2050 году. Необходимость срочно принимать меры для борьбы с этим кризисом переоценить сложно.

Могли бы микоризные грибы отчасти решить проблему? Вероятно, это глупый вопрос. Микоризные отношения — ровесники растений, они формируют будущее Земли уже сотни миллионов лет. Они всегда были рядом, когда мы возделывали посевы, и неважно, знали ли мы о них или нет. Тысячелетиями во многих частях света традиционное сельское хозяйство поддерживало здоровье почвы, тем самым опосредованно сохраняя отношения между растениями и микоризными грибами. Но за последние 100 лет наше небрежение привело к беде. В 1940 году Говарда больше всего тревожило то, что технологии промышленного сельского

хозяйства не будут учитывать «жизнь в почве». Его опасения подтвердились. Рассматривая почву как нечто безжизненное, сельскохозяйственная деятельность разорила подземные сообщества, дающие вкус и пользу тому, что мы едим. Можно провести аналогию с медицинской наукой XX века, для которой микробы и болезнетворные бактерии были одним и тем же. Конечно, некоторые жители почвы, как и некоторые микробы нашего тела, могут вызывать недуги. Но большинство из них делают как раз обратное. Навредите микробному сообществу вашего кишечника, и ваше здоровье пострадает: возникает все больше болезней, вызванных попытками избавиться от «бактерий». Нарушите экологическое равновесие в разноперой колонии микробов в почве — кишечнике планеты, — и здоровью растений тоже будет нанесен ущерб.

В исследовании, опубликованном в 2019 году учеными из «Агроскопа» (*Agroscope*) в Цюрихе, измерили масштаб урона и сравнили воздействие на грибные сообщества в корнях сельскохозяйственных культур органического (экстенсивного) и традиционного (интенсивного) земледелия. Секвенируя ДНК грибов, авторы смогли обозначить границы систем, в рамках которых взаимодействовали разные виды грибов. Они обнаружили «заметные различия» между полями органических сельских угодий и традиционных. Там, где использовали принципы органического земледелия, микоризных сообществ не только было намного больше, но и сами грибные связи и сообщества были намного сложнее: исследователям удалось идентифицировать 27 тесно переплетенных и взаимосвязанных видов грибов, или «ключевых видов». В почве полей, где земледелие велось традиционным, интенсивным образом, не было обнаружено ни одного грибного сообщества. Во многих работах приводятся аналогичные результаты. Интенсивное земледелие, подразумевающее вспахивание и применение химических удобрений или фунгицидов, сильно сокращает количество микоризных грибов и изменяет структуру их сообществ. Земледелие более бережное — органическое или какое-либо другое — повышает разнообразие микоризных сообществ и объем грибного мицелия в почве.

Важно ли это? Большая часть истории сельского хозяйства — это история экологических жертв во имя урожая. Леса вырубаются, чтобы освободить место под пашни. Живые изгороди уничтожаются, чтобы поля становились больше. И то же самое происходит с сообществами микроорганизмов в почве. Если люди удобряют посевы при помощи химикатов, не отнимаем ли мы работу у микоризных грибов? Зачем беспокоиться о грибах, если мы «увулили» их, отказались от их обязанностей?

Микоризные грибы не только кормят растения. Ученые в «Агроскопе» описывают их как «ключевые организмы», но многие предпочитают термин «инженеры экосистем». Микоризный мицелий — это живой липкий шов, соединяющий почву воедино; уберите грибы, и землю начнет вымывать. Микоризные грибы увеличивают объем воды, который может впитать почва, сокращая на целых 50 % количество вымываемых дождями питательных веществ. Из всего углерода в почве — а его там в два раза больше, чем в растениях и в атмосфере, вместе взятых, — существенная часть заключена в твердых органических соединениях, производимых микоризными грибами. Поток углерода, попадающий в почву по микоризным каналам, поддерживает сложные пищевые сети. Помимо сотен или тысяч метров мицелия в чайной ложке здоровой почвы, там находится больше бактерий, простейших, насекомых и членистоногих, чем всех людей, когда-либо живших на планете Земля.

Микоризные грибы могут улучшить качество урожая, как демонстрировали эксперименты с базиликом, клубникой, помидорами и пшеницей. Они также могут усилить способность посевов соперничать с сорняками и увеличить их сопротивляемость болезням, подготавливая и укрепляя иммунную систему растений. Они могут сделать посевы менее уязвимыми перед засухой и жарой и более устойчивыми к засоленности почвы и тяжелым металлам. Они даже усиливают способность растений отбивать нападения насекомых-паразитов, стимулируя выработку защитных химических веществ. Список можно продолжать и дальше: в литературе полным-полно примеров тех преимуществ,

которыми микоризные отношения обеспечивают растения. Однако применять эти знания на практике не всегда просто. Во-первых, микоризные связи не всегда увеличивают урожайность посевов. В некоторых случаях они могут даже ухудшить ее.

Кейти Филд одна из многих исследователей, работа которой финансируется ради микоризных решений сельскохозяйственных проблем. «Эти взаимоотношения куда более пластичны и ориентированы на среду, чем мы предполагали, — сказала она мне. — Очень часто грибы *не* помогают растениям поглощать питательные вещества. Результаты в высшей степени непостоянны. Все зависит от типа гриба, типа растения и среды, в которой оно растет». Ряд исследователей сообщают о таких же непредсказуемых результатах. Большинство разновидностей современных культурных растений выведены без оглядки на их способность образовывать продуктивные микоризные связи. Мы вывели сорта пшеницы, растущие быстро, когда их подкармливают большим количеством удобрений, и в результате получили «избалованные» растения, почти утратившие способность сотрудничать с грибами. «То, что грибы вообще устраивают свои колонии в корнях таких злаков, — это маленькое чудо», — заметила Филд.

Тонкости микоризных отношений означают, что самая простая и очевидная мера, то есть внесение в корневую систему растений микоризных грибов и других микроорганизмов, может привести как к положительному, так и к отрицательному результату. Иногда, как мог убедиться Сэм Гэмджи, знакомство растений с колониями почвенных микроорганизмов может поддержать рост посевов и деревьев и помочь восстановить жизнь на опустошенных землях. Однако успех такого подхода зависит от экологической совместимости. Плохо подходящие для растений микоризные виды могут причинить им больше вреда, чем пользы. Что еще хуже, внедрение предприимчивых грибных видов в новую среду может привести к вытеснению местных грибных сообществ с непредсказуемыми экологическими последствиями. Это не всегда учитывается быстро развива-

ющей «микоризной» индустрией: подкормка такого рода часто преподносится как универсальное и быстродействующее средство. Как в случае стремительно растущего рынка пробиотиков для людей, многие микробные штаммы выбирают для продажи не потому, что они наиболее «полезны», а потому, что их легко производить в промышленных условиях. Даже если все продумано, внедрение в среду различных микроорганизмов может улучшить ситуацию лишь до определенного предела. Как и любому организму, микоризным грибам нужно обеспечить условия для процветания. Почвенные микробные сообщества живут «на чемоданах» и вместе оставаться долго не будут, если ход их жизни постоянно нарушается. Чтобы внедрение микроорганизмов было эффективно, требуется коренная перестройка сельского хозяйства, аналогичные изменениям в рационе и образе жизни, на которые мы пошли бы ради блага поврежденной кишечной флоры.

Другие исследователи смотрят на проблему с другого угла. Если люди по недомыслию вывели сорта зерновых, образующие непродуктивные симбиотические связи с грибами, мы наверняка можем сделать обратное и вывести зерновые, которые станут эффективными симбиотическими партнерами. Филд развивает именно это направление и надеется создать готовые к сотрудничеству разновидности растений — «новое поколение суперзерновых, которые смогут создавать потрясающие союзы с грибами». Кирс также интересуется такими возможностями, но занимает позицию грибов. Вместо того чтобы выводить более склонные к кооперации растения, она работает над созданием грибов, которые бы вели себя более альтруистично: штаммы, которые будут меньше запасать питательных веществ для себя и, возможно, даже больше заботиться о потребностях растений, чем о своих собственных.

В 1940 году Говард пророчески утверждал, что у нас нет «окончательного научного объяснения» для микоризных отношений. Толкования остаются по-прежнему далеко не полными, однако перспективы работы с микоризными грибами для преобразования сельского и лесного хозяйства и вос-

становления окружающей среды становятся все радужнее по мере усугубления экологического кризиса. Микоризные отношения возникли для преодоления жестких условий жизни на пустынной и продуваемой всеми ветрами планете в первые дни жизни на суше. Вместе растения и грибы создали некий принцип ведения сельского хозяйства, хотя сказать, кто кого научился выращивать — грибы растения или растения грибы, — практически невозможно. Как бы там ни было, мы стоим перед необходимостью изменить свое поведение, чтобы грибы и растения могли культивировать друг друга. Вряд ли мы продвинемся далеко вперед, если не пересмотрим некоторые из привычных категорий. Представление о растениях как о независимых индивидуумах с четко очерченными границами ведет к беде. «Давайте рассмотрим слепого с тростью, — писал теоретик Грегори Бейтсон. — Где начинается индивидуальность слепого? На конце трости? На рукояти? Или где-то посередине?»

Философ Морис Мерло-Понти 30 годами ранее использовал такой же мысленный эксперимент. Он пришел к выводу, что трость человека перестала быть просто предметом. Трость расширяет его ощущения и становится частью его сенсорного аппарата, чувственным протезом. Где начинается сам человек и где он заканчивается — не такой простой вопрос, как могло бы показаться с первого взгляда. Микоризные отношения ставят нас перед подобной дилеммой. Можем ли мы воспринимать растение вне связи с микоризной сетью, которая оплетает все вокруг и стремится наружу — от корней растения дальше в почву? Если мы последуем по запутанным лабиринтам мицелия, который расползается от корней растения, где мы должны остановиться? Должны ли мы думать также о бактериях, проносящихся сквозь почву по слизистой пленке, окутывающей корни и грибные гифы? Учитывать ли нам соседние грибные сети, сливающиеся с грибными сетями нашего растения? И — возможно, самое озадачивающее из всего — брать ли нам в расчет другие растения, чьи корни делят ту же самую грибную сеть?

ГЛАВА ШЕСТАЯ

«ВСЕЛЕСНАЯ ПАУТИНА»

Постепенно наблюдатель осознает, что все эти организмы связаны друг с другом не линейно, а в сетеподобное, сложно переплетенное полотно.

— АЛЕКСАНДР ФОН ГУМБОЛЬДТ

На северо-западном побережье Тихого океана леса преимущественно зеленые. Поэтому меня поразили кустики ослепительно-белых растений, пробившихся сквозь опавшую хвою. У этих растений-призраков* нет листьев. Они похожи на глиняные курительные трубки, поставленные вертикально на кончики мундштуков. Там, где должны были бы расти листья, стебли украшают чешуйки. Они вырастают в сильно затененных уголках, пробиваясь из лесной подстилки, где не сможет выжить ни одно другое растение, и собираются тесными группами, как обычно делают некоторые грибы. Ведь и вправду, если бы их не венчал цветок, можно было бы принять их за грибы. Их зовут вертляницами одноцветковыми, *Monotropa uniflora*, и это растения, делающие вид, что ими не являются.

Вертляницы давным-давно отказались от дара фотосинтеза, а с ним и от листьев и зеленого цвета. Но как? Фотосинтез — одна из древнейших особенностей растений. В большинстве случаев это обязательная характеристика

* Английское народное название растения — *ghost plant* («духово растение»). Таким прозвищем оно обязано своему прозрачно-белому цвету. Также его зовут *Indian pipe* («индейская трубка») за внешнее сходство с предметом. — Прим. изд.

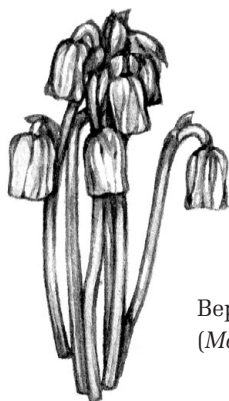
представителей растительного мира. И все же вертляница оставила ее. Представьте себе, что вы обнаружили вид обезьян, которые не едят бананы, а вместо этого собирают в шерсти фотосинтезирующие бактерии и за их счет получают энергию от солнечного света. Кардинальное отклонение от нормы.

Разгадка здесь — грибная. Вертляницы — как и большинство зеленых растений, — чтобы выжить, полагаются на своих микоризных партнеров. Но их поведение в симбиозе отличается от поведения других растений. «Нормальные» зеленые растения поставляют своим грибным партнерам богатые энергией углеродные соединения, липиды или углеводы, в обмен на минеральные вещества из почвы. Вертляницы нашли способ уклониться от обмена. Вместо этого они получают и углерод, и минеральные вещества от микоризных грибов и, кажется, ничего не дают взамен.

Тогда откуда берется углерод, который получают вертляницы? К микоризным грибам углерод поступает от зеленых растений. Это значит, что углерод, дающий энергию для жизни вертляниц и составляющий большую часть материи, из которой они состоят, должен в конечном итоге попадать к ним от других растений через общую микоризную сеть. Если бы углерод не проходил по общим грибным связям от зеленого растения к вертлянице, она не смогла бы выжить.

Вертляницы уже давно озадачивают биологов. В конце XIX столетия русский ботаник, пытавшийся понять, как эти странные растения вообще могут существовать, первым предположил, что вещества способны переходить от растения к растению по грибным связующим каналам. Идея не прижилась. Это была мимолетная догадка, затерявшаяся в малоизвестной статье, и она исчезла, не оставив и следа. Тайна вертляниц оставалась таковой еще 75 лет, пока до нее не добрался шведский ботаник Эрик Бьёркман, который ввел в деревья радиоактивные изотопы углерода и смог продемонстрировать, что радиация накапливалась в расположенных поблизости вертляницах. Это было первое доказательство того, что вещества могут перемещаться между растениями по грибным путям.

Вертяницы заманили ботаников в неисследованную область биологии. С 1980-х годов стало понятно, что вертяницы вовсе не являются аномалиями. Большинство растений свободны в своих связях и могут иметь много партнеров-грибов. Микоризные грибы также достаточно вольно относятся к своим отношениям с растениями. Отдельные грибные сети могут объединяться друг с другом. Каков же результат? Огромные, сложные, взаимосвязанные системы микоризных сетей.



Вертяница одноцветковая
(*Monotropa uniflora*)

«Тот факт, что это все соединено между собой под землей, куда бы мы ни шли, просто взрывает мозг, — восторгалась Тоби Кирс. — Она [сеть] огромна. Я поверить не могу, что ею занимаются не все». Я разделял ее чувства. Многие организмы взаимодействуют друг с другом. Если схематично изобразить, кто с кем связан, получится громадная система. Однако грибные сети образуют физические, реальные связи между растениями. Это примерно как знакомство с 20 людьми против знакомства с 20 людьми, связанными единой системой кровообращения. Эти микоризные сети — в профессиональной литературе называемые *common mycorrhizal networks* («общие микоризные сети») — воплощают главный экологический принцип взаимодействия организмов. «Сетеподобное, сложно переплетенное полотно» было метафорой, которую Гумбольдт

использовал для описания «всего живого» в природе — комплекс взаимоотношений, которыми организмы неразрывно связаны. Микоризные связи превращают и сети, и полотно в реальность.

Одним из тех, кто подхватил вслед за Бьёркманом расследование в отношении вертляниц и увлекся им, был Дэвид Рид — выдающийся британский ученый-миколог и соавтор авторитетного учебника по этому предмету. За работу над микоризными связями Рид был посвящен в рыцари и стал членом Лондонского королевского общества. Известный среди коллег в США как сэр Чувак (*Sir Dude*), Рид славится своим обаянием и остроумием; коллеги же называют его «настоящим». В 1984 году Риду и его соратникам первым удалось убедительно доказать, что углерод может поступать от растения к растению по грибным каналам связи. С 1960-х годов, когда началось изучение вертляниц, ученые выдвигали гипотезы о том, что подобный обмен может существовать. Но никому не удалось продемонстрировать, что углеводы не просачиваются в почву из корней одного растения и не впитываются из нее корнями другого. Иными словами, никто не сумел доказать, что углерод переходит непосредственно от растения к растению по грибному каналу.

Рид придумал метод, позволивший воочию убедиться в реальности переноса углерода от растения к растению. Он вырастил растения-доноры и растения-реципиенты рядом друг с другом, одни с микоризными грибами, другие без них. Через шесть недель он ввел растениям-донорам радиоактивный, меченый, углекислый газ. Затем он собрал растения и сделал рентгеновские снимки их корневых систем. Там, где не было микоризных грибов, радиация была видна только в корнях растений-доноров. Там, где грибным сетям дали возможность сформироваться, радиацию можно было увидеть в корнях доноров, в грибных гифах и в корнях растений-реципиентов. Результаты Рида произвели сенсацию. Он доказал, что трансфер углерода между растениями не был характерен только для вертляницы одноцветковой. Однако оставались и более серьезные вопросы. Рид про-

вел эксперимент *in vitro*, и ничто не указывало на то, что обмен углеродом между растениями может происходить за стенами лаборатории, в естественных условиях.

Тринадцатую годами позже, в 1997 году, канадская докторантка Сьюзан Симард опубликовала первое исследование, в котором высказывалось предположение, что растения могли передавать друг другу углерод в естественных условиях. Она подвергла воздействию радиоактивных молекул углекислого газа пары молодых деревьев в лесу. Через два года она обнаружила, что углерод передавался от берез к елям, делившим одну микоризную сеть, но не между березами и кедрами, которые не имели микоризных связей. Количество углерода, полученного елями, — в среднем 6 % меченого углерода, полученного березой, — Симард считала значимым: можно было ожидать, что со временем это количество углерода изменит жизнь деревьев. Более того, оказавшись в тени — это уменьшало объем фотосинтеза и сводило на нет запасы углерода, — ростки ели начинали получать больше углерода от доноров-берез, чем тогда, когда находились на солнце. Углерод, будто под горку, перетекал между растениями — от избытка к дефициту.

Открытие Симард поразили многих. Ее работу принял журнал *Nature*, и редактор обратился к Риду с просьбой написать отзыв. В своей статье «Связующие узы» (*The Ties That Bind*) Рид высказывал мысль о том, что изыскания Симард «мотивируют нас исследовать лесные экосистемы с совершенно новой позиции». На обложке журнала была напечатана крупным шрифтом фраза, которую Рид придумал во время беседы с редактором журнала: «Вселенная паутина» (*Wood Wide Web*).

До появления исследований Рида, Симард и других авторов в 1980–1990-х годах растения воспринимали как более или менее самостоятельные величины. Давно было известно, что корни одного дерева иногда сливаются с корнями другого, то есть имеет место своего рода прививка. Однако это считалось явлением маргинальным, и большинство растительных сообществ представлялись состоящими из самостоятельных растений, соперничающих друг

с другом за источники питания. Открытия Симард и Рида заставляли задуматься о том, что считать растения такими уж самостоятельным не стоит. Как писал Рид в своей заметке в журнале *Nature*, вероятность того, что ресурсы передаются между растениями, наводит на мысль, что «нам следует скорее ориентироваться на распределение ресурсов внутри растительного сообщества, а не сосредоточиваться на конкуренции между отдельными растениями».

Симард опубликовала свои результаты в очень важный для развития современной «сетевой» науки момент. Сеть кабелей и роутеров, образующая глобальную паутину, расширяется с 1970-х годов. Интернет как система веб-страниц и переходов между ними стал возможным благодаря особому оборудованию в 1989 году; он стал общедоступен двумя годами позже. Когда Национальный научный фонд США отказался от управления интернетом в 1995 году, тот начал разрастаться бесконтрольно и оказался лишен центра. Как объяснил мне Альберт-Ласло Барабаш, специалист по «сетевым» наукам, «именно в 1990-х годах сети стали проникать в общественное сознание».

В 1998 году Барабаш с коллегами предпринял попытку нанести на карту всемирную паутину. До этого момента у ученых не было методов анализа структуры и свойств сложных сетей, хотя они и преобладают в жизни людей. В рамках раздела математики, ответственного за моделирование сетей, — теории графов — нельзя описать поведение большинства сетей в реальном мире, и многие вопросы так и повисли в воздухе. Почему эпидемии и компьютерные вирусы распространяются так быстро? Почему некоторые сети продолжают функционировать, несмотря на массовые нарушения? Благодаря исследованию всемирной паутины, проведенному Барабаш, появились новые математические методы и инструменты. Оказалось, что широкий диапазон сетей, от половых отношений человека до биохимических взаимодействий внутри организмов, управляется несколькими ключевыми принципами. Всемирная паутина, как заметил Барабаш, «имеет больше сходства с экосистемой или системой клеток, нежели со швейцарскими часами».

Сегодня невозможно скрыться от сетевой науки. Выберите любую научную область — от неврологии, биохимии, экономики, теории эпидемий, алгоритмов поисковых систем или машинного обучения, на которых основан ИИ, до астрономии и науки о Вселенной, космической сети, испещренной линиями газов и звездными скоплениями. Вполне возможно, и она использует сетевую модель, чтобы разобраться в предмете.

Как объяснил мне Рид, вдохновленный статьей Симард и побуждаемый такой привлекательной концепцией «вселенной паутины», «понимание общих микоризных сетей безмерно расширилось», попав в конечном итоге в фильм «Аватар» Джеймса Камерона. Если помните, там фигурировала сияющая живая сеть, которая объединяла под землей все растения. Работы Симард и Рида подняли ряд новых волнующих вопросов. Что еще, помимо углерода, может передаваться между растениями? Насколько распространено это явление в природе? Может ли влияние этих сетей распространиться на целые леса или экосистемы? И что они меняют?

Никто не отрицает, что общие микоризные сети широко распространены в природе. Они неизбежны, учитывая свободные нравы растений и грибов, а также готовность микоризных сетей сливаться друг с другом. Однако не все убеждены в том, что они приносят какую-либо существенную пользу.

С одной стороны, после статьи Симард 1997 года в журнале *Nature* многие исследователи попробовали оценить трансфер веществ между растениями. Эксперименты показали, что кроме углерода по грибным сетям могут проходить азот, фосфор и вода в значительных количествах. В работе 2016 года приводилась информация о том, что между деревьями по грибным каналам может переноситься 280 килограммов углерода на гектар леса, то есть 4 % всего углерода, забираемого из атмосферы тем же гектаром леса за год. Этого достаточно, чтобы снабжать энергией и теплом дом средних размеров в течение недели. Эти выводы указывают на то, что общие микоризные сети играют важную экологическую роль.

С другой стороны, ряду исследователей не удалось зафиксировать трансфер веществ. Само по себе это не значит, что микоризные сети не играют никакой роли: только начавшему развиваться ростку, который сумел «подключиться» к большой наличной грибной сети, не понадобился бы углерод для выращивания с нуля собственной микоризной сети. Тем не менее не стоит использовать универсальный подход к разным экосистемам или разным типам грибов. Представляется, что во многих ситуациях общая микоризная система делает для каждого из своих растений-партнеров не больше, чем сделал бы один — «частный» — микоризный партнер.

Вполне естественно ожидать от общих микоризных сетей нестабильного поведения. Существует много разных типов микоризных отношений, и разные группы грибов могут вести себя совершенно по-разному. Более того, поведение симбионтов внутри союза гриба и растения может меняться в зависимости от обстоятельств. И все же разнородность экспериментальных данных породила разнобой мнений в исследовательском сообществе. С точки зрения некоторых, имеющаяся информация свидетельствует, что общие микоризные сети делают возможными особые формы взаимодействия и могут оказать глубокое влияние на состояние экосистем. Другие исследователи трактуют имеющиеся результаты иначе и приходят к выводу, что общие микоризные сети не создают уникальных экологических возможностей. Для растений же они не важнее, чем общее корневое или воздушное пространство.

Вертяницы помогают не погрязнуть в этих спорах. На самом деле они, оказывается, эти споры разрешают, ведь их зависимость от общих микоризных сетей абсолютна. Я обсудил этот предмет с Ридом, который занял недвусмысленную позицию: «Мысль о том, что трансфер веществ между растениями по грибным каналам ничего не значит, заведомо абсурдна». Вертяницы — постоянные потребители, яркое, живое доказательство того, что общие микоризные сети могут обеспечить уникальный образ жизни. Они относятся к так называемым микогетеротрофам.

«Мико-», потому что зависят от грибов, доставляющих им питание; «гетеротрофы» (дословно — «питающийся за счет другого»), потому что сами они не преобразуют солнечный свет в энергию и должны раздобыть ее в другом месте. Не очень приятное название для таких харизматичных растений. В Панаме я дал им кличку «микогеты», хотя, признаю, это немногим лучше.

Вертляница и войрия, или растение-призрак, не единственные поклонницы такого образа жизни. Так же живут примерно 10 % видов растений. Подобно отношениям внутри лишайника и микоризным связям, микогетеротрофия является эволюционным рефреном и возникла независимо в процессе эволюции у по крайней мере 46 родов растений. Некоторые микогеты, такие как вертляницы и войрии, фотосинтезом не занимаются. Другие ведут себя как микогеты в молодости, но, взрослея, превращаются в доноров и начинают фотосинтезировать. Такой подход Кейти Филд назвала «берете сейчас, платите потом». Как Рид указал в разговоре со мной, *все* 25 000 видов орхидей — самое большое и, пожалуй, самое процветающее растительное семейство на поверхности Земли — являются микогетами на определенном этапе своего развития, берут ли они сейчас и платят потом или берут сейчас и продолжают брать потом. То, что микогеты научились раз за разом «взламывать сеть и подключаться к ней» ради собственной пользы, говорит о том, что это, вероятно, не такой уж и сложный трюк. И вправду для Рида и ряда других ученых микогеты — неизолированная категория. Они находятся на крайнем полюсе симбиотического континуума; потребители, потерявшие способность отдавать. Орхидеи, берущие сейчас и платящие потом, находятся где-то ближе к центру, как и ростки ели, изучаемые Симард.

Микогеты поразительны. Броские, ни на что не похожие, они выделяются из окружающей их растительности. Не имея причины быть зелеными или обзаводиться листьями, они свободны и могут позволить эволюции нести их в новых эстетических направлениях. Существует пол-

ностью желтая разновидность войрии. Снежный цветок — саркодес кроваво-красный (*Sarcodes sanguinea*) — «подобен пылающему огненному столбу», как писал американский натуралист Джон Мьюр в 1912 году. Им «восхищаются больше, чем любыми другими [растениями] в Калифорнии <...>. Его цвет напоминает нам о нашей собственной крови». (Мьюр размышлял о «тысячах невидимых струн», связывающих Природу в единое целое, но не мог знать, что в случае саркодеса так оно и было.) Крохотные как пылинки семена войрии поразили меня, когда я увидел под микроскопом, как они набухают, превращаясь в мясистые узелки. Марк-Андре Селосс, лектор в Национальном музее естественной истории в Париже, рассказал мне, что его пожизненное увлечение симбиозом зародилось именно тогда, когда он, 15-летним подростком, увидел ослепительно-белую орхидею-микогетеротрофа. Она напомнила, насколько неразделимы жизни растений и грибов. «Воспоминание об этом растении остается со мной на протяжении всей научной карьеры», — заметил он с нежностью.

Меня микогеты интересуют из-за того, на что указывают в подземной жизни грибов. Среди всего буйства растительной жизни в джунглях только войрии были верным признаком действующей общей грибной сети; именно взламывая «вселесные паутины» и подключаясь к ним, микогеты способны выжить. Войрия позволила мне, не прибегая к трудновыполнимым экспериментам, вычислить, переносится ли между растениями достаточное количество углерода. Идея пришла мне в голову во время разговора с друзьями-грибниками из Орегона, собиравшими грибы мацутаке. Мацутаке — микоризный гриб, плодовые тела которого иногда собирают еще до того, как они выглянут наружу из лесной подстилки. Часто имеется подсказка, указывающая на место, где их стоит искать. Мацутаке устанавливают связи с микогетом — кузенном вертляницы, стебель которого в красно-белую полоску напоминает сладкую карамельную тросточку. Это *Allotropa virgata*, аллотропа прутьевидная. Аллотропа устанавливает отношения только с мацутаке, и их присутствие — такой же явный признак процветания

мацутаке, как и сами мацутаке. Аллотропа служит перископом, через который можно проникнуть взглядом в микоризные подземные владения.

И здесь можно бы предположить, что микогеты станут с годами восприниматься как индикаторы. Если аллотропы буквально указывают охотникам за мацутаке, где расположены подземные сети этих грибов, вертляницы служат биологам индикатором более крупной общности. Лишайники стали призмой для изучения симбиоза в целом; вертляницы же — для изучения общих микоризных сетей. Их специфическая внешность приводила к заключению о том, что материя может передаваться между растениями по общим грибным каналам в достаточном количестве, чтобы поддерживать нестандартный образ жизни. Во всех системах энергия течет «под уклон» — от места, где ее больше, к месту, где ее меньше. Тепло идет от горячего Солнца в холодный космос. Запах трюфеля плывет по воздуху от зоны высокой концентрации к зоне более низкой. Ни то, ни другое не нужно перемещать насильственно. Пока существует такой «уклон», энергия будет течь от источника на вершине к подножию. Самое большое значение имеет крутизна склона.

Во многих случаях ресурсы по микоризным сетям идут «под уклон», от более крупных растений к более мелким. У более крупных растений обычно ресурсов больше, у них более развитая корневая система и больше доступа к свету. По отношению к более мелким растениям, растущим в тени, имеющим менее развитую корневую систему, эти растения являются донорами. Более мелкие растения — реципиенты. Орхидеи, берущие сейчас, а платящие позднее, начинают как реципиенты, а повзрослев, становятся донорами. Микогеты, такие как вертляницы и войрии, всегда остаются реципиентами.

Размер не всегда важен. Вектор движения от донора к реципиенту может поменяться на противоположный в зависимости от активности связанных друг с другом растений. Когда Симард затенила свои ростки елей, снизив их способность к фотосинтезу и таким образом акцентировав функцию реципиентов углерода, они стали получать

больше углерода от своих доноров-берез. В других случаях исследователи наблюдали переход фосфора из корней умирающих растений к корням растущих поблизости здоровых побегов, разделяющих единую грибную сеть. Умирающие растения становились донорами питательных веществ, а здоровые растения — реципиентами.

В другом исследовании, проводившемся в канадских лесах на березах и Дугласовых пихтах, направление перемещения углерода менялось на противоположное *дважды* за один вегетационный период. Весной, когда пихта — вечнозеленое растение — фотосинтезировала, а на безлистной березе только начинали лопаться почки, береза вела себя как реципиент, и углерод тек от пихты к ней. Летом, когда береза была вся покрыта листьями, а пихта оказалась в затененном подлеске, направление течения углерода изменилось опять, и он устремился под уклон от березы к пихте. Осенью, когда береза начала сбрасывать листву, деревья опять поменялись ролями, и углерод потек под уклон от пихты к березе. Ресурсы переходили из областей изобилия в области дефицита.

Такое поведение представляется загадкой. В своей основе проблема состоит в следующем: зачем растениям отдавать ресурсы грибу, который затем передаст их соседнему растению — потенциальному конкуренту? На первый взгляд это кажется альтруизмом. Теория эволюции не очень хорошо ладит с альтруизмом, потому что альтруистическое поведение идет на пользу реципиенту и во вред донору. Если растение-донор поможет конкуренту себе в ущерб, у его генов будет меньше вероятности попасть к его потомкам, к следующему поколению. Если гены альтруиста не попадут в следующее поколение, такое поведение будет вскоре «вырвано с корнем».

Существует множество способов выйти из тупика. Можно предположить, что для доноров расходы в действительности таковыми не являются. Многим растениям доступно очень много света. Для них углерод — ресурс неограниченный. Если избыток углерода одного растения поступает в микоризную сеть, где им пользуются многие, затрат на альтруизм

можно избежать, так как никто — ни донор, ни реципиент — не терпит убытков. Другая возможность состоит в том, что выигрывают оба — и отправитель, и получатель, — но в разное время. Орхидея может «взять сейчас», но если она «заплатит потом», то никто не понесет затрат. Береза может выиграть весной, когда получает углерод от пихты, но пихта, конечно же, выиграет от получения углерода от березы в высокий сезон, когда окажется в затененном подлеске.

Существуют и другие соображения. С точки зрения эволюции, растение может оказаться в выигрыше, помогая близкому родственнику передавать следующему поколению свои гены даже в ущерб самому себе, — явление, известное как родственный отбор. Некоторые исследователи изучали такую возможность, сравнивая количество углерода, переходящее между парой ростков Дугласовой пихты, являвшихся родственниками, и парой ростков, не связанных родством. Как и можно было ожидать, углерод тек от большего растения-донора к меньшему растению-реципиенту. Однако в некоторых случаях между родственными растениями проходил больший объем углерода, чем между чужаками: растения-родственники пользовались большим количеством грибных каналов связи, чем посторонние растения, обеспечивая углероду больше путей передвижения между ними.

Самый быстрый способ разгадать головоломку — кардинально изменить точку зрения. Вы непременно заметите, что во всех этих историях об общих микоризных сетях главным действующим лицом выступали растения. Грибы в них фигурировали лишь постольку, поскольку они соединяют растения и служат проводниками между ними. Они стали чем-то чуть более значимым, чем система водопроводных труб, которой растения могут воспользоваться для перекачивания веществ между собой.

Это «растениецентризм» в действии. «Растениецентричный» взгляд на мир может исказить реальность. Когда больше внимания уделяется животным, чем растениям, это способствует тому, что мы перестаем видеть растения. Обращая больше внимания на растения, чем на грибы,

мы перестаем видеть грибы. «Мне кажется, многие слишком конкретизируют вопрос об этих сетях, — сказал мне Селосс. — Некоторые говорят, что деревья пользуются социальной защитой, “пенсией”, описывают жизнь молодых деревьев в питомниках и рассказывают о том, что жизнь проще и “дешевле” для деревьев, живущих группами. Мне не очень нравится подобный взгляд, потому что он изображает грибы трубопроводом. А это не так. Гриб — живой организм с собственными интересами. Он активный участник системы. Многие люди придерживаются сугубо растениецентричного взгляда на микоризную сеть, возможно потому, что растения проще изучать, чем грибы».

Я разделяю это мнение. Конечно же, мы скатываемся до растениецентризма, потому что значение растений для нашей жизни более очевидно. Мы можем коснуться их и попробовать. Микоризные грибы уклончивы. Язык «всеелесной паутины» не помогает. В таком контексте растения являются эквивалентами веб-страниц, а грибы — это гиперссылки, соединяющие их друг с другом. Растения — это роутеры, а грибы — оптоволоконные кабели.

На самом деле грибы — далеко не пассивные проводники. Как мы уже видели, мицелиевые сети могут решать сложные пространственные проблемы и развили в себе тонко настроенную способность переносить вещества. Хотя вещества склонны течь по грибным сетям «под уклон», от донора к реципиенту, транспортировка редко происходит только путем диффузии: это слишком медленно. Реки клеточных жидкостей, которые текут по грибным гифам, ускоряют транспортировку, и хотя эти потоки в целом управляются динамикой движения от донора к реципиенту, грибы могут направлять поток, выращивая, уплотняя и кушируя части сети — то есть объединяясь, сливаясь полностью с другими сетями. Без способности регулировать поток, проходящий по их сетям, большая часть жизненных циклов грибов, включая и сложную хореографию выращивания плодовых тел, была бы невозможна.

Грибы способны управлять транспортировкой веществ в своих сетях и по-другому. Как предполагает Кирс в своем

исследовании, грибы в какой-то степени могут контролировать свои «торговые» отношения — «награждая» более склонных к сотрудничеству партнеров среди связанных с ними растений, или накапливая минеральные вещества в своих тканях, или перемещая ресурсы ради оптимального «обменного курса». В работе Кирс по распределению ресурсов фосфор перемещался по градиенту от областей, где он был в избытке, к областям, где его не хватало, однако происходило это передвижение намного быстрее, чем при обычной диффузии, — вероятно, грибом были задействованы микроканальные «двигатели». Эти активные системы транспортировки позволяют грибам доставлять вещества в различные части своей сети в любом направлении, иногда в обе стороны одновременно независимо от «уклона» между донором и реципиентом.

«Вселесная паутина» — метафора, не совсем верно отражающая реальность и по другим причинам. Мысль о существовании единственного вида такой паутины вводит в заблуждение. Грибы создают сложно переплетенные паутины-сети независимо от того, связывают ли они между собой растения или нет. Общие микоризные сети — случай особый — грибные сети, в которые оказываются вовлечены растения. Экосистемы пронизаны паутинами мицелия немикоризных грибов, соединяющими различные организмы. Гнилостные грибы, которые изучает Линн Бодди, например, странствуя по экосистемам, распространяются на большие расстояния и соединяют тронутые гниением листья с упавшими сучьями, большие гниющие пни — с разлагающимися корнями. То же можно сказать и о мицелиевых сетях опенка обыкновенного, рекордсменах по размаху, вытягивающихся на километры. Эти грибы создают «вселесные паутины» другого рода — паутины, в основе которых лежит не обеспечение питанием растений, а употребление в пищу их самих.

Связующий элемент во «вселесных паутинах» — это гриб, живущий собственной жизнью. Эта ремарка существенно меняет дело. Когда мы начинаем воспринимать грибы как активных участников, все становится другим. Включение грибов в сюжет заставляет нас рассматривать

ситуацию с позиции грибов. Такой взгляд очень полезен, когда задаешься вопросом, в чьих интересах используются общие микоризные сети. Кто от этого выигрывает?

Микоризный гриб, поддерживающий жизнь в связанных с ним разнообразных растениях, несомненно, в выигрыше: разнообразие портфолио растений-партнеров служит ему гарантией в случае гибели одного из них. Если гриб зависит от нескольких орхидей, а одна из них не в состоянии обеспечивать его углеродом, пока не повзрослеет, гриб выиграет, поддерживая молодую орхидею, пока она растет, — позволяя ей «брать сейчас» при условии, что она «заплатит потом». Принимая микоцетрическую позицию, можно избежать проблемы с альтруизмом. Это отношение также делает гриб центральной фигурой — брокером сложно переплетенных отношений, способным посредничать во взаимодействиях растений, не забывая при этом о своих собственных, грибных, потребностях.

Независимо от того, принимаем ли мы позицию грибов или позицию растений, во многих ситуациях растения, вовлеченные в микоризные сети, получают явные преимущества: в целом растения, делящие единую сеть с другими, растут быстрее и выживают в сложных условиях лучше, чем соседние растения, исключенные из общей сети. Эти открытия вдохновили появление концепции «вселесных паутин» как мест заботы, взаимопомощи и совместного хозяйства, благодаря которым растения могут освободиться от жестких иерархических условий конкуренции за источники питания. Эти представления имеют много общего с фантазиями об интернете эпохи 1990-х: энтузиасты с сияющими взорами грезили о том, что всемирная паутина спасет от жестких властных структур XX века и введет человечество в цифровую утопию.

Экосистемы, как и человеческие общества, редко бывают столь одномерными. Некоторые исследователи, такие как Рид, считают, что утопические представления о почве являются бесстыдным переносом человеческих ценностей на другие системы, не имеющие отношения к человеческим; другие, такие как Кирс, утверждают, что утопиче-

ские взгляды оставляют без внимания многочисленные ситуации, когда сотрудничество — сплав конкуренции и кооперации. Главная проблема для сторонников микотопий заключается в том, что, как и интернет, общие микоризные сети не всегда приносят пользу. «Вселесные паутины» — мощные усилители взаимодействий растений, грибов и бактерий.

Большая часть исследований, обнаруживших, что растения выигрывают от участия в общих микоризных сетях, проводились в зонах умеренного климата на деревьях, которые устанавливают отношения с определенным типом микоризного гриба — «эктомикоризными» грибами. Другие типы микоризных грибов могут вести себя иначе. В некоторых случаях растению, кажется, безразлично, есть ли у него своя собственная грибная сеть или оно делит грибную сеть с другими растениями — хотя в таких ситуациях гриб все же получает преимущества от формирования общей сети, так как получает доступ к большему количеству растений-партнеров. Иногда участие в общей сети наносит растению откровенный вред. Грибы контролируют поставки минеральных веществ, которые они добывают из почвы, и они могут предпочесть обменивать их на углерод у более крупных растений, которые одновременно и являются более богатыми источниками углерода, и способны принять больше минеральных веществ из почвы. Такое неравномерное распределение может усилить преимущества больших растений по сравнению с более мелкими, разделяющими одну и ту же сеть. В подобных ситуациях более мелкие растения оказываются в выигрыше только тогда, когда их связь с общей сетью разорвана или когда число более крупных растений, участвующих в общей сети — и получающих непропорционально большие количества питательных веществ, — сокращается.

Участие в общих микоризных сетях может иметь и более неоднозначные последствия. Ряд растений вырабатывает химические вещества, которые останавливают рост или убивают растущие поблизости растения. В обычных условиях перемещение таких веществ в почве проходит медлен-

но. И они не всегда достигают токсической концентрации. Микоризные сети могут способствовать преодолению этих недостатков, иногда предоставляя «грибную скоростную полосу» или «сверхскоростную трассу» растениям, распространяющим ядовитые отпугивающие вещества. Во время одного эксперимента токсичное соединение из опавших листьев грецкого ореха прошло по микоризной сети и скопилось вокруг корней томатов, снизив скорость их роста.

Иными словами, «вселесные паутины» выполняют значительно больше функций, чем перенос ресурсов — богатых ли энергией углеродных соединений, питательных ли веществ или воды. Кроме ядов, по общим микоризным сетям могут перемещаться регулирующие рост и развитие растений гормоны. У многих видов грибов содержащие ДНК ядра и другие генетические элементы, такие как вирусы или РНК, свободно путешествуют по мицелию, что позволяет предположить, что генетический материал может передаваться между растениями по грибным каналам — хотя эти возможности почти не изучены.

Одно из самых удивительных свойств «вселесных паутин», — то, как они охватывают другие организмы помимо растений. Грибные сети обеспечивают бактериям трассы, по которым они могут обойти полосу препятствий почвы. В некоторых случаях хищные бактерии используют мицелиевые сети для преследования своей добычи и охоты на нее. Некоторые бактерии селятся внутри самих грибов и ускоряют рост грибов, стимулируют их метаболизм, снабжают витаминами и даже влияют на отношения грибов с их партнерами-растениями. Один из видов микоризных грибов, сморчок толстоногий (*Morcella crassipes*), на самом деле занимается разведением бактерий: гриб «сажает» популяции бактерий, выращивает их, собирает их урожай и поглощает его. В сети происходит разделение труда: некоторые части грибной системы отвечают за производство пищевых продуктов, а другие — за их потребление.

Существуют еще более экстравагантные возможности. Растения выделяют всевозможные химические вещества. К примеру, когда на кормовые бобы нападает тля, они вы-

пускают шлейфы летучих соединений, которые медленно выплывают из ранок и привлекают паразитирующих ос-наездников, которые охотятся на тлю. Эти «инфохимикаты» — названием они обязаны тому факту, что сообщают о состоянии растения, — один из способов общения растений как с разными частями своего тела, так и с другими организмами.

Могли ли бы «инфохимикаты» переходить от растения к растению под землей по общим грибным сетям? Этот вопрос увлек Люси Гилберт и Дэвида Джонсона, тогда работавших в Университете Абердина в Шотландии. Чтобы найти ответ на этот вопрос, они провели хорошо продуманный эксперимент. Кормовым бобам либо давали возможность подсоединиться к общей микоризной сети, либо не позволяли сделать это с помощью мелкоячеистой нейлоновой сетки. Сетка не мешала воде и химикатам проходить, но не давала грибам, соединенным с разными растениями, вступать в прямой контакт. Как только бобы выросли, тля позволила напасть на листья одного из растений в сети. Полиэтиленовые мешки, закрывавшие растения, мешали им передавать «инфохимикаты» по воздуху.

Гилберт и Джонсон получили явное подтверждение своей гипотезе. Бобовые растения, соединенные с зараженным тлей растением через общую грибную сеть, увеличили производство летучих защитных соединений, хотя сами они не подвергались нападению тли. Шлейфы летучих соединений, выпущенные растениями, были достаточно велики, чтобы привлечь ос-наездников. Это позволяет предположить, что информация, проходящая по грибным каналам между растениями, могла вызвать изменения в реальной природной обстановке. Гилберт назвала это в разговоре со мной «совершенно новым» изысканием. Оно раскрыло ранее неизвестную функцию общих микоризных сетей. Растение-донор не только могло воздействовать на растение-реципиента, но его влияние могло выйти за пределы принимающего растения в виде летучих химических соединений. Общая микоризная сеть оказывала влияние не только на отношения между двумя растениями, но также на

отношения между этими растениями, их вредителями-глями и их союзниками-осами.

В 2013 году стало понятно, что результат, полученный Гилберт и Джонсоном, не является аномалией. Подобное явление наблюдали, когда томаты подверглись нападению гусениц, а также между Дугласовой пихтой и ростками сосны, когда на них напали листовертки-почкоеды. Эти исследования открывают новые удивительные возможности. Многие из ученых, с которыми я разговаривал, разделяют мнение, что передача информации растениями через грибные сети — один из самых захватывающих аспектов поведения микоризы. Тем не менее хорошие эксперименты поднимают больше вопросов, чем находят ответов. «На что же в реальности реагируют растения и что на самом деле *делает* гриб?» — размышлял Джонсон.

По одной из гипотез, «инфохимикаты» поступают от растения к растению по общим грибным сетям. Это кажется вполне вероятным, учитывая, что растения, как известно, используют химические вещества для передачи информации над землей. Другой интригующей возможностью являются электрические импульсы, проходящие по грибным гифам. Как обнаружили Стивен Олссон и его коллеги нейробиологи, мицелий некоторых грибов — включая и мицелий микоризных грибов — может проводить всплески электрической активности, чувствительные к стимуляции. Растения также используют электрические сигналы для передачи информации в разные части своего организма. Никто не исследовал, может ли электрический сигнал проходить от растения к грибу и от гриба к растению, хотя это не так уж и невозможно. Тем не менее Гилберт твердо стоит на своем: «Мы не знаем. То, что эти сигналы вообще существуют, — настоящее открытие. Мы в самом начале новой эпохи исследований». Для нее приоритетом является определение природы сигнала. «Не зная, на что реагируют растения, мы не можем ответить на вопросы о том, как сигнал контролируется или как он в действительности посылается».

Нужно еще столько обнаружить. Если информация может проходить по грибным сетям, объединяя малень-

кие кормовые бобы, растущие в горшках в теплице, что же происходит в природных экосистемах? По сравнению с бесчисленными толпами химических подсказок и сигналов, дрейфующих по воздуху между растениями, насколько важную роль играют грибные пути? Как далеко может проникнуть путешествующая под землей по грибным сетям информация? Джонсон и Гилберт проводят эксперименты, во время которых они соединяют несколько растений в «гирляндную цепь», чтобы посмотреть, может ли информация передаваться от одного растения к другому, затем к третьему ретрансляцией. Экологические последствия могли бы быть глубокими, однако Джонсон осторожен. «Внезапно увеличить масштаб лабораторных открытий и перенести их на целые леса, представив, что деревья в них разговаривают и обмениваются между собой информацией, — для меня чересчур, — сказал он мне. — Люди спешат экстраполировать результаты исследований горшечного растения на целую экосистему».

Что именно проходит по грибным сетям между растениями, вопрос нелегкий для всех ученых, исследующих «вселесные паутины». И именно недостаток знаний заводит в некоторые концептуальные тупики. Например, не зная, как информация передается между растениями, невозможно определить, «отправляют» ли действительно растения-доноры послания-предупреждения об опасности или растения-реципиенты просто подслушивают тревожные сигналы своих соседей. В сценарии с подслушиванием нет ничего, что можно было бы признать намеренным поведением со стороны отправителя. Как объяснила Кирс, «если на дерево напало насекомое, конечно, оно будет кричать на своем языке: оно будет выделять какое-нибудь химическое вещество, чтобы подготовиться к нападению». Эти химические вещества вполне могут выплеснуться на другое растение, пройдя через сеть. Активно ничего не посылается. Растение-реципиент просто случайно замечает то, что происходит. Джонсон использует ту же аналогию. Если мы слышим, как кто-то кричит, это не означает, что кричат, чтобы предупредить нас о чем-то. Конечно, крик может

заставить нас изменить свое поведение, но он не указывает на какое-либо намерение со стороны кричащего: «Вы просто подслушиваете их реакцию на конкретную ситуацию».

Это может показаться казуистикой, но многое зависит от того, как мы понимаем взаимодействие. В любом случае раздражитель переходит от одного растения к другому, позволяя растению-реципиенту подготовиться к нападению. Тем не менее если растения действительно посылают сообщение, мы бы восприняли его как сигнал тревоги. Если же их соседи подслушивают, мы бы рассматривали эту информацию как подсказку. Как конкретно интерпретировать поведение общей микоризной сети — предмет щепетильный. Некоторых исследователей беспокоит то, как обычно изображают «вселесные паутины». «Одно то, что мы обнаружили, что растения могут реагировать на информацию, поступающую от их соседей, — сказал мне Джонсон, — еще не означает, что существует и действует какая-то альтруистическая сеть взаимопомощи». Мысль о том, что деревья переговариваются друг с другом, предупреждая о надвигающейся опасности — это антропоморфное заблуждение. «Очень заманчиво представлять себе такую картину, — признал он, — но в конечном итоге это полная чушь».

Образ кричащего человека не очень полезен. Эту метафору можно использовать как для иллюстрации одной точки зрения, так и противоположной ей. Люди кричат, когда они попали в беду, поражены, взволнованы или им больно. Люди также кричат, чтобы другие узнали об их бедственном положении. Не всегда просто распутать этот клубок и отделить причину от следствия, даже если сразу спросить об этом терпящего бедствие человека. С растениями еще сложнее. Возможно, задавать трудный вопрос о том, предупреждают ли растения друг друга о нападении тли или соседи пострадавшей особи просто случайно подслушали ее химические вскрики, неправильно. Как заметила Кирс: «Разбираться нужно с историями, которые мы рассказываем. Мне бы действительно хотелось перейти от изложения к пониманию самого явления». И опять же,

возможно, полезнее было бы задать в первую очередь вопрос о том, почему такое поведение сложилось в процессе развития: кто в выигрыше?

Кормовой боб-реципиент, несомненно, выигрывает от предупреждения об опасности: к тому моменту, когда тля до него доберется, он уже успеет активировать свои средства защиты. Но какую пользу это принесет бобу, посылающему сигнал тревоги, чтобы предупредить своих соседей? Мы снова натываемся на проблему альтруизма. И опять самым быстрым выходом из лабиринта является кардинальное изменение точки зрения. Почему *гриб* может оказаться в выигрыше, проводя по своей сети предупреждение об опасности растениям, с которыми он живет?

Если гриб соединен с несколькими растениями и на одно из них нападает тля, гриб пострадает не меньше растения. Если целая группа растений войдет в состояние сильнейшей тревоги, они выпустят большой шлейф летучих химических веществ, призывающих ос-наездников, чем сможет одно растение. Любой гриб, способный усилить химический сигнал тревоги, выигрывает от этой способности — конечно, растения тоже окажутся в выигрыше, при этом не неся никаких расходов. Подобным же образом, когда сигнал бедствия поступает от больного растения к здоровому, именно гриб выигрывает от того, что помогает выжить здоровому растению. «Вообразите, что вы находитесь в лесу, где создается впечатление, что деревья делятся друг с другом своими ресурсами, — объяснила Гилберт, — кажется более вероятным, что гриб, связанный с ними, заметив, что дереву *A* нездоровится в данный момент, а дерево *B* вполне здорово, переносит часть ресурсов к дереву *A*. Если рассматривать ситуацию с позиции гриба, все встает на свои места».

Многие работы по исследованию общих микоризных сетей ограничиваются изучением пар растений. Рид делал снимки перехода меченых атомов от корней одного растения к корням другого. Симард отслеживала движение радиоактивных меток от растения-донора к растениям-реципиентам. Только уменьшение числа растений до незначительного позволяло проводить эти эксперименты. Но

«вселесные паутины» могут простираться на десятки или сотни метров, а возможно, и дальше. А тогда что? Выгляньте наружу. Деревья, кусты, трава, плети вьющихся растений, цветы. Кто с кем соединяется и как? Как бы выглядела карта «вселесной паутины»?

Не представляя себе архитектуры общей грибной сети, трудно понять, что происходит. Нам известно, что ресурсы и передающие информацию химические вещества обычно перемещаются по сетям под уклон, от областей, где они в изобилии, к областям дефицита, но ведь этим все не исчерпывается. Ваше сердце — это насос, который заставляет кровь течь «под уклон», создавая области высокого и низкого давления. Динамика движения от донора к реципиенту может объяснить, почему кровь циркулирует, но не то, почему кровь поступает к вашим органам так, как это происходит. Это связано с сосудами, с их толщиной, разветвленностью, с тем, как они проходят по вашему телу. Примерно то же происходит и в микоризных сетях. Материя не сможет проходить от источника к приемнику, если отсутствует сама сеть, по которой она могла бы течь.

Кевин Бейлер, один из бывших учеников Симард, является главой единственных двух исследований, которые в конце 2000-х годов были проведены для нанесения на карту пространственной структуры общей микоризной сети. Бейлер выбрал относительно простую экосистему — лес в Британской Колумбии, состоявший из Дугласовых пихт разных возрастов. Он применил метод, используемый при проведении тестов на определение отцовства у людей. На экспериментальном участке 30 × 30 метров он идентифицировал генетические отпечатки каждого отдельного гриба и каждого дерева, что позволило ему точно выяснить, кто с кем связан. Уровень детализации совершенно необычный. Многие исследования рассматривали то, какие виды растений и грибов взаимодействуют друг с другом, но очень немногие шли дальше, задаваясь вопросом о том, какие особи грибов и растений действительно связаны между собой.

Карты, составленные Бейлером, потрясающи. Грибные сети простираются на десятки метров, но деревья соедине-

ны неравномерно. У молодых деревьев связей мало, у более старых их много. Дерево с самыми обширными связями соединено с 47 другими деревьями, и будь участок больше, оно было бы связано с 250 деревьями. Если пальцем мерить расстояние на карте сети, скача от дерева к дереву, — что, конечно, является чистой воды растениецентризмом, — передвигаться сквозь лес придется медленно и неравномерно, прыгая по сети от одного дерева с обширными связями к другому, которых там очень мало. Через эти «узлы» можно всего за три шага добраться до любого другого дерева.

В 1999 году, когда Барабаши и его коллеги опубликовали первую карту всемирной паутины, они обнаружили похожую схему. Веб-страницы соединены с другими веб-страницами, но не у всех страниц одинаковое количество ссылок. У подавляющего большинства страниц всего несколько связей. Малое число страниц имеют чрезвычайно многочисленные связи. Разница между страницами с большим количеством связей-ссылок и страницами с малым количеством связей колоссальна: около 80 % ссылок в сети указывают на 15 % страниц. То же самое можно сказать и о других типах сетей — от авиамаршрутов по всему свету до нейронных сетей в мозге. В каждом случае узловые точки с большим количеством связей позволяют пересечь всю сеть всего за несколько шагов. Отчасти именно эти свойства любой сети — так называемая безмасштабность — позволяют болезням, новостям и модам изливаться каскадами на население. Та же безмасштабность общей микоризной сети может помочь молодому растению выжить в сильно затененном подлеске или индикаторным химическим веществам — разойтись кругами по лесу. «Молоденький росток очень быстро окажется связан со сложной, запутанной и стабильной сетью, — объяснял Бейлер. — Можно было бы предположить, что вероятность того, что оно выживет, увеличится, как и общая жизнестойкость леса». Но только до определенной точки. Именно безмасштабность делает «вселесную паутину» уязвимой перед направленной атакой. Удалите одновременно *Google*, *Amazon* и *Facebook* или закройте три самых крупных в мире международных

аэропорта, и вы посеете хаос. Выборочно срубите большие «узловые» деревья — что делают многие коммерческие лесозаготовительные компании в попытке получить самую ценную древесину, — и это вызовет серьезные нарушения в жизни леса.

Здесь не существует действующих фундаментальных законов. Масштабно-инвариантные свойства проявляются во всех развивающихся сетях. «Большинство возникающих в мире сетей являются результатом того или иного процесса роста, — объяснял Барабаш. — У нового узла больше шансов присоединиться к узлу с большим количеством связей, чем к узлу-изгою. Таким образом, старые узлы обзаводятся еще большим числом связей». Как говорил Бейлер, «вы можете воспринимать эти микоризные сети как процесс “заражения”. Есть главные деревья, и сеть разрастается от них. Деревья, соединенные с большим числом других деревьев, обычно накапливают еще больше связей быстрее остальных».

Значит ли это, что архитектура «вселесных паутин» будет похожей в других частях света? Возможно, но мы закартографировали недостаточно сетей, чтобы с уверенностью утверждать это. Экстраполяция того, что известно о растении в цветочном горшке, на целую экосистему вызывает сложности; экстраполяция сведений, полученных на 30-метровом участке, не менее проблематична. Быть растением можно по-разному, так же как и быть грибом можно самыми разными способами. Некоторые растения способны завязывать отношения с тысячами видов грибов; некоторые растения образуют связи меньше чем с десятью и создают замкнутые сети только с членами своего собственного вида. Мицелий некоторых типов грибов легко прививает себя на другие мицелиевые сети и образует с ними большие сложносоставные единства; другие грибы скорее склонны к самоизоляции. В Панаме я узнал, что войрия зависела от одного-единственного вида грибов, но такая узкая специализация вовсе не ограничивала ее возможностей: ее грибной партнер был самым распространенным микоризным грибом в лесу, и у него были завязаны отношения со всеми широко распространенными видами деревьев, что

позволяло войрии подключиться к самому большому числу других растений. Другие микогеты, росшие в том же лесу, разработали другую стратегию и наладили связи с целым рядом видов грибов.

Даже на небольшом участке леса, который Бейлер выбрал для изучения — частично из-за простоты, — мы пропускаем какие-то части головоломки. Его карты показывают, как деревья и грибы были расположены и связаны, но мы не знаем, чем они в действительности *занимались*. «Я рассматривал только один вид деревьев и два вида грибов — ничего даже близко напоминающего все лесное сообщество, — размышлял он. — Это был только мимолетный взгляд; крохотное окошко в огромную открытую систему. Все, что я описал, — это грубое приуменьшение степени взаимосвязанности леса».

Войрия потеряла способность формировать сложную корневую систему. Она ей не нужна; корневой системой ей служат общие грибные сети. Там, где когда-то находились корни, у войрии растут пучки мясистых «пальцев». Вскройте их, и вы увидите внутри клеток войрии извивающиеся и прорывающиеся сквозь них гифы. Иногда ее корни даже не погружены в землю, а просто сидят маленькими кулачками на поверхности почвы. Войрию легко сорвать. Ее грибные связки рвутся моментально. Кажется странным, что жизненные артерии растения можно так легко повредить. Связь войрии с ее сетью — это вопрос ее жизни и смерти, и тем не менее физические связующие нити настолько непрочны. Я часто пытался понять, как весь строительный материал, необходимый для создания целого растения, мог переместиться по такому хрупкому путепроводу.

Как и во время большинства исследований микоризных сетей, поиск ответов на вопросы о войрии требовал собрать эти цветы, разрывая таким образом их связь с их сетью. Я много дней занимался этим. И много дней думал об иронии ситуации, вынуждавшей меня разрывать те самые связи, которые я изучал. Конечно, биологи часто губят организмы, которые надеются понять. Я свыкся с этой мыслью, насколько вообще можно с ней свыкнуться. Однако

разрывать связи в сети, чтобы изучить эту сеть, представлялось мне верхом абсурда. Ученые Илья Пригожин и Изабель Стенгерс заметили, что попытки разбить сложную систему на составляющие ее компоненты часто не приводили к удовлетворительным объяснениям; мы редко понимаем, как заново сложить вместе все кусочки головоломки. «Вселесные паутины» представляют собой особую сложность. Мы все еще не знаем точно, как мицелиевые сети координируют свои собственные действия и поддерживают связь с отдельными частями своей собственной сети, не говоря уже о том, как они управляют своими взаимодействиями с многочисленными растениями в природных почвах. Тем не менее мы знаем достаточно, чтобы понимать, что мицелиевые сети — это скорее непрерывные процессы, нежели *объекты*. Мы знаем, что мицелиевые сети способны сливаться друг с другом, отделяться от других сетей, перенаправлять поток веществ по своим системам, выделять — и реагировать на — шлейфы летучих химических веществ. Мы знаем, что микоризные сети образуют и изменяют свои связи с растениями, сплетаясь с ними, расплетаясь и вновь привязываясь к ним. Короче говоря, мы знаем, что «вселесные паутины» — это динамические системы, находящиеся в непрекращающемся мерцающем и трепещущем круговом движении.

Сущности, ведущие себя подобным образом, условно называются сложными адаптивными системами. Сложные, потому что их действия трудно предсказать, ориентируясь только на понимание принципов действия составляющих их частей; адаптивные, потому что они самоорганизуются в новые формы или схемы поведения по ситуации. Вы — как и все организмы — представляете собой комплексную адаптивную систему. Такой же системой является всемирная паутина, а также мозг, колонии термитов, роящиеся пчелы, города и финансовые рынки — и это всего несколько примеров. Внутри комплексных адаптивных систем незначительные изменения могут вызвать серьезные последствия, которые можно будет увидеть только при взгляде на общую картину. Очень редко можно провести четкую стрелку-указатель от причины к следствию. Раздражители-стимулы, ко-

торые сами по себе могут быть чем-то совершенно непримечательным, превращаются в вихри часто поразительных реакций. Удачным примером такого рода динамических нелинейных процессов служат финансовые кризисы. А также чихание и оргазмы.

Тогда как лучше всего рассматривать общие микоризные сети? С чем мы имеем дело? Со сверхорганизмом? Метрополем? Живым интернетом? Яслями для деревьев? Социалистическим строем в почве? Нерегулируемыми рынками эпохи позднего капитализма, где грибы толпятся, соперничая друг с другом, в торговом зале лесной стоковой биржи? А может быть, это грибной феодализм, в котором верховные владыки-грибы помыкают своими батраками-растениями ради своего только блага? Все эти образы весьма проблематичны. Вопросы, поднимаемые «вселесными паутинами», ведут дальше, чем позволяет представить себе этот ограниченный состав действующих лиц. И все же нам действительно придется включить воображение. Вероятно, нам придется свыкнуться с мыслью об общих микоризных сетях как о подобных, потенциально более изученных сложных комплексных адаптивных системах, если мы хотим понять, как и вправду ведут себя общие микоризные сети в комплексных экосистемах — что они собственно делают, а не на что они способны.

Симард проводит параллели между общими микоризными сетями в лесу и нейронными сетями в мозге животных. Она утверждает, что неврология может обеспечить методы для лучшего понимания того, как возникают сложные типы поведения в экосистемах, связанных грибными сетями. Неврология дольше, чем микология, занимается тем, как динамические самонастраивающиеся системы могут вызывать разные типы сложного адаптивного поведения. Она не имеет в виду, что микоризные сети *являются* мозгом. Эти две системы отличаются по многим параметрам. Во-первых, мозг состоит из клеток, принадлежащих одному организму, а не множеству организмов различных видов. Мозг анатомически заключен в рамки и не может продвигаться по местности, на что способны грибные сети. И все же сравне-

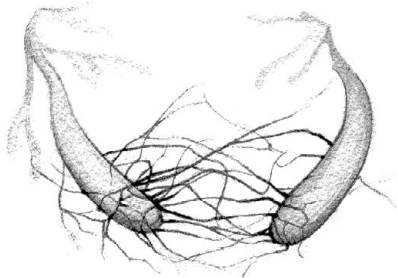
ние соблазнительно. Трудности, с которыми сталкиваются ученые, изучающие «вселесные паутины», и нейробиологи не так уж различаются, хотя неврология имеет фору в несколько десятилетий и миллиардов долларов. «Неврологи препарируют мозг, чтобы выявить нейронные сети, — шутил Барабаш. — Вам, экологам, приходится препарировать лес, чтобы вы смогли понять и увидеть, где находятся все корни и все грибы и кто с кем связан».

Симард замечает, что, оказывается, действительно существуют некоторые информативные — хоть и поверхностные — зоны частичного совпадения. Сети мозговой активности обладают масштабно-инвариантными свойствами с несколькими модулями, характеризующимися большим количеством связей и позволяющими информации пройти из пункта *A* в пункт *B* всего в несколько итераций. Мозг, как и грибные сети, может изменить свою конфигурацию — или «адаптировать электрический контур» — в зависимости от вновь сложившейся ситуации. Малоиспользуемые нейронные пути удаляются, как и малоиспользуемые участки мицелия. Новые связи между нейронами — или синапсы — образуются и укрепляются, как и связи между грибами и корнями деревьев. Химические вещества — нейротрансмиттеры — проходят через синапсы, позволяя информации поступать от одного нерва к другому; сходным образом химические вещества проходят по микоризным «синапсам» от гриба к растению или от растения к грибу, в некоторых случаях перенося информацию от одного к другому. Известно, что аминокислоты глутамат и глицин — основные сигнальные молекулы в растениях и самые распространенные нейротрансмиттеры в головном и спинном мозге животных — переходят от растений к грибам и обратно по этим узлам.

Однако в общем и целом действия «вселесных паутин» неоднозначны, и наши аналогии с мозгом — как и с интернетом или политикой — накладывают свои ограничения. Как бы эти сети ни координировали себя, как бы подсказки — или все-таки сигналы — ни проходили по грибным каналам, грибные сети частично перекрывают друг друга, и у них нестабильные границы, которые, разрастаясь,

стремятся вырваться наружу, затягивая в себя многое по пути. Включая бактерий, которые мигрируют с места на место внутри грибного мицелия. И тлей, и ос-наездников, паразитирующих на них, привлеченных на пиршество летучими соединениями, выделяемыми кормовыми бобовыми растениями. Еще один шаг, и люди тоже окажутся на крючке. Сознательно или нет, но мы взаимодействуем с микоризными сетями столько же времени, сколько мы взаимодействуем с растениями.

Способны ли мы освободиться от этих метафор, выйти разумом за пределы черепа и научиться говорить о «вселесных паутинах», не опираясь ни на один из наших затертых человеческих тотемов? Сможем ли мы допустить, чтобы микоризные сети стали вопросами, а не заранее известными ответами? «Я стараюсь просто смотреть на систему и позволить лишайнику быть лишайником». Обсуждения «вселесных паутин» часто возвращают меня мыслями к Тоби Сприбиллу, исследователю, который открывает все новых и новых партнеров в лишайниковом симбиозе. «Вселесные паутины» — не лишайники, хотя представление о них как об огромных лишайниках, по которым можно побродить, внесло бы приятное разнообразие в метафоры, которые нам предлагаются. Тем не менее мне хотелось бы понять, способны ли мы извлечь урок из терпения Сприбилла. Способны ли мы отойти в сторону и позволить звучащим на разные лады роям растений, грибов и бактерий, которые составляют наши дома и миры, быть самими собой и непохожими ни на что другое? Что тогда случится с нашим сознанием и разумом?



ГЛАВА СЕДЬМАЯ

РАДИКАЛЬНАЯ МИКОЛОГИЯ

Чтобы правильно использовать мир, чтобы суметь прекратить понапрасну расходовать его и тратить свое время в нем, нам нужно заново научиться в нем жить.

— УРСУЛА ЛЕ ГУИН

Я лежал нагишом в куче разлагающейся древесной щепы и был щедро засыпан ею по самое горло. Было очень жарко, и пар пах кедром и сырой прелью старых книг. Я откинулся назад, истекая потом под влажной тяжестью, и закрыл глаза.

Я находился в Калифорнии, в одной из ферментационных бань, единственных, которые можно найти за пределами Японии. Древесную стружку намочили и свалили в кучу. После двух недель гниения ее закинули в большую деревянную ванну, где она прела еще неделю до моего приезда. Теперь в ванне готовилось древесное блюдо, подогреваемое исключительно неистовой энергией разложения.

От сильного жара меня стало клонить в сон, и в голову пришла мысль о грибах, разрушающих древесину. Насколько просто, когда тебя не тушат в грудe гниющей древесины, принимать как должное то, что все когда-нибудь становится прахом. Мы живем и дышим в пространстве, которое оставляет нам разложение. Я жадно втянул через трубочку холодной воды и постарался сморгнуть пот из глаз. Если бы мы смогли приостановить процесс разложения начиная с настоящего момента, планета оказалась бы завалена многокилометровыми слоями мертвых тел. Для

нас это стало бы катастрофой, но с точки зрения гриба это представилось бы огромной горой возможностей.

Состояние оцепенения и сонливости усилилось. Вне сомнения, не в первый раз период сильнейших глобальных изменений на планете обернулся бы для грибов порой процветания. Грибы — ветераны в деле выживания во время экологических бедствий. Их способность держаться за жизнь — и часто преуспевать — в периоды катастрофических изменений является одной из их характерных черт. Они изобретательны, гибки и склонны к сотрудничеству. Существуют ли для нас способы вступить в партнерство с грибами, чтобы они помогли нам приспособиться к существующей ситуации, когда большая часть жизни на Земле находится под угрозой уничтожения благодаря деятельности человека?

Эти мысли могут показаться бредом существа, по шею заваленного разлагающейся древесной щепой, однако все большее число специалистов радикальной микологии придерживаются точно такого же мнения. Многие виды симбиоза сформировались именно в кризисные периоды. Водоросль-партнер в лишайнике не сможет выжить на голых камнях, не завязав отношений с грибом. Быть может, и мы не сможем приспособиться к жизни на пострадавшей планете, не создав новых отношений с грибами?

В каменноугольный период, 290–360 миллионов лет назад, по заболоченным тропикам разрослись, превратившись в настоящие леса, самые первые производящие древесину (при поддержке их грибных микоризных партнеров) растения. Эти леса выросли и умирали, извлекая из атмосферы огромное количество углекислого газа. Десятки миллионов лет большая часть этого растительного материала не подвергалась разложению. Слои мертвого, несгнившего леса становились все глубже, сохраняя в себе столько углерода, что уровень содержания двуокиси углерода в атмосфере резко упал и планета вошла в период глобального охлаждения. Растения стали причиной этого климатического кризиса, и они же больше всего от него пострадали: огромные участки тропического леса были про-

сто стерты с лица Земли в процессе, получившем название «кризис карбоновых лесов» каменноугольного периода. Как же древесина стала загрязняющим веществом, вызвавшим изменение климата?

С позиции растений древесина была и остается блестящим структурным новаторством. По мере процветания живого соперничество за солнечный свет усиливалось и растения вырастали все выше, чтобы до него добраться. Чем выше они становились, тем больше нуждались в конструкции, которая смогла бы их поддержать в вертикальном положении. Древесина стала решением этой проблемы. Сегодня древесина примерно трех триллионов деревьев — более 15 миллиардов которых ежегодно вырубается — составляет примерно 60 % общей массы всех живых существ на планете, и это около 300 гигатонн углерода.

Дерево — материал гибридный. Целлюлоза — составляющее всех растительных клеток, древесных или нет, — является одним из его ингредиентов и самым распространенным полимером на Земле. Другим ингредиентом является лигнин, второй по распространенности полимер. Именно лигнин делает дерево деревом. Он крепче целлюлозы и более сложный по составу. В то время как целлюлоза состоит из упорядоченных цепочек молекул глюкозы, лигнин представляет собой случайную матрицу молекулярных колец.

До настоящего времени лишь несколько организмов разобрались с тем, как расщеплять лигнин. Наиболее многочисленной группой являются грибы, вызывающие белую гниль древесины*, — в процессе разложения они отбеливают древесину до бледного цвета. Большинство ферментов — биологических катализаторов, используемых живыми организмами при проведении химических реакций, — закрепляются на молекулах конкретной формы. С лигнином этот метод безнадежен; его химическая структура слишком неупорядочена. Вызывающие белую гниль грибы обходят

* Также ксилотрофные грибы или грибы-деревообразители. Однако некоторые представители этих групп могут вызывать и другую гниль, например бурую. — *Прим. науч. ред.*

эту проблему, используя ферменты широкого спектра, действие которых не зависит от формы молекулы. Эти ферменты, или пероксидазы, выпускают поток высокорективных молекул — свободных радикалов, — которые взламывают плотно связанную структуру лигнина в процессе ферментативного окисления.

Грибы — потрясающие специалисты в разложении материи, но из всех их достижений одним из наиболее впечатляющих является способность грибов, вызывающих белую гниль, расщеплять лигнин в древесине. Основываясь на способности высвободить свободные радикалы, пероксидазы, вырабатываемые такими грибами, делают возможной так называемую радикальную химию. И «радикальная» — самое подходящее слово. Эти ферменты навсегда изменили тот путь, который углерод проделывает по своим земным циклам. Сегодня грибковое разложение материи — большую часть которой составляет древесная растительная материя — один из самых крупных источников углерода: в процессе высвобождается около 85 гигатонн углерода в год. В 2018 году сжигание ископаемого топлива людьми привело к выделению в атмосферу около 10 гигатонн углерода.

Каким образом накопившееся за десятки миллионов лет дерево не подверглось разложению в каменноугольный период? Существуют разные мнения. Некоторые исследователи указывают на климатические факторы: тропические леса представляли собой застойные, насыщенные водой места. Когда деревья умирали, они погружались в бескислородные болота, куда не могли проникнуть вслед за ними белые гниlostные грибы.

Другие предполагают, что когда лигнин впервые появился в начале каменноугольного периода, грибы, вызывающей белую гниль древесины, еще не были в состоянии расщеплять его, и им понадобилось еще несколько миллионов лет, чтобы усовершенствовать свою технику разложения материи.

Так что же случилось с огромными участками леса, не подвергшегося разложению? Это невообразимое количество накопившегося материала, в километры глубиной.

Ответ — каменный уголь. Мировая промышленность веками приводилась в движение этими пластами несгнившего растительного вещества, каким-то образом оказавшегося в недосыгаемости для грибов. (Если у них появляется возможность, многие виды грибов с готовностью принимаются за разложение угля, а так называемый керосиновый гриб превосходно себя чувствует в авиационных топливных баках). В грибной истории уголь выполняет функцию злого гения: он служит доказательством отсутствия грибов, веществом, что те не смогли переварить. С тех времен редко случалось так, чтобы такое колоссальное количество органического материала избежало внимания грибов.

Я лежал погребенный среди грибов, вызывающих белую гниль древесины, уже 20 минут, медленно доводимый до готовности их радикальной химией. Казалось, моя кожа растворилась от жара, и я перестал понимать, где мое тело заканчивалось, а где начиналось; сложные объятия, то дарящие блаженство, то невыносимые. Ничего удивительного, что уголь может давать столько тепла: он сделан из дерева, никогда еще не горевшего. Когда мы жжем уголь, мы физически сжигаем материал, который грибы не смогли сжечь при помощи ферментов. Мы подвергаем термальному разложению то, что грибы не сумели расщепить химическим способом.

Дереву, возможно, редко удастся избежать грибного внимания; но от нашего внимания грибы ускользают регулярно. В 2009 году миколог Дэвид Хоксуорт отзывался о микологии как о «забытой меганауке». Биологию растений и животных поколениями изучают на специально созданных для этого университетских факультетах, а исследование грибов уже давно смешивается с ботаникой и редко признается отдельной областью даже в наши дни.

О забвении следует говорить с осторожностью. В Китае грибы уже тысячи лет служат одним из главных источников питания и лечения. Сегодня 75 % мирового производства грибов — почти 40 миллионов тонн — локализовано в Китае. В Центральной и Восточной Европе также грибы уже долгое время играют важную роль в на-

циональных культурах. Если национальный грибной энтузиазм можно мерить количеством смертей от отравления ими, сравните одну или две смерти в год в Соединенных Штатах с двумя сотнями смертей в России и на Украине в 2000 году.

Тем не менее для бóльшей части мира наблюдения Хоксуорта вполне справедливы. Первый доклад о состоянии грибов в мире (*State of the World's Fungi*) был опубликован в 2018 году; согласно ему, в тревожном списке видов, находящихся под угрозой, — он предложен Международным союзом охраны природы и природных ресурсов (МСОП) — всего 56 видов грибов, и только их охранный статус был оценен. Сравните с более чем 25 000 видов растений и 68 000 видов животных. Хоксуорт предлагает несколько решений для выправления такого дисбаланса. Он настаивает: «Нужно дать больше возможностей микологам-“любителям”». Он берет слово «любители» в кавычки, и это многое значит. Хотя во многих научных сферах имеются целые сообщества преданных и талантливых, но непрофессиональных ученых, именно среди микологов они наиболее выдаются. И слишком часто грибные тайны разгадывают именно они.

Массовое научное движение может показаться невероятным, но оно берет начало из богатой традиции. Профессиональное академическое изучение живых организмов набрало размах только в XIX веке. Двигателем для многих основных разработок и открытий в истории науки служил энтузиазм любителей, и происходили они часто за стенами посвященных им университетских факультетов. Сегодня, после длительного процесса специализации и профессионализации, появилось огромное число новых способов ведения научной работы. «Гражданские научные проекты», а также «места встреч хакеров в реальном времени» и «места сбора “мейкеров” в реальном времени» становятся все более популярными с 1990-х годов, давая возможность преданным своему делу неспециалистам выполнять исследовательские проекты. Как называть таких практиков? Считать ли их «общественностью»? «Граждан-

скими учеными»? «Непрофессиональными экспертами»? Или просто любителями?

Питер Маккой — современный художник, миколог-самоучка и основатель организации «Радикальная микология», которая трудится над созданием грибных решений многих технологических и экологических проблем, вставших перед нами. Как он объясняет в своей книге «Радикальная микология» — чем-то средним между грибным манифестом, путеводителем и руководством по выращиванию грибов, — его цель в том, чтобы создать «народное микологическое движение», посвященное «выращиванию грибов и применению микологии на практике».

Радикальная микология — часть более масштабного микологического движения «Сделай сам», которая возникла на базе выращивания психоделических грибов, введенным в моду в 1970-х годах Терренсом Маккенной и Полом Стемцем. Движение принимало свою нынешнюю форму по мере того, как оно развивалось вместе с хакерспейсами, научными проектами, претворяемыми в жизнь при помощи краудсорсинга, и онлайн-форумами. И хотя центр его притяжения по-прежнему остается на западном побережье Северной Америки, массовые микологические организации быстро распространяются на других континентах и в других странах. Слово «радикальный» происходит от латинского *radix* — «корень». Переведенное буквально, это слово указывает на то, что радикальная микология занимается изучением своего мицелиевого основания, или ее «низового уровня».

Именно для грибных энтузиастов «низового уровня» Маккой основал микологическую онлайн-школу *Mycologos*. Информация о грибах часто недоступна, и в ней сложно разобраться. Его миссия состоит в том, чтобы изменить отношения между грибами и людьми посредством распространения такой информации в удобоваримой форме: «Я предвижу, как команды радикальных-микологов-без-границ путешествуют по земному шару, делясь своими навыками и открывая новые способы работы с грибами. Там, где один радикальный миколог обучит 10 человек, эти 10 смогут обучить 100, а те — 1000. Вот так грибница и будет разрастаться».

Осенью 2018 года я отправился на ферму в сельском Орегоне на съезд радикальных микологов, проходящий раз в два года. Там я обнаружил более 500 грибных «ботаников», людей, выращивающих грибы, художников, многообещающих энтузиастов, социальных и экологических активистов, толпившихся и суетившихся во дворе фермы. В бейсболке, стертых кроссовках и очках с толстыми линзами, Маккой задавал тон собранию в ключевом обращении к присутствовавшим — «Микология освобождения» (*Liberation Mycology*), чтобы вырастить хоть какое-нибудь количество грибов, те, кто занимается их разведением, должны выработать в себе острое чутье к веществу, которое способно удовлетворить ненасытный аппетит грибов. Большинство плодовых тел прекрасно растет на мусоре, производимом человечеством. Выращивание коммерческих урожаев грибов на отбросах — это своего рода алхимия. Грибы превращают долговые обязательства с отрицательной стоимостью в ценный продукт. Производитель отходов в выигрыше, производитель грибов в выигрыше, и грибы также в выигрыше. Неэффективность производства многих отраслей — благословение для выращивающих грибы. Сельское хозяйство печально известно огромным объемом отходов: плантации пальмового и кокосового масла выбрасывают 95 % сырья.

Сахарные плантации отправляют в отходы 83 %. Городская жизнь немногим лучше. В Мехико, использованные подгузники составляют от 5 до 15 % веса всех твердых отходов. Ученые обнаружили, что всеядный мицелий вешенки обыкновенной (*Pleurotus ostreatus*), гриба, вызывающего белую гниль древесины, прекрасно растет на использованных подгузниках. В течение двух месяцев подгузники, представленные вниманию вешенки, потеряли 85 % начального веса после удаления пластикового покрытия. Можно сравнить этот результат с 5 % потери в весе в результате переработки без использования гриба. Более того, выросшие на этой диете плодовые тела были совершенно здоровы и не заражены никакой человеческой инфекцией. Подобного рода проекты ведутся сейчас в Индии. Выращивая вешенку

на сельскохозяйственных отходах — разлагая эти вещества при помощи ферментов, — удается значительно снизить количество биомассы, обычно сжигаемой, и таким образом сделать воздух чище.



Вешенка обыкновенная, *Pleurotus ostreatus*, выращиваемая на сельскохозяйственных отходах

Нет ничего удивительного в том, что отбросы, создаваемые людьми, с точки зрения грибов, больше походят на десерт. Грибы продержались все пять крупнейших эпох вымирания живого на Земле, во время каждой из которых на планете исчезало полностью от 75 до 95 видов существ. Некоторые грибы даже процветали во время этих бедствий. После мел-третичного вымирания, которое, как полагают, покончило с динозаврами и привело к массовой гибели лесов по всему земному шару, обилие грибов возросло благодаря изобилию мертвого древесного материала для разложения. Радиотрофические грибы — те, что способны питаться преобразованной ими энергией, испускаемой радиоактивными частицами, — процветают на развалинах Чернобыльской АЭС и стали новейшими игроками в долгой истории взаимоотношений грибов и человеческой деятельности в области ядерной энергии. После того как атомной бомбой был разрушен город Хиросима, первым

живым существом, по сообщениям, появившимся на месте катастрофы, был гриб мацутакэ.

Аппетиты грибов разнообразны, но существуют материалы, которые они не станут расщеплять, если их не вынуждает необходимость. На одном из своих семинаров Маккой объяснял, как он обучил мицелий вешенки переваривать один из самых распространенных в мире отходов — окурки, более 750 тысяч тонн которых выкидывается каждый год. Неиспользованные сигаретные окурки со временем перегнивают, но использованные окурки пропитаны остатками токсичных веществ, мешающих процессу. Маккой перевел вешенку на диету из использованных окурков, постепенно исключая все другие альтернативы питания. Со временем гриб «научился» использовать их как единственный источник пищи. Замедленная киносъемка показала, как мицелий проникает в банку из-под варенья, набитую смятыми, в пятнах смол окурками, неуклонно просачиваясь вверх. И вскоре из банки показывается сначала свернутая узлом, а потом расправившаяся крепкая вешенка.

На самом деле здесь столько же «памяти», сколько и «обучения». Гриб не станет вырабатывать совершенно ненужный ему фермент. Ферменты или даже целые метаболические алгоритмы могут поколениями храниться в грибном геноме в неактивном состоянии. Чтобы мицелий вешенки смог переварить сигаретные окурки, грибу, вероятно, пришлось «смахнуть пыль» с ранее не используемого метаболического хода. А может быть, он задействовал регулярно используемый фермент, но для новой миссии. Многие грибные ферменты, такие как пероксидазы, расщепляющие лигнин, обладают широким спектром действия. Это означает, что один фермент может использоваться как универсальный инструмент, позволяя грибу переваривать различные соединения с похожими структурами. Так уж получилось, что многие токсичные загрязнители — включая и те, что находятся в окурках, — напоминают побочные продукты расщепления лигнина. В этом смысле проблема переработки окурков, которая ставится перед мицелием вешенки, является для него довольно обычной задачей.

Большая часть радикальной микологии подтверждается радикальной химией грибов, вызывающих белую гниль древесины. Тем не менее не всегда просто предугадать, что именно станет переваривать данный штамм гриба, а от чего откажется. Маккой рассказывал нам о своих попытках вырастить мицелий вешенки в лабораторных чашках, на которые были нанесены капли гербицида глифосата. Мицелий некоторых штаммов вешенки не приближался к каплям. Мицелий других прорастал прямо сквозь них. Мицелий третьих дорастал до края капли и прекращал расти. «Этим третьим понадобилась неделя, чтобы найти способ переработать глифосат», — вспоминал Маккой. Он провел аналогию между грибами и тюремщиками со связками ключей-ферментов, которые могут разомкнуть определенные химические оковы. У некоторых штаммов, возможно, уже есть готовый ключ, который можно использовать для этого. У других он может быть закопан где-то в глубине их генома, но они все равно предпочитают избегать нового вещества. Третьим может понадобиться неделя, чтобы перепробовать все ключи у них на связке, пока не повезет найти подходящий.

Маккой, как и многие участники микологического движения «Сделай сам», получил свой первый заряд грибного пыла от Стемеца. Со времени его авторитетного труда о псилоцибиновых грибах в 1970-х Стемец превратился в невероятный гибрид грибного проповедника и магната. Серию его лекций в рамках проекта *TED* «Шесть способов, при помощи которых грибы могут спасти наш мир» смотрели миллионы раз. У него многомиллионный грибной бизнес *Fungi Perfecti*, и он ведет невероятно успешную торговлю всем — от антивирусных спреев для горла до грибных лакомств для собак (*Mutt-rooms*). Его книги по определению и выращиванию грибов — включая и авторитетную работу «Псилоцибиновые грибы мира» — продолжают обеспечивать важной информацией многочисленных микологов, начинающих с нуля или уже обладающих опытом.

Будучи подростком, Стемец страдал от изнурительно го заикания. Однажды, приняв опасную дозу магических грибов, он забрался на вершину высокого дерева, где его

застигла гроза. Когда после грозы он спустился с дерева, от его заикания не осталось и следа. Стемец был обращен в грибную веру. Он изучал микологию в Колледже Вечнозеленого штата и с тех пор посвятил свою жизнь грибным делам. Стемец не связан с радикальной микологией. Тем не менее как и Маккой, он посвятил себя распространению информации о грибах как можно более широкой аудитории. На его веб-сайте есть письмо от сирийца, выращивающего грибы, который, вдохновившись работами Стемца, разработал способ разводить вешенки на сельскохозяйственных отходах. Этот человек научил более тысячи людей выращивать грибы в подвалах их домов, что обеспечило их важным пищевым продуктом во время шестилетней осады и бомбардировок режимом Асада.

На самом деле не будет преувеличением утверждать, что Стемец более, чем кто-либо другой, сделал для популяризации грибных идей за стенами университетских биологических факультетов. Однако его отношения с академическим миром простыми назвать нельзя. Начиная с его сенсационных заявлений и заканчивая его умозрительными теориями, Стемец ведет себя во многих отношениях совсем не так, как предположительно должны вести себя академики. И все же его диссидентский подход, несомненно, эффективен. Возникающая в результате напряженность иногда граничит с абсурдом. Стемец однажды рассказал о жалобе, которую он получил от знакомого университетского профессора: «Пол, вы создали огромную проблему. Мы хотим исследовать дрожжевые грибы, а эти студенты стремятся спасти мир. Что нам делать?»

Один из видов помощи, которые грибы могут предложить в спасении нашего мира, заключается в попытке восстановить загрязненные и зараженные экосистемы. В области миковосстановления, или микоремедиации, как ее принято называть, грибы вступают в сотрудничество с людьми в мероприятиях по очистке окружающей среды.

Мы тысячелетиями призываем грибы на службу по разложению различных веществ. Разнообразные микроб-

ные популяции нашего кишечника напоминают о том, что в те моменты истории нашей эволюции, когда нам не удавалось переварить что-нибудь самостоятельно, мы привлекали к работе микроорганизмы. Там, где это оказывалось невозможным, мы этот процесс «отдавали на откуп», используя бочки, банки, компостные кучи и промышленные биореакторы и бродильные аппараты. Человеческая жизнь зависит от многих форм внешнего разложения/переваривания, происходящего при помощи грибов, начиная от алкоголя до соевого соуса, вакцин, пенициллина и лимонной кислоты, используемой во всех шипучих напитках. Этот вид партнерства — в котором разные организмы вместе ведут метаболическую «арию», исполнить которую по отдельности ни один из них не сможет, — воплощает один из старейших эволюционных принципов. Микоремедиация — просто особый случай.

И она обещает многое. У грибов замечательный аппетит к разнообразным загрязнителям кроме пропитанных токсическими веществами окурков и гербицида глифосата. В своей книге «Мицелий в действии» Стемец пишет о своем сотрудничестве с исследовательским институтом в штате Вашингтон, ставшим партнером Министерства обороны США в программе разработки способов разложения некоего сильнодействующего нейротоксина. Химическое вещество — диметил метилфосфонат, или ДММФ, — является одним из смертоносных компонентов газа VX, производившегося и применявшегося в 1980-х годах режимом Саддама Хуссейна во время войны между Ираном и Ираком. Стемец послал своим коллегам 28 различных видов грибов, которые были подвергнуты воздействию постепенно увеличиваемых концентраций этого нейротоксина. Через шесть месяцев два вида из всех «научились» употреблять ДММФ в качестве своего основного источника питания. Одним из этих видов стал *Trametes*, траметес, а другим — псилоцибе лазурная (*Psilocybe azurescens*), вид псилоцибиновых грибов, обладающий самым высоким содержанием псилоцибина среди известных видов. Он был открыт Стемцем за несколько лет до этого и назван так за синеватый отте-

нок ножки (Стемец позднее назвал сына Азуреус, *Azureus*, в честь гриба). Оба вида относятся к грибам, вызывающим белую гниль древесины.

В микологической литературе сотни таких примеров. Грибы могут перерабатывать многие обычные загрязнители, угрожающие жизни людей и других существ, в почве или водоемах. Они способны расщеплять пестициды (такие как хлорофенолы), искусственные красители, взрывчатые вещества тринитротолуол (тротил) и гексоген, сырую нефть, некоторые виды пластика, а также целый ряд человеческих и ветеринарных лекарственных препаратов, от антибиотиков до искусственных гормонов, не удаленных очистными сооружениями.

В принципе, грибы — одни из лучших специалистов по восстановлению окружающей среды среди организмов. Миллиардами лет в процессе эволюции мицелий точно настраивался для достижения одной главной цели: поедания и поглощения. Это телесное воплощение аппетита. За сотни миллионов лет до растительного бума в каменноугольный период грибы жили, находя способы разложения мусора, оставленного другими организмами. Они даже способны ускорить разложение, предоставляя бактериям мицелиевые трассы для проникновения в те места распада, куда иначе им было бы не добраться. И все же разложение — лишь часть истории. Тяжелые металлы накапливаются внутри грибных тканей, из которых их можно извлекать и уничтожать совершенно безопасно. Плотная сетка мицелия может даже быть использована для фильтрации загрязненной воды. При помощи микофильтрации удаляются возбудители инфекционных заболеваний, такие как кишечная палочка; микофильтрация, словно губка, впитывает тяжелые металлы, свойство, которое одна из финских компаний использует для извлечения золота из выброшенной электроники.

Несмотря на большой потенциал, микоремедиацию не так просто применять на практике. То, что конкретный грибной штамм ведет себя определенным образом в лабораторных условиях, еще не означает, что он будет делать то же самое, когда окажется среди неразберихи загряз-

ненной экосистемы. У грибов существуют свои потребности — такие, как кислород или дополнительные источники питания, — которые обязательно нужно учитывать. Более того, разложение проходит поэтапно, осуществляемое грибами и бактериями, поочередно возобновляющими процесс с того места, где ее закончил предыдущий участник. Наивно предполагать, что обученный в лаборатории грибной штамм сможет эффективно справиться с неразберихой своего нового окружения и восстановить экосистему в одиночку. Трудности, с которыми сталкиваются специалисты по микоремедиации, аналогичны тем, что встают перед виноделами, — если не будет подходящих условий, дрожжевому грибу придется прикладывать огромные усилия, чтобы превратить сахар в бочке виноградного сока в алкоголь. В данном случае, однако, винная бочка — это загрязненная экологическая система, а мы находимся внутри ее.

Маккой был сторонником радикального метода, основанного на массовом эмпиризме. Я относился к этому скептически. Мне пришло в голову, что область микоремедиации нуждается в серьезной институциональной поддержке. Классные доморощенные решения — это прекрасно, но ведь нужны, несомненно, крупномасштабные исследования. Как может область развиваться без флагманских проектов, серьезных грантов и внимания со стороны ведомств? Мне было трудно представить, что армия микологов-любителей, неважно насколько увлеченных, могла быть достаточно оснащена или достаточно надежна, чтобы развивать эту область.

Я вскоре понял, что Маккой защищал этот подход не из-за пренебрежения академическими исследованиями, а из-за их недостаточного количества. Этому способствовали многие факторы. Экосистемы сложны, и не существует единого грибного решения для всех мест и условий. Для разработки масштабируемых готовых к применению протоколов для микоремедиации понадобились бы большие инвестиции, что несвойственно сектору ремедиации: в целом восстановлением окружающей среды очень неохотно занимаются компании, вынужденные это делать, чтобы

выполнить свои юридические обязательства. Мало кого из них интересуют альтернативные или экспериментальные решения. Более того, существует традиционная индустрия по восстановлению окружающей среды, находящаяся на пике деятельности, которая срывает верхний почвенный слой тоннами, увозит его в другое место и сжигает. Не взирая на высокие издержки и наносимый экологии урон, заменить эту индустрию никто не спешит.

У радикальных микологов нет другого выбора, кроме как взять дело в свои руки. И с начала 2000-х годов, вдохновленные частично проповедями Стемеца, запускаются проекты по проверке и испытанию грибных решений. Одна из старейших организаций *CoRenewal* изучает способность грибов обезвреживать ядовитые побочные продукты добычи сырой нефти, оставшиеся после 26 лет деятельности корпорации *Chevron* в Эквадорской Амазонии. Вместе с партнерами из областей загрязнения ученые изучают микробные популяции и штаммы грибов-«нефтефилов», найденные в загрязненных почвах. В этом выражается классическая радикальная микология — местные микологи, узнающие, как установить партнерские отношения с местными грибными штаммами, чтобы решить местные проблемы. Существуют и другие примеры. Добровольная организация в Калифорнии выложила несколько миль труб, набитых соломой, наполненной мицелием вешенки, в надежде, что он очистит токсичные стоки из домов, разрушенных лесными пожарами 2017 года. В 2018 году в датской гавани были установлены боновые заграждения, наполненные мицелием вешенки, чтобы избавиться от топливных пятен на поверхности. Большинство из этих проектов только начаты, другие в процессе уже некоторое время. Ни один из них не доведен пока до завершения.

Начнет ли микоремедиация быстро развиваться? Слишком рано судить об этом. Но ясно, что сейчас, когда мы стоим, не зная, что предпринять, на краю лужи токсичной грязи, созданной нашими стараниями, решения, предлагаемые радикальной микологией на основе способности определенных грибов расщеплять дерево на составляющие,

могут предложить какой-то выход. Избранный нами метод добычи энергии из дерева основан на его сжигании. Это тоже радикальное решение. И именно эта энергия — получаемая нами из окаменелых останков древесного бума в каменноугольный период — способствовала тому, что мы оказались в бедственном положении. Возможно ли, чтобы радикальная химия грибов, вызывающих белую гниль древесины — эволюционный ответ на тот же самый древесный бум, — смогла помочь нам выбраться из этой ситуации?

По мнению Маккоя, радикальная микология означает больше, чем разрешение конкретных проблем в конкретных местах. Широко распространенная сеть добровольцев-практиков также способна поднимать уровень осведомленности о грибах в целом. Один из способов добиться этого — открывать и выделять сильные грибные штаммы. Грибы, обнаруженные в зараженной среде, вполне могли уже научиться переваривать некий конкретный загрязнитель и, будучи обитателями данной местности, смогли бы исправить проблему и чувствовать себя превосходно. Именно такой подход использовала команда ученых в Пакистане, проводившая исследование почвы, взятой с местной свалки в Исламабаде и обнаружившая новый штамм гриба, который умел перерабатывать полиуретановый пластик.

Возможно, привлечение масс добровольцев к поискам грибных штаммов и звучит нерационально, но такой подход привел к нескольким крупным открытиям. Промышленное производство пенициллина стало возможным только благодаря тому, что был найден штамм пенициллинового гриба, способный вырабатывать антибиотик в больших количествах. В 1941 году эта «красивая золотая плесень» была найдена на гниющей мускусной дыне канталупе на рынке в Иллинойсе лаборанткой Мэри Хант, после того как лаборатория призвала граждан сдавать для исследований плесень. До этого момента пенициллин было очень трудно достать и его производство обходилось крайне дорого.

Найти грибные штаммы — это одно. Выделить их и проверить их действие значительно сложнее. Хант, конечно, обнаружила плесень, но ее пришлось везти в лабо-

раторию на проверку. В этом и заключались мои сомнения по поводу метода Маккоя. Как смогут радикальные микологи выделить и вырастить новые штаммы, не имея доступа к хорошо оснащенным лабораториям? Стерильные установки, закачивающие чистый воздух, химические вещества высочайшей степени очистки, дорогое оборудование, работающее с тихим жужжанием в машинном отделении, — несомненно, все это было необходимо, чтобы исследование шло по-настоящему успешно.

Мне хотелось узнать больше, поэтому я посетил один из курсов Маккоя по выращиванию грибов, которые он проводил в Бруклине, Нью-Йорк, по выходным дням. На занятиях собралось весьма смешанное общество: художники, педагоги и воспитатели, муниципальные проектировщики и плановики, компьютерные программисты, один университетский лектор, предприниматели и шеф-повара. Маккой стоял за столом, заваленным лабораторными чашками, полиэтиленовыми мешками, наполненными зерном, и коробками, набитыми шприцами и скальпелями, — набор оборудования современного грибовода. Большая кастрюля с водой, наполненная студенистыми грибами аурикуляриями уховидными («иудиными ушами»), томилась на плите. Во время чайного перерыва мы наливали этот напиток себе в кружки. Радикальная микология на своем растущем грибном отростке — вот что это было. Или, скорее, на одном из ее отростков.

За выходные стало понятно, что область любительского разведения грибов развивается и расширяется с бешеной скоростью. Активно экспериментирующие грибные энтузиасты составляют единую сеть с хорошо налаженными связями, которая уже ускоряет получение информации и накопление знаний о грибах. Такие методики, как секвенирование ДНК, остаются недоступными для многих, но недавние достижения делают возможными операции, которые еще 10 лет назад были совершенно невозможны для любителей. Большинство из них — остроумные, низкотехнологические решения, которые находят непрофессиональные производители магических грибов, выращивающие их

в бытовых условиях. Многие из этих решений представляют собой усовершенствования и дополнения к методам, разработанным и опубликованным Терренсом Маккенной и Полом Стемцем в их руководствах по разведению грибов. И хотя проект Маккоя по трансформации микологии подразумевает создание общественных лабораторий, многое вполне осуществимо и без них.

Наиболее революционная инновация появилась в 2009 году. Основатель форума производителей волшебных грибов *mycotopia.net*, известный только по нику *hippie3*, придумал способ выращивать грибы, не опасаясь загрязнения. Это изменило буквально все. Загрязнение — это угроза для всех грибных фермеров. Только что стерилизованный материал — это биологический вакуум; если позволить богатому всевозможными организмами и веществами воздуху доступ к нему, вся эта жизнь ворвется внутрь. Используя предложенный *hippie3* метод «инжекторного ввода пробы», непрофессиональные производители грибов могут забыть о дорогом оборудовании и сложных процедурах. Все, что им теперь понадобится, — это шприц и модифицированная банка из-под варенья. Информация распространилась быстро. С точки зрения Маккоя, это было одно из самых важных достижений в истории микологии — «лабораторные результаты, полученные без лабораторного оборудования и помещения», — навсегда изменившее выращивание грибов. Он усмехнулся и выпустил из шприца, который был у него в руке, маленькую струйку: «Возлияние во славу *hippie3*».

Мне стало смешно при мысли о командах микохакеров, слоняющихся вокруг серьезных проблем, не зная, как к ним подойти, так же как у Маккоя мицелий вешенки замирал на краю лужицы глифосата, экспериментируя с разными ферментами, пока не нашел тот, который помог ему пройти сквозь нее. Маккоя обучал радикальных микологов выращивать грибы дома так, чтобы они смогли затем научить грибные штаммы извлекать пользу для себя из очередной токсической оплошности человека. Даже при относительно низкой стимуляции эта область могла

быстро развиваться. Я представил себе толпы энтузиастов, собирающихся вместе, чтобы устроить гонки между выращенными дома грибными штаммами по дьявольским зарослям токсических отходов в надежде выиграть ежегодный приз — 1 миллион долларов США.

Еще столько остается неизвестного. Микология, радикальная или нет, еще переживает свое детство. Люди выращивают и одомашнивают растения уже более 12 000 лет. А грибы? Первые упоминания о выращивании грибов относятся к эпохе, наступившей примерно 2000 лет назад, и дело было в Китае. Памяти У Сань Куня (*Wu Sang Kwung*), которому приписывают изобретение способа выращивания грибов шиитаке — еще одной разновидности грибов, вызывающих белую гниль древесины, — в Китае примерно в 1000 году н. э., посвящен ежегодный праздник, и по всей стране возводятся храмы в честь его достижений. К концу XIX века в известняковых катакомбах, испещряющих Париж под землей, сотни фермеров выращивали тысячи тонн «парижских» грибов — шампиньонов — ежегодно. И все же лабораторные методы исследования грибов возникли только около 100 лет назад. Многим технологиям, которым Маккой обучает своих слушателей, включая и «инжекторный» метод *hippie3*, всего около 10 лет от роду.

Курс Маккоя закончился в атмосфере трепетного возбуждения, идеи витали в воздухе. «Играть можно по-разному, — улыбнулся он, в его голосе были провокация и поддержка одновременно. — Мы очень многого не знаем». За все время своего существования грибы привносят в жизнь «изменения от корней». Люди в эту историю попали последними. Сотни миллионов лет многие организмы формировали радикальные партнерские связи с грибами. Многие из них — такие, как отношения растений с микоризными грибами, — стали самыми важными моментами в истории живых существ, повлекшими за собой далеко идущие последствия. Сегодня существует множество других существ помимо людей, выращивающих грибы изощренными способами с радикальными результатами. Можно ли считать эти отношения древними предвестниками радикальной микологии?

Африканские термиты-макротермесы являются одним из самых поразительных этому примеров. Макротермесы, как и многие термиты, проводят большую часть своей жизни, разыскивая и собирая древесину, хотя съесть ее они не могут. Вместо этого термиты выращивают гриб-дерево-разрушитель — термитомицес (*Termitomyces*), — который переваривает древесину за них. Термиты пережевывают древесину до состояния суспензии, а затем отгрызают ее в грибном саду — грибных сотах, чтобы отличать их от пчелиных медовых сот. Гриб использует радикальную химию, чтобы окончательно разложить древесину. Термиты поглощают остающийся после этого компост. Для размещения гриба макротермесы строят высоченные курганы-термитники, иногда до девяти метров в высоту, некоторым из которых более 2000 лет. Социальное устройство у термитов-макротермесов, так же как и у муравьев-листорезов, одно из самых сложных среди групп насекомых.

Термитники макротермесов — гигантский, выведенный наружу кишечник — протезный орган метаболизма, позволяющий им разлагать сложные материалы, которые они сами не могут расщепить. Как и выращиваемые ими грибы, макротермесы вносят путаницу в понятие индивидуальности. Один термит не может выжить без своей семьи. Семья термитов не сможет выжить, если ее отделить от грибных культур и других микроорганизмов, которые обеспечивают им питание и которых кормят сами термиты. Это плодотворное партнерство: существенная часть дерева, разлагаемого в африканских тропиках, проходит через термитники макротермесов.

В то время как люди получают доступ к энергии, заключенной в лигнине, физически сжигая древесину, макротермесы помогают грибу-деревоуничтожителю сжигать ее химически. Термиты используют такие грибы так же, как радикальный миколог мог бы привлечь вешенку к расщеплению сырой нефти или окурков. Или так же, как не менее радикальный миколог мог бы отдать на откуп свой метаболизм грибам в бочках и банках, используемых для брожения вина, квашения соевых бобов для изготовления

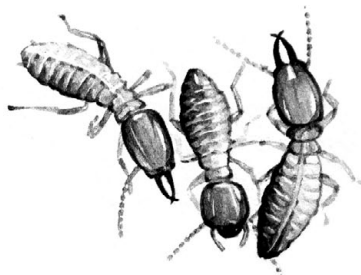
мисо или сквашивания молока для получения сыра. Однако о том, кто был первым, даже вопрос не ставится. Макротермесы выращивали грибы уже более 20 миллионов лет к моменту появления рода человеческого. И действительно, когда дело доходит до термитомицеса, оказывается, что технологии выращивания грибов у термитов намного превосходят человеческие. Плодовые тела термитомицеса — деликатес (и их шляпки могут вырастать до метра в диаметре, превращая их в одни из самых крупных в мире грибов). Но несмотря на продолжительные попытки, люди так и не нашли способ одомашнить их. Грибам требуются точно сбалансированные условия, которые термиты создают для них сочетанием архитектуры термитников с бактериальными участниками их симбиоза.

Мастерство термитов не прошло мимо людей, живущих вокруг них. Радикальная химия грибов-дереворазрушителей — и ее удивительная сила — уже давно вплетены в человеческую жизнь. По сообщениям, термиты ежегодно пожирают в Соединенных Штатах недвижимость стоимостью от 1,5 до 20 миллиардов долларов США. (Как замечает Лайза Маргонелли в книге «Невидимое насекомое» (*Underbug*), североамериканские термиты чаще всего описываются как «поедающие» частную собственность, как если бы у них были какие-то анархические или антикапиталистические намерения.) В 2011 году термиты пробрались в один из банков Индии и съели 10 миллионов рупий в банкнотах (в пересчете — 225 000 долларов США). И вот неожиданный поворот темы радикального грибного партнерства: один из «шести способов, при помощи которых грибы могут спасти мир» Стемеца, — изменение биологии определенных болезнетворных грибов таким образом, чтобы они смогли обойти защиту термитов и уничтожить их колонии (это тот же гриб — плесневый гриб метаризиум, — который, возможно, уничтожит в будущем популяции малярийных комаров).

Антрополог Джеймс Феархед описывает, как фермеры во многих частях Западной Африки потворствуют распространению термитов, потому как те «будят» почву. Иногда люди едят землю, взятую изнутри термитников, или на-

мазывают ею раны. В этой земле обнаружено множество положительных свойств: она служит и минеральной добавкой, и антидотом против многих ядов, и антибиотиком. Термиты-макротермсы в своих термитниках культивируют производящие антибиотики бактерии, стрептомицеты. Людям, помимо всего прочего, даже удавалось превращать партнерские отношения между макротермсами и их грибами в оружие для радикальных политических акций. В начале XX века у побережья в Западной Африке местные жители тайком выпустили термитов на заставу колониальной французской армии. Побуждаемые ненасытным аппетитом их грибных партнеров, термиты разрушили здания заставы и сжевали бюрократические бумаги. Французский гарнизон быстро оставил свой пост.

В духовной иерархии целого ряда западноафриканских культур термиты занимают положение выше человека. В некоторых из них термиты-макротермсы изображены посредниками между богами и людьми. В других — вообще Господь смог создать Вселенную только при поддержке своего помощника термита. В этих мифах термиты-макротермсы изображены не только разрушителями. Они строители самого крупного масштаба.



Термиты-макротермсы (*Macrotermes*)

Мысль о том, что грибы можно использовать не только для разложения и разрушения, но и для созидания, начинает постепенно завоевывать популярность во всем мире. Материал, изготовленный из внешних слоев шляпки шам-

пиньонов портобелло, вполне может заменить в будущем графит в литиевых батареях и аккумуляторах. Мицелий некоторых видов грибов является эффективным заменителем кожного покрова и используется хирургами для ускорения заживления ран. А в Соединенных Штатах компания *Ecovative Design* выращивает строительные материалы из мицелия.

Я отправился в исследовательский и производственный комплекс компании *Ecovative Design* в индустриальном парке на севере штата Нью-Йорк. Войдя в лобби, я оказался со всех сторон окружен продукцией из мицелия. Доски, кирпичи, звукоизолирующие плитки и формованные упаковки для винных бутылок. Все эти вещи были светло-серого цвета с грубой текстурой и напоминали картон. Рядом с мицелиевым абажуром и барным стулом стояла коробка, наполненная белыми кубиками из мягкого вспененного мицелия. Рядом лежал кусок мицелиевой кожи. Мне показалось, что я оказался среди декораций сатирического телевизионного шоу, тщательно продуманного розыгрыша, высмеивающего людей, высокопарно заявляющих о том, что грибы спасут мир.

Эбен Байер, молодой президент *Ecovative*, застал меня щупающим кусок мицелия. «*DELL* перевозит свои серверы в такой упаковке. Мы отправляем им полмиллиона штук в год. — Он указал на барный стул. — Безопасная, здоровая, выращенная экологически чистым способом мебель». Сиденье было обтянуто мицелиевой кожей и набито вспененным мицелием. При заказе одного из таких стульев он придет к вам в мицелиевой упаковке. В то время как вся суть микоремедиации состоит в переработке и избавлении от последствий нашей деятельности, «микропроизводство» по сути своей заключается в воссоздании материалов того типа, которыми мы изначально пользовались. Это ян к инь разложения.

Как и радикальные микологи, с которыми я встречался в Орегоне и Бруклине, *Ecovative* перенаправляет потоки сельскохозяйственных отходов для кормления своих грибов. Из опилок и стеблей зерновых вырастают материаль-

ные ценности. Это опять тот же троекратный выигрыш грибов: для производителя отходов, для производителя грибов и для самого гриба. Только в случае с *Ecovative* появились еще и дополнительные плюсы. Одним из давнишних стремлений Байера является избавление от загрязняющих окружающую среду производств. Упаковочные материалы, выращиваемые компанией, должны вытеснить пластик. Их строительные материалы предназначены для замены кирпича, бетона и древесностружечных плит. Их имитирующий кожу текстиль используется вместо кожи животных. Сотни квадратных футов мицелиевой кожи можно вырастить меньше чем за неделю, используя при этом материалы, которые все равно были бы выброшены. В конце их службы мицелиевые продукты можно отправить в компост. Материалы, создаваемые компанией, водонепроницаемые, легкие и огнеупорные. Они выдерживают большие компрессионные нагрузки, чем бетон, и обладают лучшей упругостью, чем деревянный каркас. Они обладают лучшими теплоизолирующими свойствами, чем вспененный полистирол, и их можно вырастить за несколько дней, придав им какую угодно форму, без ограничений (исследователи в Австралии разрабатывают термитоустойчивый кирпич, соединяя мицелий траметеса разноцветного с раскрошенным стеклом, — продукт, который бы позволил обойтись без убивающих термитов грибов *Стемеца*).

Потенциал мицелиевых материалов не остался незамеченным. Дизайнер Стелла Маккартни работает с грибной кожей, выращенной по методу *Ecovative*. У *Ecovative* тесные связи с *ИКЕА*, которые разрабатывают способы замены их упаковок из пенополистирола мицелиевым аналогом. Исследователи *NASA* заинтересовались микоархитектурой и ее потенциалом для возведения построек на Луне. *Ecovative* только что получила 10 миллионов долларов по контракту на исследование и разработки от *DARPA* — Управления перспективными разработками Министерства обороны США. *DARPA* интересуется возможностью выращивать из мицелия самовосстанавливающиеся в случае повреждения казармы, которые можно будет переработать, когда срок их

службы окончится. Выращивание жилья для солдат не входило в первоначальные планы Байера, но эти технологии можно адаптировать к чему угодно. «Мы можем использовать эти методы для создания временных укрытий в зонах бедствий, — заметил Байер. — Используя мицелий, можно при очень низких затратах вырастить большое количество жилищ для множества людей».

Основная идея очень проста. Мицелий сплетается в очень плотную ткань. Затем живой мицелий высушивается, пока не превратится в мертвый материал. Какой конечный продукт получится, зависит от того, как мицелию давали расти. Кирпичи и упаковочные материалы формируются, когда мицелий «проходит» сквозь взвесь сырых опилок, упакованных в формы. Гибкие материалы делаются только из чистого мицелия. Окрасьте его, и вы получите кожу. Высушите — и у вас будет вспененный материал, из которого можно сделать что угодно, от стелек до плавучего дока. Если Маккой и Стемец приучают грибы к новым видам метаболической активности, то Байер приучает их к новым формам роста. Можно всегда полагаться на то, что мицелий вольется в новое окружение, будь то лужица нейротоксина или формовочная заготовка для абажура лампы.

Байер и я прошли через несколько распаивающихся от толчка дверей и оказались в ангаре такого размера, что в нем можно было бы построить самолет. Деревянные щепки и другое сырье скользили по желобам в вертящиеся барабаны, где они перемешивались в пропорциях, строго контролируемых программными алгоритмами, подающими информацию на ряды компьютерных мониторов. Двадцатифутовые архимедовы винты отмеряли потоки опилок, по полтонны в час, направляя их поочередно в нагревающие и охлаждающие камеры. Штабели пластиковых форм перевозились от камер для выращивания мицелия к сушильным установкам 10-метровой высоты. Каждая камера предлагала обитателям управляемый цифровыми технологиями микроклимат: свет, влажность, температура, уровни концентрации кислорода и углекислого газа варьировались

в точно запрограммированных циклах. Это был промышленный, созданный человеком эквивалент термитника, построенного термитами-макротермесами.

Подобно центру по выращиванию грибного мицелия, в *Ecovative* термитники макротермесов представляют собой тщательно регулируемые микроклиматические камеры, построенные таким образом, чтобы отвечать всем требованиям их гриба. Открывая и закрывая туннели внутри труб и галерей, термиты могут регулировать температуру, влажность и уровни концентрации кислорода и углекислого газа. Посреди пустыни Сахара термиты способны создать прохладные влажные условия, в которых их гриб будет успешно расти.

Как и в термитниках макротермесов, грибы, выращиваемые в *Ecovative*, являются видами гриба-древоразрушителя. Большая часть продукции выращивается из мицелия ганодермы, плодовые тела одного из видов которого известны как трутовик лакированный. Для других продуктов используют вешенки, а для третьих — трутовик разноцветный, который в [англоязычной] литературе зовется индюшачьим хвостом. Именно вешенки Маккой приучил переваривать глифосат и сигаретные окурки. И именно траметес разноцветный был обучен сотрудниками Стемеца перерабатывать токсичный предшественник газа VX. Так же как различные штаммы грибов отличаются своей готовностью разлагать нейротоксины или глифосат, грибные разновидности отличаются по скорости роста и по тому, какой материал вырастет из их мицелия.

Ecovative обладает патентом на свой производственный процесс и ежегодно выращивает более 400 тонн мебели и упаковочного материала, но успешность их модели бизнеса не зависит от того, будут ли они главным производителем мицелиевой продукции. В 31 стране мира существуют организации и индивидуальные предприниматели, имеющие лицензию от *Ecovative* на использование их наборов «Вырасти сам» и выпускающие все — от мебели до досок для серфинга. Большой популярностью пользуются осветительные приборы (недавно была запущена в про-

изводство лампы *MushLume*). Дизайнер в Нидерландах изготавливает мицелиевые домашние тuffли. Национальное управление океанических и атмосферных исследований США заменило вспененный пластик на мицелиевый аналог в кольцах-буях, используемых для плавучих детекторов цунами.

Один из самых амбициозных планов строительства из мицелиевых материалов представляет *FUNGAR (Fungal Architectures)*. *FUNGAR* — это международный консорциум ученых и дизайнеров, которые намереваются создать полностью грибное здание, сочетая мицелиевые композитные материалы с грибными «вычислительными схемами», которые будут определять уровни освещенности, температуры, загрязнения и реагировать на них. Ведущий специалист Андрей Адамацкий, исследователь, предлагает применить мицелиевые сети для получения информации при помощи электрических импульсов, которые проходят по их гифам. Мицелиевые сети вырабатывают электрические импульсы, только пока они живы, и эту проблему Адамацкий надеется преодолеть, побуждая живой мицелий поглощать электропроводящие частицы. Мертвые и законсервированные, эти мицелиевые сети будут использованы для создания электрических схем из мицелиевых проводов, проводников и конденсаторов — «вычислительной сети, которая заполнит каждый кубический миллиметр этого здания».

Гуляя по производственным цехам *Ecovative*, мне было сложно избавиться от ощущения, что горстка видов гриба-дереворазрушителя прекрасно устроилась. Конечно, их убивают, прежде чем будут использованы выращенные ими материалы. Но только после того, как будет удовлетворен их аппетит. И только после того, как их введут еще раз в сотни фунтов свежепастеризованных опилок. Как Маккой и радикальные микологи, которые буквально — и фигурально — разносят грибные споры по миру, *Ecovative* служит всемирной системой распространения некоторых видов грибов. Грибы становятся одновременно и технологией, и партнерами в этих новых отношениях с человеком.

Еще рано говорить о том, к чему приведут отношения с грибами, которые создаются сейчас *Ecovative*. Столкнувшись с проблемой, как добраться до энергии, заключенной в растительном материале, термиты-макротермсы уже 30 миллионов лет выращивают огромное количество грибов-дереворазрушителей в специально созданных «производственных центрах». Термиты-макротермсы и термитомицесы титанические так долго живут вместе, что ни один из них не сможет обойтись без другого. Время покажет, приведет ли микопроизводство людей и грибы к взаимной зависимости в симбиозе, но уже понятно, что в очередной раз глобальный кризис оборачивается хороводом возможностей для грибов. И снова потоки человеческих отходов переосмысляются с точки зрения грибов и их appetitов. Некоторые тенденции распространяются как зараза. Я начал размышлять о том, что было бы, если бы я стал грибом.

Если кто-то и знает, что значит стать грибом, так это Пол Стемец. Мне очень часто хотелось понять, не поселился ли в нем какой-нибудь экземпляр, который наполняет его микологическим пылом — и неистребимым желанием убедить человечество, что грибы стремятся вступить с нами в новые и необычные партнерские отношения. Я поехал к нему в гости — в дом на западном побережье Канады. Он стоит на краю гранитного обрыва и обращен окнами к морю. Крыша держится на стропилах, напоминающих гимениальные грибные пластины. Будучи поклонником «Звездного пути» с 12 лет, Стемец окрестил свой новый дом «Звездолет Агарикон» (*Starship Agarikon*) в честь лечебного, разлагающего древесину гриба — листовничной губки, *Laricifomes officinalis*, иначе *agarikon*, или агарикус, — растущего в лесах на северо-западе тихоокеанского побережья.

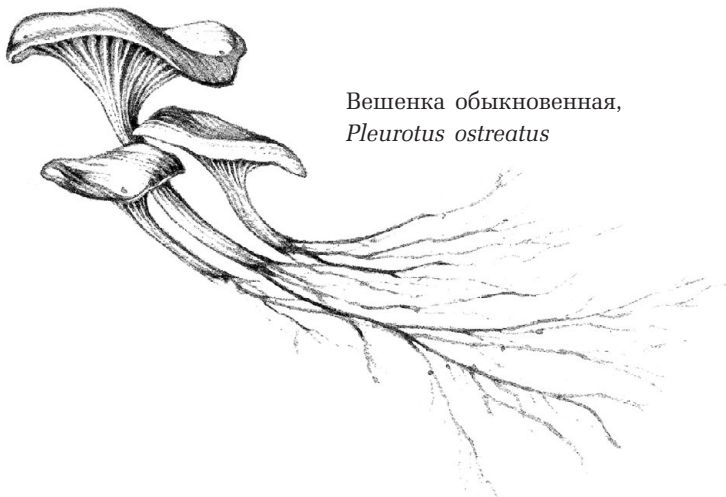
Я знаком со Стемцем с тех пор, как был подростком, и он сделал очень многое, чтобы возбудить во мне интерес к грибам. При каждой нашей встрече на меня обрушивается шквал коротких информационных сообщений. За минуты его микологическая скороговорка набирает скорость, и он перепрыгивает с одной сводки новостей на другую быстрее, чем успевает выговорить сообщение до конца. Это

нескончаемый поток грибного энтузиазма. В его мире грибные решения проблем выходят из-под контроля, неистовствуют. Дайте ему неразрешимую задачу, и он метнет вам новый способ ее решения путем разложения, отравления или излечения с помощью какого-нибудь гриба. Большую часть времени он носит шляпу, сделанную из трута — напоминающего войлок материала, производимого из плодового тела гриба-трутовика, или *Fomes fomentarius*, еще одного гриба-дереворазрушителя. Он создает подходящие ассоциации. Трут использовался людьми для разжигания огня тысячи лет — он был в руках у прачеловека Этци, хорошо сохранившегося в течение 5000 лет в леднике первобытного человека. Это одно из древнейших орудий для разведения огня и один из самых древних ныне известных примеров радикальной микологии.

Незадолго до моего приезда со Стемецем связалась творческая группа, создающая сериал «Звездный путь: Дискавери», которая хотела узнать побольше о его работе. Он согласился ознакомить их с тем, как можно было бы использовать грибы для спасения миров. И само собой, «Звездный путь: Дискавери», премьера которого состоялась на следующий год, пестрел микологическими темами. Был введен новый персонаж, блестящий астромиколог, лейтенант Пол Стемец, использующий грибы для разработок мощных технологий, которые можно применить для спасения человечества в сражении против многочисленных смертельных угроз. Творческая группа «Звездного пути» позволила себе много вольностей, хотя вряд ли это было необходимо. Подключившись к межгалактическим мицелиевым сетям — «бесконечное число дорог, ведущих во все концы», — (выдуманный) Стемец и его команда находят способ перемещения в «мицелиевом летательном аппарате» быстрее света. После своего первого погружения в мицелий Стемец приходит в себя, потрясенный и преобразенный. «Я провел всю свою жизнь, пытаюсь понять суть мицелия. Теперь я ее постиг. Я видел сеть. Целая вселенная возможностей, о существовании которой я даже не мечтал».

Одна из проблем, которую (реальный) Стемец надеялся разрешить, пойдя на сотрудничество с командой «Звездного пути», — недостаток внимания и интереса к микологии. Искусство подражает жизни, жизнь подражает искусству. Выдуманные герои-астромикологи, быть может, сумеют сформировать невыдуманное будущее для грибных знаний, вдохновив поколение молодых людей воспринимать грибы с радостным волнением. Для (настоящего) Стемца всплеск интереса к грибам мог бы вызвать разработку микологических технологий, которые, возможно, «помогли бы спасти планету, оказавшуюся в смертельной опасности».

Когда я появился в “Звездолете Агарикон”, Стемец сидел на палубе и возился со стеклянной банкой с завинчивающейся крышкой и синим пластмассовым блюдом. Это был прототип кормушки для пчел, которую он изобрел. Из банки на блюдо тонкой струйкой тек сахарный сироп, в который были добавлены грибные экстракты, а пчелы выползали через лоток, чтобы до него добраться. Это было его новейшее предприятие — седьмой способ, которым грибы могли помочь в спасении мира. Даже по меркам Стемца этот проект должен был стать настоящей сенсацией. Его последняя работа в соавторстве с энтомологами из апиологической лаборатории Университета штата Вашингтон была принята престижным изданием — журналом *Nature*.



Вешенка обыкновенная,
Pleurotus ostreatus

Scientific Reports. Он и его команда продемонстрировали, что экстракты определенных видов грибов-дереворазрушителей могут быть использованы для существенного снижения смертности среди пчел.

Примерно треть объема мировой сельскохозяйственной продукции зависит от насекомых-опылителей, особенно медоносных пчел, а резкое уменьшение популяции пчел является одной из множества требующих срочного разрешения проблем человечества. Целый ряд факторов способствуют распространению заболевания, известного как синдром разрушения пчелиных семей. Один из них — массированное употребление инсектицидов в сельском хозяйстве. Потеря ареалов природного обитания — еще один фактор. Самой коварной проблемой, однако, является паразитический клещ варроа, *Varroa destructor*. Клещи варроа — паразиты, высасывающие жидкость из тел пчел и к тому же являющиеся переносчиками ряда смертоносных вирусов.

Грибы, разлагающие посредством гниения древесину, являются богатым источником противовирусных соединений, многие из которых уже давно используются в медицине, особенно в Китае. После трагедии 11 сентября 2001 года Стемец сотрудничал с Национальным институтом здравоохранения и Министерством обороны США в работе над проектом *BioShield* («Биощит») в поиске соединений, которые могли бы быть использованы для отражения вирусных бурь, выпущенных на свободу биологическими террористами. Из тысяч протестированных соединений некоторые из экстрактов, полученных Стемцем из грибов, разлагающих древесину, оказывали самое сильное противовирусное действие на целый ряд смертоносных инфекций, включая натуральную оспу, герпес и грипп. Он уже несколько лет выпускал эти экстракты для лечения людей — в основном именно благодаря этой продукции его компания *Fungi Perfecti* превратилась в многомиллионный бизнес. Но идея использовать их для лечения пчел оказалась более новой, блестящей находкой.

Эффективность грибных экстрактов против вирусных инфекций пчел не вызвала сомнений. Добавление в пче-

линый сахарный сироп однопроцентного экстракта трутовика настоящего, *Fomes fomentarius*, и ганодермы, *Ganoderma* (один из видов которой используется для выращивания материалов в *Ecovative*), в 80 раз снизило заболеваемость вирусом деформации крыла. Экстракт трутовика настоящего сократил поражения вирусом озера Синай почти в 90 раз, а экстракт ганодермы уменьшил заболеваемость этим вирусом в 45 000 раз. Стив Шепард, профессор энтомологии в Университете штата Вашингтон и один из коллег Стемеца по проекту, отметил, что еще не сталкивался ни с каким другим веществом, которое могло бы настолько продлить жизнь пчел.

Стемец рассказал мне, как ему пришла в голову эта мысль. Он дремал. Неожиданно отдельные бессвязные мысли слились воедино и поразили его, «как удар молнии». Если грибные экстракты обладают противовирусными свойствами, возможно, с их помощью можно снизить заболеваемость вирусными инфекциями у пчел — и да, он действительно вспомнил, что в конце 1980-х годов наблюдал, как пчелы из его ульев подлетали к куче гниющей древесной щепы в его саду, отодвигали в сторону кусочки дерева, чтобы добраться до мицелия под ними и поесть. «Бог мой! — Стемец проснулся. — Мне кажется, я знаю, как спасти пчел». Момент был очень важным даже для того, кто десятилетиями выдумывал грибные решения для неподатливых проблем.

Легко понять, почему «Звездный путь» позаимствовал образ Стемеца. Его стиль изложения вышел напрямую из американских блокбастеров. Во многих его отчетах фигурируют героини-грибы, готовые спасти планету от почти неизбежного конца: *«Вирусные бури беспрецедентного масштаба угрожают безопасности мировой пищевой промышленности. Главные опылители трудятся из последних сил под серьезнейшей угрозой, исходящей от переносчиков вирусов, способных вызвать голод на всей планете. Будущее мира висит на волоске. Но подождите. Что это?.. Да! И снова грибы приходят на выручку своим союзникам — людям. Стемец»*.

Смогут ли противовирусные соединения, производимые разлагающими древесину грибами, действительно спасти пчел? Находки Стемеца многообещающи, но еще слишком рано утверждать, приведут ли грибные экстракты к долговременному снижению заболеваемости синдромом разрушения пчелиных семей или нет. Вирусные инфекции — лишь одна из многочисленных проблем, возникающих у пчел. Неизвестно, проявят ли противовирусные грибные препараты себя так же успешно в других странах и обстановке. И что более важно, для спасения популяций пчел решения, предлагаемые Стемецем, должны получить широкое признание, подвиг, который он надеется осуществить при помощи миллионов недипломированных ученых-любителей.

Я отправился на Олимпийский полуостров в штате Вашингтон, чтобы навестить производство Стемеца. Головной офис — это кластер больших, похожих на ангары помещений, окруженных лесом, в нескольких километрах от хожевых троп. Именно здесь Стемец вырастил те грибы, из которых были получены экстракты для проекта. Именно здесь вскоре предстояло увеличить производство, чтобы выпустить продукт на рынок для широкого потребления. Через несколько месяцев после публикации его работы о пчелах Стемец получил десятки тысяч заказов на пчело-грибную кормушку (*BeeMushroomed Feeder*). Будучи не в состоянии удовлетворить спрос, Стемец планирует поместить трехмерный дизайн-проект в открытый доступ в надежде, что другие сами займутся производством этих кормушек.

Я встретился с одним из директоров производства, с которым заранее договорился о том, что он покажет мне все. На производстве соблюдались строжайшие требования к одежде: никакой уличной обуви, лабораторный халат и сетка на волосы — для бороды сеточки тоже предоставлялась. Мы экипировались и прошли через специальные двойные двери, должны ограничить доступ наполненному примесями и загрязнителями воздуху снаружи.

Мы вошли в теплицы, где выращивались плодовые тела грибов, где было тепло и сыро, а воздух был густым и при-

торным. Там стояли ряды полок, уставленные прозрачными мешками для рассады, все пространство в которых было прошито и заполнено мицелием. Из него выпячивались всякие поразительные формы, от трутовика лакированного с его блестящими каштановыми одежками до львиных грив ветвящихся отростков, напоминавших хрупкие, кремового цвета кораллы, вываливавшиеся из своих мешков. В комнате, где росли трутовики, воздух был настолько наполнен спорами, что я мог ощутить их мягкую, влажную горечь. Буквально через пару минут мои руки были покрыты коричневым, цвета капутино, налетом.

И снова люди не жалели усилий, чтобы перенаправить тонны еды в грибные сети. И снова мировой кризис обращался в возможности для грибов. Подобно задаче, которая встала перед мицелием вешенки, задержавшимся на краю лужицы токсичных отходов, суть радикальных мицелиевых решений была не столько в изобретении чего-то нового, сколько в способности вспомнить хорошо забытое старое. Где-то в глубине генома вешенки существует, вероятно, фермент, который выполнит поставленную перед грибом задачу. Возможно, он уже делал такую работу раньше. Возможно, нет, но его можно переориентировать для выполнения нового дела. Аналогичным образом где-то в ходе истории жизни, быть может, попадалось какое-нибудь грибное свойство или какая-нибудь грибная связь, которые могли бы подтолкнуть нас к новому, то есть хорошо забытому старому, решению одной из наших ужасающих проблем. Я подумал об истории с пчелами. Момент «эврики» для Стемеца наступил тогда, когда он вспомнил нечто, что он видел несколько десятилетий назад — пчел, которые, казалось, лечились при помощи грибов. Стемец не открывал способа лечения пчел грибами. Это открытие сделали сами пчелы, как мы можем предположить, во время борьбы с вирусами за выживание в каком-нибудь замшелом уголке их совместной истории. Где-то в глубине кучи психодуховного компоста своего мира грез Стемец метаболизировал некое старое радикальное микологическое решение, преобразив его в новое.

Я вошел в своеобразные теплицы, уставленные открытыми стеллажами трехметровой высоты с полками. Это были грибные соты. Тысячи мешков, набитых мягкими блоками мохнатого мицелия, заполняли все пространство. Некоторые из них были белыми, другие — желтоватыми, третьи — светло-оранжевого цвета. Мне показалось, что если бы система вентиляции и фильтрации воздуха прекратила работать, я смог бы услышать хруст, издаваемый миллионами миль мицелия, поглощавшего свою еду. После сбора урожая мешки с мицелием погружались в большие бочки со спиртом для получения экстракта, который должен вылечить пчел. Как и в случае со многими другими радикальными микологическими решениями, здесь пока еще нет определенности; это первые осторожные шаги к возможности взаимно гарантированного выживания, симбиоз на самой ранней стадии младенчества.

ГЛАВА ВОСЬМАЯ

ГРИБНАЯ СУТЬ

Имеет значение, какие истории рассказывают истории, какие концепции мыслят концепциями и какие системы систематизируют системы.

— ДОННА ХЭРОУЕЙ*

Грибы, история которых теснее всего связана с историей человечества, — это дрожжевые грибы. Они населяют нашу кожу, легкие и пищеварительный тракт. Кроме того, они выстилают все отверстия и проходы в нашем теле. Наши тела научились регулировать эти популяции, потому как упражнялись в этом на протяжении всей истории нашей эволюции. И тысячи лет человеческие цивилизации разрабатывали всевозможные ухищрения, чтобы контролировать популяции дрожжевых грибов за пределами наших тел — в бочках, кувшинах и банках. В наши дни дрожжевые грибы чаще всего используются в качестве модельных организмов в биологии клетки и генетике: они самые простые оболочки для эукариотических форм жизни, и у многих генов человека есть эквиваленты в дрожжевых грибах. В 1996 году пекарские дрожжи, *Saccharomyces cerevisiae* (вид дрожжевого гриба, используемый в пивоварении, виноделии и хлебопечении), стали первым эукариотическим организмом, геном которого был секвенирован. С 2010 года

* Основоположница направления мысли, получившего название «киберфеминизм», заметная фигура в современной эпистемологии, философии науки и технологий. — *Прим. изд.*

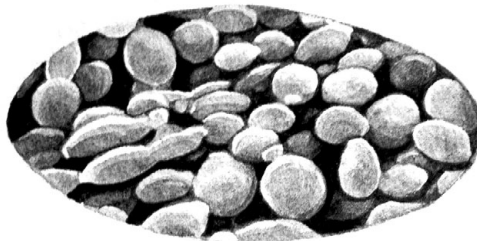
более четверти Нобелевских премий в области физиологии и медицины присуждается за исследования дрожжевых грибов. И все же только в XIX веке обнаружили, что дрожжи являются микроскопическими организмами.

Когда именно люди начали использовать дрожжевые грибы, точно неизвестно. Первому не вызывающему сомнений свидетельству примерно 9000 лет, и оно было найдено в Китае. В Кении, однако, на найденных во время раскопок каменных орудиях, которым уже более 100 000 лет, были обнаружены микроскопические зерна крахмала. Форма зерен позволяет предположить, что орудия, на которых они были замечены, использовались для обработки африканской винной пальмы, *Hurphaene petersiana*, до сих пор используемой для приготовления спиртных напитков. При условии, что в любой сахаросодержащей жидкости, оставленной более чем на один день, начнется сам по себе процесс брожения, вполне возможно, что люди занимаются производством алкоголя намного дольше, чем мы привыкли считать.

Дрожжевые грибы отвечают за превращение сахара в спирт. Антрополог Клод Леви-Стросс утверждал, что они также стали свидетелями одной из самых значительных трансформаций в истории человечества: превращения охотников и собирателей в земледельцев. Он считал, что медовуха — напиток, изготавливаемый из забродившего меда, — стала первым алкогольным напитком, и представлял переход от «естественного» брожения к искусственному «медоварению», используя пример дерева с дуплом. Алкоголь был естественным, природным веществом, если мед бродил «сам по себе», и проявлением человеческой культуры, если люди помещали его в специально выдолбленное дупло дерева для ферментации. (Интересное отличие. Следовательно, макротермеса и муравьи-листорезы перешли от естественного к искусственному за десятки миллионов лет до человека).

Леви-Стросс может быть прав — или не прав — в отношении медовухи. Тем не менее дрожжевые грибы, напоминающие современные и используемые для приготовления алкоголя, появились примерно одновременно с одомашнен-

ными козами и овцами. Появление земледелия примерно 12 000 лет тому назад — в переходный неолито-энеолитический период — может быть хотя бы частично объяснено реакцией человеческой цивилизации на использование дрожжевых грибов. Именно из-за хлеба или пива человечество стало отказываться от кочевого образа жизни и переходить на оседлый, образуя малоподвижные сообщества (гипотеза о появлении пива до хлеба с 1980-х годов становится все более притягательной среди ученых). И неважно, благодаря чему — выпеканию хлеба или пивоварению, но дрожжевые грибы становились главными выгодоприобретателями первых земледельческих усилий человечества. При приготовлении любого из этих пищевых продуктов человек сначала кормит дрожжевой гриб, а потом себя. Развитие культуры земледелия и того, что с этим связано, — полей, засаженных культурными растениями, и городов, накопления богатства, появления зернохранилищ и новых болезней — образует часть общей истории — нашей и дрожжевых грибов. Можно сказать, что во многих отношениях дрожжевые грибы одомашнили нас.



Дрожжевой гриб *Saccharomyces cerevisiae*,
используемый в алкоголеварении

Мои собственные отношения с дрожжевыми грибами подверглись трансформации в университете. У одной из моих соседок был друг, навещавший ее регулярно. Вскоре после его приезда на кухонном подоконнике непременно появлялись большие пластиковые миски, наполненные жидкостью и закрытые пищевой пленкой. «Это вино», —

говорил он мне. Готовить алкоголь он научился у друга, который отбыл срок в тюрьме во Французской Гвиане. Меня все это сильно увлекло, и скоро я обзавелся собственным набором мисок. Все оказалось поразительно просто. Дрожжевые грибы выполняют практически всю работу. Они любят тепло, но не жару, и размножаются с превеликим удовольствием в темноте. Брожение начинается при добавлении дрожжей в теплый сахарный сироп. В отсутствие кислорода дрожжевые грибы преобразуют сахар в алкоголь и выделяют углекислый газ. Брожение заканчивается, когда у дрожжевых грибов заканчивается весь сахар или они умирают от алкогольного отравления.

Я наполнил миску яблочным соком, рассыпал по поверхности пару чайных ложек сухих пекарских дрожжей и оставил у обогревателя в спальне. Я наблюдал, как начинали появляться полоски пены, и пленка, закрывавшая миску, вздувалась пузырем. Время от времени сквозь пленку прорывалась струйка газа, все больше с течением времени пахнувшего алкоголем. Через три недели я уже не мог сдерживать любопытства и прихватил с собой миску на вечеринку, где ее опустошили за несколько минут. Брага оказалась вполне пригодной для питья, может быть, слишком сладкой, и, судя по ее воздействию, содержание алкоголя в ней было примерно таким же, как в крепком пиве.

Дело быстро пошло на лад. Через пару лет у меня уже было несколько больших баков для алкоголеварения, в том числе 50-литровая кастрюля, и я начал готовить напитки по рецептам, которые находил в исторических текстах. Среди них были пряные медовухи из «кладовой сэра Кенельма Дигби», рецепты которых были опубликованы в 1669 году, и разные сорта средневекового грюйт-эля, варившиеся на болотном мирте, который я собирал на ближайшем болоте. Затем последовали боярышниковые настойки, крапивное пиво, лечебный эль, рецепт которого был записан доктором Уильямом Батлером, врачом Якова I, и считался панацеей — верили, что он спасал и от эпидемии чумы, и от кори, и от «других недугов». Вдоль стен в моей комнате стояли бочонки с булькающей жидкостью, а шкаф для одежды был наполнен бутылками.

Одни и те же фрукты я подвергал брожению с дрожжевыми культурами, собранными в разных местах. У некоторых был богатый пикантный вкус. Другие получались мутными и восхитительными. Третьи на вкус были как носки или скипидар. Между зловонным и ароматным была очень тонкая грань, но это не имело значения. Алкоголеварение давало мне доступ к невидимым мирам этих грибов, и я получал удовольствие от того, что мог ощутить на вкус разницу между дрожжевыми грибами, собранными с кожицы яблока или осевшими в тарелке со сладкой водой, поставленной на ночь на полку в старой библиотеке.

Сила преобразования, которой обладают дрожжевые грибы, уже давно воспринимается как воплощение божественной энергии, духа или бога. Да и как бы она смогла избежать такого отношения? Алкоголь и опьянение — одни из самых старых проявлений магического. Невидимая сила извлекает вино из фруктов, пиво — из зерна, медовуху — из нектара. Эти жидкости изменяют человеческое сознание, и в национальные культуры они вплетены в различных качествах: это и часть ритуалов, и характеристика искусства управлять государством, и средство оплаты труда. И все это время они являются причиной помутнения разума, безумия и исступления. Дрожжевые грибы одновременно и создатели, и разрушители социальных порядков.

Древние шумеры, записавшие рецепты пива пять тысячелетий назад, поклонялись богине алкогольных напитков Нинкаси. В «Египетской книге мертвых» молитвы возносятся «дарующим хлеб и пиво». Среди представителей народа чорти (ткорти) в Южной Америке начало ферментации воспринималось как «рождение доброго духа». У древних греков был Дионис — бог вина, виноделия, безумия, алкогольного опьянения и всех плодовых культур вообще, олицетворение власти алкоголя, его способности как созидать, так и разрушать культурные понятия человечества.

Сегодня дрожжевые грибы превратились в биотехнологические орудия, используемые для получения лекарственных препаратов, от инсулина до вакцин. Компания *Bolt Threads*, совместно с *Ecovative* занимающаяся разработкой мицелие-

вой кожи, повторила геном дрожжевых грибов для производства паучьей паутины [и тканей из нее]. Исследователи работают над созданием модели метаболизма дрожжевых грибов, чтобы получать углеводы из древесного растительного материала для использования в биотопливе. Одна научная группа разрабатывает Sc2.0, от начала и до конца синтетический дрожжевой гриб, — искусственную форму жизни, которую проектировщики смогут запрограммировать на производство любого количества соединений. Во всех этих примерах дрожжевые грибы и их способность к трансформации размывают грань между естественным и искусственным, между саморегулирующимся организмом и машиной.

Благодаря своим экспериментам я понял, что искусство винодела и пивовара включает в себя умение вести торговые переговоры с дрожжевыми культурами. Ферментация — это одомашненное разложение, гниение, переселенное на новое место. Если все пройдет успешно, брага выйдет такая, как нужно. Но как это часто случается, когда имеешь дело с грибами, никаких гарантий быть не может. Соблюдая стерильность, температурный режим и используя нужные ингредиенты — то есть держа под контролем все важные факторы, не позволяющие ферментации отклониться от правильного курса, — я мог заманить ее в перспективное русло без какого-либо принуждения и насилия. По этой причине результат всегда был сюрпризом.

Пить многие из исторических браг было увлекательно. Медовухи вызывали смешливость, грюйт-эли делали людей болтливыми. Эль Батлера приносил с собой какую-то особенную золотую тяжесть. А некоторые оказывались запечатанным в бутылке бедствием. Каким бы ни оказывался эффект, я был очарован процессом возвращения к жизни исторических рецептов благодаря алкоголеварению. Старые рецепты изготовления браг — это летописи того, как дрожжевые грибы отражались на человеческих жизнях, разуме и сознании за последние несколько сотен лет. На всех страницах этих книг дрожжевые грибы — безмолвные компаньоны, невидимые участники человеческой культуры и цивилизации. В общем и целом эти рецепты были пове-

ствованием о сути разложения веществ. Они напоминали: важно, какие истории мы используем, чтобы разобраться в мире. История, которую вы слышите о зерне, поможет вам выбрать между хлебом и пивом. История, которую вы узнаете о молоке, оставит вас с йогуртом или сыром. История о яблоках склонит чашу весов в пользу сока или сидра.

Дрожжевые грибы — микроскопические, что весьма поспособствовало образованию многослойных исторических наносов вокруг их жизни. С грибами, дающими плодовые тела, нам всегда было немного проще. Уже давно известно, что грибы могут быть восхитительными на вкус, но могут и отравить, а могут и вылечить, утолить голод или вызвать галлюцинации. Сотни лет восточноазиатские поэты воспевали грибы и их вкусовые оттенки в рапсодических поэмах. «О мацутакэ: / Радостное волнение, прежде чем найдешь их», — восхищался Ямагучи Содо, японский поэт XVII века. У европейских авторов грибы в целом вызывали больше сомнений и опасений. Альберт Великий в своем трактате XIII века «О растениях» (*De Vegetabilibus*) предупреждал, что грибы «влажного состояния» могут «остановить в головах существ [которые едят их] прохождение мыслей и вызвать безумие». Джон Джерард* в 1597 году предупреждал своих читателей, чтобы они вообще не притрагивались к грибам: «Лишь немногие грибы съедобны, многие из них вызывают удушье и смерть у того, кто их ест. Поэтому я даю совет тем, кто любит эту странную новомодную пищу, — побережись, ибо, слизывая мед между шипами, можно за сладостью первого не заметить остроты и колючести последних». Но люди никогда не могли удержаться от грибного соблазна.

В 1957 году Гордон Уоссон**, популяризовавший волшебные грибы в статье, опубликованной в 1957 году в журнале *Life*, и его жена Валентина разработали бинарную систему, с помощью которой все национальные культуры можно было отнести к двум категориям: микофилов и микофобов.

* Английский ботаник и врач. — *Прим. изд.*

** Этноботаник, этномиколог и писатель. — *Прим. изд.*

Уоссон предполагал, что современное отношение к грибам в различных культурах было «поздним эхом» древних культов психоделических грибов. Микофилические культуры были потомками тех, кто боготворил грибы. Микофобные культуры происходили от тех, кто считал власть грибов дьявольской. Микофилические настроения могли вдохновить Ямагучи Содо на сочинение поэм во славу мацутаке или заставить Терренса Маккенну разглагольствовать о достоинствах больших доз псилоцибиновых грибов, обращая слушателей в свою веру. Микофобное отношение может спровоцировать панику, которая приведет к запрету на грибы, или заставит Альберта Великого и Джона Джерарда мрачно предупреждать людей об опасности этой «новомодной пицци». Обе позиции признают власть грибов над человеческими жизнями. Обе воспринимают эту власть по-разному.

Мы постоянно пытаемся вместить организмы в рамки сомнительных категорий. Это один из способов разобраться в них. В XIX веке бактерии и грибы классифицировали как растения. Сегодня ученые признают, что и грибы, и бактерии относятся к собственным, отдельным доменам, однако завоевать независимость им удалось только в середине 1960-х годов. Большую часть задокументированной истории человечества продолжают споры о том, что в действительности представляют собой грибы.

Теофраст, ученик Аристотеля, писал о трюфелях, но смог перечислить только то, чего у них нет. Из его описания следует, что у них нет корней, стебля, ветвей, почек, листьев, цветов и плодов; они не покрыты корой, у них нет смолы, волокон и прожилок. По мнению других классиков, грибы внезапно создавались ударами молний. Третьи считали их порождениями земли, «наростами» на ней. Карл Линней, шведский ботаник XVIII века, создатель современной таксономической системы, писал в 1751 году, что «система грибов — это все еще совершенный хаос, творческий беспорядок, и никто из ученых ботаников не знает, что есть вид, а что — разновидность».

И до настоящего времени грибы умудряются выскользнуть из всех классификаций, которые мы для них созда-

ем. Таксономическая система Линнея была предназначена для животных и растений и не очень успешно справляется с грибами, лишайниками или бактериями. Один и тот же вид гриба может породить формы, не имеющие совершенно никакого сходства друг с другом. У многих грибных видов нет характерных особенностей, которые можно было бы использовать для их идентификации. Достижения в секвенировании генов скорее позволяют систематизировать грибы по группам с единой историей эволюционного развития, нежели сгруппировать их по физическим характеристикам. Однако определение того, где один вид заканчивается, а другой начинается, на основе генетических данных создает ровно столько же проблем, сколько разрешает. В мицелии одного и того же грибного «индивида» могут существовать многочисленные геномы. Внутри ДНК, выделенной из щепотки пыли, могут находиться десятки тысяч уникальных характерных генетических признаков, ни один из которых невозможно привязать ни к одной из известных групп грибов. В 2013 году в статье «Против именованья грибов» (*Against the naming of fungi*) миколог Николас Мани зашел настолько далеко, что предложил полностью отказаться от концепции видов в классификации грибов.

Классификации — это лишь один из способов, к которым люди прибегают, чтобы разобраться в мире. Безапелляционные субъективные суждения — другой. Внучка Чарльза Дарвина, Гвен Рейврат, описывала отвращение, которое в ее тете Этти — дочери Дарвина — вызывал гриб веселка обыкновенная, или сморчок вонючий, он же фаллюс нескромный (*Phallus impudicus*). Фаллическая форма создала сморчкам вонючим скандальную известность. Они также выделяют слизь с резким запахом, который привлекает мух, помогающих разносить их грибные споры. В 1952 году Рейврат писала в своих воспоминаниях: «В наших лесах растет некий гриб, который местные называют сморчком вонючим (хотя на латыни у него более вульгарное название). Местное наименование вполне оправданно, так как гриб можно легко найти только по запаху, и это было великим изобретением тети Этти. Вооруженная корзиной

и заостренной палкой, экипированная в специальный плащ и перчатки для сбора грибов, она, пригнувшись, шла по лесу, останавливаясь ненадолго то здесь, то там. Когда она улавливала запах своей будущей добычи, ноздри ее подергивались, затем она совершала смертоносный прыжок, обрушиваясь на свою жертву, и, подцепив ее на палку, бросала вонючее тело в корзину. Под конец дня охоты улов доставлялся домой и сжигался в глубочайшей секретности в камине гостиной за запертыми дверями — чтобы не смущать девиц-служанок».

Крестовый поход или фетишизм? Микофоб или тайный микофил? Не всегда просто отличить одного от другого. Для человека, испытывающего глубокое отвращение к сморчкам вонючим, тетя Этти проводила слишком много времени, разыскивая их. В своем «спортивном азарте» она, несомненно, лучше, чем любое количество мух, способствовала распространению спор сморчка вонючего. Зловонный запах, перед которым не могли устоять мухи, так же сильно, вероятно, привлекал и тетю Этти, хотя притягательность этого запаха была искажена в ее сознании призмой отвращения. Викторианский ужас мотивировал ее: сморчки не соответствовали тогдашним представлениям о морали, и она стала страстным рекрутом грибной миссии.

Те способы, к которым мы прибегаем в попытке постичь грибы, часто рассказывают нам о нас самих столько же, сколько и о предмете нашего расследования. Шампиньон желтокожий (*Agaricus xanthodermus*) во многих практических руководствах описывается как ядовитый. Увлеченный грибник с большой микологической библиотекой однажды рассказал мне об имевшейся у него старой книге о грибах, в которой тот же самый шампиньон желтокожий описывался как «восхитительный, если его пожарить». Автор, правда, походя обмолвился, что гриб «может вызвать легкую кому у людей со слабым здоровьем». То, как вы воспринимаете шампиньон желтокожий, зависит от вашей физиологии и состояния. Хотя для многих он может оказаться смертельным, некоторые могут лакомиться им без каких-либо дурных для себя последствий. Стало быть, описание также

имеет непосредственное отношение к физиологии человека, занимающегося описанием.

Такого рода предвзятость особенно заметна в обсуждении симбиотических отношений, которые стало принято рассматривать с позиции человека с того самого момента, как слово «симбиоз» было придумано, то есть в конце XIX века. Аналогии, проводимые, чтобы разобраться в лишайниках и микоризных грибах, говорят сами за себя. Господин и раб, жулик и жертва, люди и одомашненные организмы, мужчины и женщины, дипломатические отношения между нациями... Метафоры со временем меняются, но стремление нарядить отношения, выходящие за рамки человеческих, в человеческие одежды продолжают и по сей день.

Как объяснил мне историк Ян Сапп, концепция симбиоза служит призмой, через которую проходят, преломляясь, наши собственные социальные ценности. Сапп говорит очень быстро, и у него цепкий взгляд, подмечающий смешные подробности. Он специализируется на истории симбиоза. Он провел много десятилетий, работая с биологами — в лабораториях, на конференциях, симпозиумах и в джунглях, — когда они ломали голову над вопросами о взаимодействии организмов друг с другом. Он близкий друг Линн Маргулис и Джошуа Ледерберга, а потому с первого ряда наблюдает за тем, как современная микробиология «набирает силу». Политика симбиоза всегда была сложной. Что является основным в природе — соперничество или сотрудничество? Многое зависит от этого вопроса. Для многих он меняет угол зрения на самих себя. Нет ничего удивительного, что эти вопросы остаются своего рода концептуальной и идеологической пороховой бочкой.

В Соединенных Штатах и Западной Европе с конца XIX века, когда начала развиваться эволюционная теория, симбиоз стало принято описывать как соперничество и конфликты, что отражало взгляды человеческого общества на прогресс в рамках промышленного капиталистического общества. По словам Саппа, примеры того, как организмы сотрудничают друг с другом для достижения общей выгоды,

«оставались ближе к периферии благовоспитанного биологического общества». Атмосфера взаимной поддержки, или мутуалистические отношения, такие, как те, благодаря которым появляются лишайники или связи растений с микоризными грибами, считались поразительными исключениями из правила — там, где их существование вообще признавали.

Оппозиция этой точке зрения не проходила четко по линии Восток — Запад. Тем не менее идеи о взаимопомощи и сотрудничестве в процессе эволюции были больше распространены в России, чем среди эволюционистов Западной Европы. Самый сильный удар по представлению о безжалостной «природе, с клыков и когтей которой течет чужая кровь», нанес в 1902 году русский анархист Петр Кропоткин, опубликовавший — говоря современным языком — бестселлер «Взаимопомощь как фактор эволюции». В книге он подчеркивал, что сотрудничество является такой же частью природы, как и борьба за выживание. Основываясь на своем восприятии живого, он призывал: «Избегайте состязания! Оно всегда вредно для вида, и у вас имеется множество средств избежать его!» Такова тенденция природы, не всегда вполне осуществляемая, но всегда ей присущая. Таков лозунг, доносящийся до нас из кустарников, лесов, рек, океанов. «А потому объединяйтесь — практикуйте взаимную помощь! Она представляет самое верное средство для обеспечения наибольшей безопасности, как для каждого в отдельности, так и для всех вместе; она является лучшей гарантией для существования и прогресса физического, умственного и нравственного».

Большую часть XX века обсуждение взаимодействий внутри симбиотических отношений оставалось политически заряженным. Сапп указывает на то, что холодная война заставила биологов серьезнее относиться к вопросам сосуществования в мире в целом. Первая международная конференция по вопросам симбиоза проводилась в Лондоне в 1963 году, через шесть месяцев после того, как Кубинский кризис чуть было не привел мир к атомной войне. Это не было совпадением. Редакторы материалов конференции отмечали, что «насущные проблемы сосуществования в ус-

ловиях современного мира повлияли, вероятно, на выбор комитетом темы для симпозиума в этом году».

Наукой уже давно установлено, что метафоры могут помочь начать мыслить по-новому. Биохимик Джозеф Нидэм описывал работающую аналогию как «систему координат», которую можно использовать для организации прежде бесформенной массы информации, равно как скульптор может использовать проволочный каркас, чтобы создать опору для пластичной глины. Биолог-эволюционист Ричард Левонтин указывал на то, что невозможно «в науке работать», не прибегая к метафорам, учитывая, что «почти вся современная наука — это попытка объяснить явления, которые человек не может испытать непосредственно». Метафоры и аналогии в свою очередь уже приправлены человеческими историями и ценностями, то есть ни одно обсуждение научных идей — включая это — не может быть свободно от предвзятости, характерной для конкретной культуры.

Сегодня микоризные сети — одна из областей не только биологической, но отчасти и политической повестки. Некоторые видят в этих системах некое проявление социализма, в рамках которого лесные богатства могут быть перераспределены. Других вдохновляют семейные ценности и родительская забота млекопитающих, и они представляют, как молодые деревья получают питание через грибницы от более взрослых и крупных «материнских деревьев». Третьи описывают микоризные сети как «биологические рынки», где растения и грибы изображаются рациональными экономическими индивидуумами, заключающими сделки в торговом зале экологической стоковой биржи, распорядясь о «санкциях», «стратегических торговых инвестициях» и получая «рыночную прибыль».

«Вселенная паутина» — термин не менее антропоморфный. Люди не только являются единственными организмами, создающими механизмы: они также выдумали интернет, всемирную паутину — самую политизированную технологию, существующую в наши дни. Использование метафор, связанных с механизмами, для понимания других организмов может быть столь же чревато проблемами, как и заимствование

концепций из социальной жизни людей. В реальности организмы растут и развиваются; механизмы же поддерживаются в рабочем состоянии людьми. Организмы самоорганизуются и самообучаются. Механизмы организуют люди. Метафоры, связанные с механизмами, — это наборы историй и инструментов, которые помогли сделать бесчисленные открытия — настолько важные, что они изменили наши жизни. Но метафоры — не научные факты, они могут привести к проблемам, если регулярно отдавать им предпочтение. Если мы станем воспринимать организмы как механизмы, мы будем склонны обращаться с ними как с техникой.

Только оглянувшись назад, можно определить, какие метафоры оказались наиболее полезными. Сегодня было бы совершенно нелепо пытаться увязать все грибы в категории «носителей инфекций» или «паразитов», как было принято в конце XIX века. И все же до тех пор, пока лишайники не навели Альберта Франка на мысль о слове «симбиоз», других способов описать взаимоотношения различных типов организмов просто не существовало. За последние годы в отчетах о симбиотических отношениях появилось больше нюансов. Тоби Сприбилл, обнаруживший, что лишайники состоят более чем из двух типов организмов, собирает данные в пользу той точки зрения, что лишайники следует рассматривать как системы. Оказывается, лишайники не являются продуктом строго заданного партнерства, как считалось долгое время. Скорее они возникают из множества возможных отношений между рядом различных участников. Для Сприбилла отношения, которые поддерживают существование лишайников, стали серьезной проблемой. Его открытие отнюдь не было предопределено.

Точно так же отношения растений и микоризных грибов больше не рассматриваются как мутуалистические или как паразитические. Даже в отношениях только одного микоризного гриба и только одного растения взаимные уступки непостоянны и могут чередоваться. Ученые говорят не о жесткой дихотомии, а о континууме, в рамках которого мутуализм переходит в паразитизм. Общие микоризные сети могут облегчать сотрудничество, но могут и провоциро-

вать соперничество. По грибным связям сквозь почву могут проходить не только питательные вещества, но и яды. Повествовательные возможности становятся богаче. Нам придется кардинально изменить свою позицию и найти утешение в неопределенности — или просто смириться с ней.

Многим тем не менее нравится переводить все в плоскость политики. «Один биолог, — рассказывал с улыбкой Сапп, — называет меня биологически левым, а себя — биологически правым». Они обсуждали идею о биологических индивидуумах. С точки зрения Саппа, достижения в микробиологии усложнили определение границ отдельного организма. Для его противника, позиционирующего себя как биолога правого толка, четко определенные индивидуумы должны существовать. Современная капиталистическая мысль основана на идее о существовании рациональных личностей, действующих в своих интересах. Без них все рухнет. С его точки зрения, аргумент Саппа выдавал в нем любовь к коллективу и опорную для этой любви склонность к социализму. Сапп рассмеялся: «Некоторым просто нравится искусственно создавать дихотомию».

В книге «Заплетая в косы священную траву» (*Braiding Sweetgrass*) биолог Робин Уолл Киммерер пишет о слове *puhpowee* в языке американских индейцев потаватоми. *Puhpowee* переводится как «сила, которая заставляет грибы встать из земли за ночь». Киммерер вспоминает, что позже она узнала, что *puhpowee* используется не только по отношению к грибам, но и к определенным органам, которые «таинственно поднимаются ночью». Является ли антропоморфизмом описание появления гриба и мужского сексуального возбуждения одним словом? Или описание человеческого мужского сексуального возбуждения тем же термином, который описывает рост гриба, является проявлением микоморфизма? Если вы говорите, что растение «узнает», «решает», «сообщает» или «помнит», вы очеловечиваете растение или вегетализируете ряд человеческих концепций? Человеческие концепции могут получить новый оттенок значения, если применить их к растению; так же и «растительные» концепции обретают новое лицо, когда их применяют к че-

ловеку: человек, который цветет, женщина-цветок, корень проблемы и коренной житель, радикальный*...

Наташа Майерс — антрополог, которая ввела термин «инволюция» для описания тенденции организмов устанавливать связи друг с другом, — указывает на то, что Чарлз Дарвин, вероятно, был совсем не против сравнения себя с растением, то есть был адептом «фитоморфизма». Описывая цветки орхидей в 1862 году, ученый сделал следующее наблюдение: «Положение колонки этого катасетума можно сравнить с мужчиной, стоящим с поднятой и согнутой левой рукой так, что кисть находится вертикально перед грудью, а правая рука расположена ниже, поперек тела таким образом, что пальцы высовываются за левый бок».

Очеловечивает ли Дарвин цветок или под его влиянием воспринимает себя как растение? Он описывает черты растения, используя термины, применимые к человеку, что, несомненно, является признаком антропоморфизма. Но он также переосмысливает мужское тело — включая и свое собственное — в цветочных формах, давая понять, что он готов исследовать анатомию цветка на его (цветка) собственных условиях. Старая история. Очень сложно, разбираясь в чем-то, не перенять частицу этого чего-то самому. Иногда это делается сознательно. Радикальная микология, например, — это организация без четко выраженной структуры. И это не случайно. Ее основатель Питер Маккой указывает на то, что грибы способны менять образ нашего мышления и влиять на наше воображение. Деревья фигурируют всюду, от генеалогии и отношений (внутри человеческих, биологических и лингвистических семейств) до древообразных структур данных в точных науках. Они узнаются также в некоторых терминах, например слове «дендрит» (от греч. *δένδρον* — «дерево»), обозначающем отросток нейрона. Так почему бы мицелию не играть такую же роль? Радикальная микология организована в соответствии с децентрализованной логикой мицелия. Региональные сети поддерживают свободные связи с более крупным ядром.

* От лат. *radix* — корень. — Прим. изд.

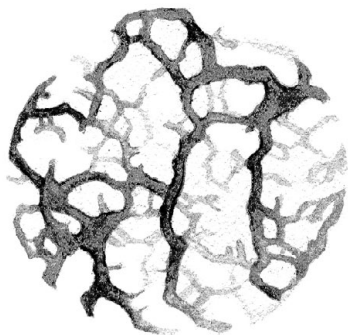
Периодически отдельные части сети радикальной микологии объединяются в плодовое тело — съезд радикальных микологов, на котором я присутствовал в Орегоне. Если бы мы принимали грибы, а не растения или животных за «типичное» проявление жизни, насколько иначе выглядели бы наши сообщества и учреждения?

Иногда мы подражаем окружающему миру бессознательно. Владельцы собак по всему свету похожи на своих питомцев; биологи часто неосознанно имитируют поведение изучаемого объекта. С тех пор как Франк придумал термин «симбиоз» в конце XIX века, ученые, изучающие отношения между организмами, постепенно пришли к выводу о целесообразности образования самых необычных междисциплинарных видов сотрудничества. Как пояснил мне Сапп, именно нежелание решительно и дерзко перешагнуть через границы между дисциплинами способствовало тому, что симбиотические отношения игнорировались большую часть XX века. По мере того как области знания становились все более узкими, все глубже становились пропасти между науками, такими как генетика и эмбриология, ботаника и зоология, микробиология и физиология.

Симбиотические отношения нарушают границы различных видов, объединяя их; изучение взаимодействий в симбиозе неизбежно нарушает границы разных дисциплин, также объединяя их. Сегодня ничего не изменилось. «Совместное использование ресурсов ради общего блага: общение между представителями разных дисциплин углубляет понимание видов микоризного симбиоза...» — так начинался отчет Международной конференции по микоризной биологии в 2018 году. Изучение микоризных грибов требует академического симбиоза микологов и ботаников. Изучение бактерий, живущих в гифах грибов, нуждается в симбиотическом взаимодействии микологов и бактериологов.

Когда я исследую грибы, больше всего мое поведение похоже на поведение предмета моего исследования: я быстро вступаю в традиционный мутуализм, основанный на обмене услугами и данными. В Панаме я вел себя как ра-

стущая фронтальная часть микоризного мицелия — целыми днями ходил по локти измазанный в красном грунте. Я с тревогой переправлял большие холодильные установки с образцами в другие страны, проводя их через таможи, контрольное рентгеновское просвечивание и собак — поисковиков наркотиков и оружия. В Германии я сидел над микроскопами, в Швеции ломал голову над липидными профилями грибов, а в Англии выделял и секвенировал грибные ДНК. Я отсылал гигабайты информации, исторгнутой компьютерами в Кембридже, для обработки и анализа в Швецию, откуда эти данные пересылались дальше, к коллегам в Соединенных Штатах и Бельгии. Если бы мои передвижения оставляли след, то получилась бы сложная сеть, отражающая двусторонний обмен информацией и ресурсами. Подобно растениям, мои коллеги в Швеции и Германии благодаря связи со мной получали доступ к большему объему почвы. Сами они не могли отправиться в тропики — я служил для них связующим звеном. В обмен, как гриб, я получал доступ к фондам и технологиям, которые в противном случае были бы для меня недостижимы. Мои коллеги в Панаме извлекали пользу из грантов и профессиональных знаний моих коллег в Англии. И аналогичным образом мои коллеги в Англии выигрывали от грантов и знаний моих панамских сотрудников. Для изучения гибкой грибной сети мне пришлось создать не менее гибкую виртуальную сеть. Это бесконечно повторяющаяся тема: начните рассматривать сеть, и она начнет рассматривать вас.



«Опьянение, — пишет французский теоретик Жиль Делёз, — это буйное торжество растения внутри нас». Это не менее торжествующий взрыв гриба внутри нас. Может ли алкогольный дурман помочь нам заново отыскать части себя в мире грибов? Существуют ли пути к познанию сути грибов через ослабление нашей приверженности человеческой сути? Или к нахождению в ней чего-то еще — иного, грибного? Это нечто может быть крошкой, атомом, оставшимися со времен, когда мы были связаны с грибами большим родством. Или, возможно, чем-то, что мы узнали в процессе нашей долгой и запутанной истории, общей с этими удивительными существами.

Около 10 миллионов лет назад фермент, используемый нашим организмом для разложения алкоголя, известный как алкогольдегидрогеназа, или АДГ4, подвергся одиночной мутации, сделавшей его в 40 раз эффективнее. Мутация произошла в организме последнего общего с гориллами, шимпанзе и бонобо предка. Без модифицированного АДГ4 даже малые дозы алкоголя являются ядом. С модифицированным ферментом АДГ4 наш организм может совершенно безопасно потреблять алкоголь и использовать его как источник энергии. Задолго до того, как наши предки стали человеческими существами, и задолго до того, как мы придумали истории о духовной и культурной сути алкоголя, а также стали использовать дрожжевые культуры, чтобы его производить, мы выработали фермент, чтобы все это переварить и ощутить.

Почему способность расщеплять алкоголь возникла за столько миллионов лет до того, как люди разработали технологии ферментации? Исследователи указывают на то, что усовершенствование АДГ4 произошло, когда наши предки-приматы все меньше времени проводили на деревьях и постепенно приспосабливались к жизни на земле. Умение переваривать алкоголь, как они предполагают, сыграло решающую роль в способности приматов выжить внизу, на лесной подстилке. В их рационе появились новые составляющие: переспелые ферментированные фрукты, упавшие с деревьев.

Мутация фермента АДГ4 говорит в пользу гипотезы «пьяной обезьяны», предложенной биологом Робертом Дадли для объяснения любви людей к алкоголю. С его точки зрения, нас прельщает это зелье, потому что к нему прирастились наши предки. Запах спирта, производимый дрожжевыми грибами, был надежным способом найти спелые фрукты, гниющие на земле. И наша тяга к крепким напиткам, и целый пантеон богов и богинь, руководящих ферментацией и покровительствующих интоксикации, остались от значительно более древнего увлечения.

Приматы — не единственные животные, которых привлекает алкоголь. Малазийские тупайи обыкновенные — маленькие млекопитающие с пушистым хвостом — забираются в цветочные бутоны пальмы Бертрама и выпивают ферментированный нектар в таком количестве, какого хватило бы, чтобы довести до опьянения человека. Шлейф алкогольных паров, испускаемых дрожжевыми грибами, привлекает тупай к цветкам пальмы. Опыление пальмы Бертрама зависит от тупай, и потому их бутоны превратились в процессе эволюции в высокотехнологичные сосуды для ферментации — естественные сооружения, где селятся дрожжевые грибы, способствующие настолько быстрому брожению, что нектар пенится и пузырится. Тупайи в свою очередь выработали замечательную способность нейтрализовать и усваивать алкоголь без каких-либо видимых негативных признаков опьянения.

Мутация АДГ4 помогала нашим предкам приматам извлекать энергию из алкоголя. Если немного видоизменить первоначальную формулировку гипотезы «пьяной обезьяны», выходит, что люди продолжают искать способы извлечения энергии из алкоголя, хотя сейчас чаще сжигают его в виде биотоплива в двигателях внутреннего сгорания, а не в собственном организме. Миллиарды галлонов этанолового биотоплива каждый год производятся из кукурузы в Соединенных Штатах и из сахарного тростника в Бразилии. В США под выращивание кукурузы отведена территория, превышающая площадь Англии. И эта кукуруза затем перерабатывается и скармливается дрожжевым грибам. Ско-

рость, с которой луга превращаются в поля под посевы зерновых для получения биотоплива, сравнима с вырубкой лесов, если мы говорим о процентном соотношении площадей. И этот процесс идет в Бразилии, Малайзии и Индонезии. У биотопливного бума далекоидущие экологические последствия. Требуются огромные правительственные субсидии; превращение лугов в пахотные земли под зерновые является причиной выброса большого количества углеродных соединений в атмосферу; громадное количество удобрений попадает в источники и реки, и по вине химикатов в Мексиканском заливе возникла мертвая зона. Так дрожжевые грибы (и алкоголь, который они производят) участвуют в сельскохозяйственной трансформации человечества.

Вдохновленный гипотезой «пьяной обезьяны», я решил сделать брагу из перезрелых фруктов. Так можно было бы и завершить повествование, позволить ему изменить мое восприятие мира, принять под его влиянием какие-то решения, дать ему опьянить меня. Возможно, алкогольное опьянение — это грибной взрыв внутри нас; это стало бы взрывом грибной истории. Как часто истории меняют наши представления, и как часто мы не замечаем этого.

Эта идея пришла мне в голову, когда я был на экскурсии в ботаническом саду Кембриджа, которую проводил его харизматичный директор. В его компании каждый, даже самый непримечательный куст оказывался окутанным облаками историй. Одно растение, большая яблоня рядом со входом, выделялось среди других. Она выросла, как сообщили нам, из черенка четырехсотлетней яблони в саду родовой усадьбы Исаака Ньютона Вулсторп. Эта яблоня была единственной в усадьбе и достаточно старой, чтобы стать свидетельницей того, как Ньютон сформулировал свой закон всемирного тяготения. Если с какого-нибудь дерева и упало яблоко, вдохновившее Ньютона, то именно с этой яблони.

Выращенное из черенка, дерево перед нами, как напомнил нам директор, было, по сути, клоном знаменитой яблони. Это делало его, по крайней мере генетически, тем же самым деревом, которое участвовало в великом свершении. Или, вернее, участвовало бы, если бы свершение действи-

тельно произошло. Учитывая, что никакого фактического подтверждения истории с яблоком никогда не было, как сразу же заверили нас, очень маловероятно, что какое-либо яблоко вообще участвовало в создании закона тяготения. Тем не менее это был, безусловно, самый первый кандидат на роль яблони, с которой *не* падало яблоко, вдохновившее Ньютона на создание его закона.

Та яблоня оказалась не единственным клоном. Директор сообщил нам, что есть еще два дерева: одно на месте алхимической лаборатории Ньютона у Колледжа Троицы, а другое — у факультета математики. (Позднее выяснилось, что клонов было даже больше — в том числе в президентском саду Массачусетского технологического института.) Сила мифа была такова, что три не связанных друг с другом ученых комитета — больше всего известные своей осторожностью и нерешительностью — вознамерились посадить деревья в самых значимых местах в городе. И все это время официальная точка зрения не менялась: история с яблоком Ньютона недостоверна и бесспорного фактического подтверждения не имеет.

На ботаническом фронте дела шли ненамного лучше. Участие растения в одном из крупнейших теоретических прорывов в истории западной мысли отрицалось и подтверждалось *в одно и то же время*. На почве этой двусмысленности вырастали настоящие деревья, с которых на землю падали настоящие яблоки — и гнили, превращаясь в пахнущую спиртом жижу.

История с ньютоновским яблоком апокрифична, потому что сам Ньютон не оставил о нем никакого письменного свидетельства. Тем не менее существует несколько версий этой истории, составленных современниками Ньютона. Наиболее подробный отчет был написан Уильямом Стьюкли, молодым членом Королевского общества и антикваром, больше всего известным сегодня благодаря своим исследованиям каменных колец* Британии. В 1726 году, как вспо-

* Имеются в виду подобные Стоунхенджу конструкции из камней, организованные по кругу. — *Прим. изд.*

минал Стьюкли, они с Ньютоном оказались вместе в Лондоне: «После обеда, так как погода стояла теплая, мы вышли в сад и выпили чаю под сенью яблони; только он и я... В разговоре он поведал мне, что сейчас был в точно такой же ситуации, как когда ему в голову пришла мысль о земном притяжении. “Почему яблоко всегда падает перпендикулярно земле?” — подумал он тогда. Мысль эта была вызвана падением яблока, когда он сидел задумавшись. Почему оно не падает в сторону или вверх? Но постоянно к центру Земли? Конечно же, причина в том, что Земля притягивает его. Должно быть, материя обладает силой притяжения».

Современная история о яблоке Ньютона — это история об истории о том, что рассказал Ньютон. Именно из-за этого те деревья оказались овеяны полумифическими сюжетами. Невозможно было ни подтвердить достоверность истории, ни опровергнуть ее. Отреагировав на это затруднительное положение, академики вели себя так, словно она была и правдивой, и ложной. История то переставала быть легендой, то снова становилась ею. Деревья оказались под невыносимым мифологическим бременем, и это был пример того, как при столкновении с организмами, находящимися за пределами мира человека, привычные нам категории трещат по швам. Вдохновило ли какое-нибудь яблоко Ньютона, когда он формулировал закон всемирного тяготения, уже давно потеряло значение. Деревья росли; миф процветал.

Очень вежливо я спросил у директора, нельзя ли сорвать с яблони несколько яблок. Мне не приходило в голову, что с этим возникнут какие-либо сложности. Нам сказали, что яблоки редкого сорта под названием «Цветок Кента» (*Flower of Kent*) славились своим неприятным вкусом. Дело было в сочетании кислоты и горечи, как объяснил директор, — сочетанием, которое многие ассоциировали с характером Ньютона в конце жизни. Меня очень удивил его твердый отказ, и я спросил о его причине. «Туристы должны видеть, как яблоки падают с дерева, — извиняющимся тоном признался директор, — чтобы придать мифу достоверности».

И кто кого дурачил? Как могло столько серьезных уважаемых людей настолько опьянеть от истории, так утешаться ею, сдерживаться ею, восхищаться ею, быть ослепленными ею? А с другой стороны, как бы они избежали этого? Истории рассказывают, чтобы изменить восприятие мира, так что они редко *не оказывают* на нас этого воздействия. Но редко складывается ситуация, в которой абсурдность была бы настолько очевидна — в которой растению позволялось бы разыгрывать для нас такую вопиющую клоунаду. Я подобрал один из уже разлагавшихся паданцев, вдохнул запах спирта и решил, что именно из этих гниющих яблок и сделаю вино.

Проблема была в том, что мне нечем было выжимать из яблок сок. В интернете я прочел о неурядице, постигшей население одного из пригородов Кембриджа. С веток яблонь жителей этого предместья, свешивавшихся над дорогой, падали яблоки. Мальчишки использовали паданцы как метательные снаряды. Было разбито несколько окон, и пострадало несколько автомобилей. Вдохновенно разыграв политический гамбит, община городка предоставила общественный пресс для выжимания яблочного сока, чтобы разрешить проблему и найти лучшее применение отходам. Это оказалось выходом из ситуации. Жажда разрушения была подавлена в процессе отжимания сока. Сок же, перебродив, превращался в сидр. Сидр дружно выпивался, что поддерживало коллективный дух. Принцип был разумным. Человеческий кризис подвергался разложению при помощи гриба. И уже в который раз люди объединялись, чтобы пожертвовать отходы для удовлетворения грибного аппетита. Грибной метаболизм, в свою очередь, благотворно влиял на человеческую жизнь и культуру.

Пиво, пенициллин, псилоцибин, ЛСД, биотопливо... сколько же раз все это происходило раньше?

Я связался с ответственным за пресс и попросил разрешения воспользоваться им. На пресс был большой спрос, и каждый, кто брал его напрокат, должен был передавать его следующему пользователю лично. Мне дали телефон местного священника, который подъехал через несколько

дней на стареньком «Вольво», в прицепе которого покоился эlegantный агрегат. У него были выглядевшие зловеще зубчатые шестерни, чтобы перемалывать яблоки в пульпу, большой винт для выдавливания и желоб, по которому должен был вытекать сок.

Ночью мы с приятелем, вооружившись большими походными рюкзаками, собрали яблоки Ньютона. Мы оставили несколько из них висеть на ветках яблони ради мифа, но — мне жаль говорить об этом — большую часть из них прихватили с собой. Позднее я узнал, что мы «тырили яблоки» (*were «scrumping»*) — диалектное выражение родом из Уэст-Кантри, изначально обозначавшее сбор паданцев, а позднее — кражу фруктов. Разница была в том, что в Уэст-Кантри яблоки считали почти что сидром, а сидр представлял ценность для фермеров: землевладельцы раньше включали дневную порцию сидра в оплату труда их работников, и это был один из множества путей, которым продукты метаболизма дрожжевых грибов поступали обратно в систему сельского хозяйства, созданную для их размещения. Под яблоней Ньютона, однако, яблоки создавали беспорядок и грязь, а также досадную помеху для садовника. Пресс творил чудеса. Яблочные отходы выжимались, превращаясь в сок, сок бродил, становясь сидром. Двойной выигрыш.

Выдавливать сок из яблок оказалось тяжелой работой. Двое или трое человек удерживали на месте пресс, пока один проворачивал ручку. Пока яблоки перемалывались, два человека мыли и резали новые. Получалась производственная линия, конвейер. Комната наполнилась резким, прокислым запахом давленных яблок. Яблоки были повсюду в разном виде и разном состоянии. В волосах у нас была яблочная кашка, вся одежда промокла. Ковры стали липкими и влажными, а на стенах появились пятна. К концу дня выжали 30 литров сока.

Если вы собираетесь превратить сок в сидр, перед вами встает выбор. Либо вы добавляете в сок готовую дрожжевую культуру из пакетика, либо вы ничего не добавляете и отдаете все на откуп дрожжевым грибам, которые живут

на кожуре яблок. На кожуре яблок разных сортов живут свойственные только им дрожжевые грибы, каждый вид которых будет ферментировать сок в своем темпе, выборочно преобразовывая разные вкусовые свойства плода. Как и в любом процессе брожения, грань между правильным и неправильным ходом ферментации едва заметна. Если посторонние дрожжевые грибы или бактерии попадут в сок и обоснуются там, сок скиснет. Сидр, изготовленный с помощью одного искусственно выращенного штамма дрожжевого гриба, с меньшей вероятностью будет испорчен неправильным брожением, но собственные дрожжевые грибы яблока в процессе ферментации участвовать не будут. В моем случае работа без колебания была доверена природным дрожжевым грибам. Ньютоновские яблоки попали ко мне уже покрытыми ньютоновской дрожжевой культурой. Я не мог выяснить, какой именно дрожжевой штамм в итоге будет управлять процессом брожения, но так происходило большую часть истории человечества.

Сок перебродил примерно за две недели, превратившись в мутную, сильно пахнущую жидкость, которую я разлил по бутылкам. Через несколько дней, когда она отстоялась, я налил себе бокал. К моему удивлению, сидр оказался восхитительным. Кислота и горечь яблок преобразились. На вкус он оказался тонким и цветочным, сухим и слегка игристым. Если выпить больше, он поднимал настроение и вызывал легкую эйфорию. Я не почувствовал никакой замутненности ощущений, как случилось, когда я пробовал некоторые другие сорта сидра. И неуклюжести я тоже не испытывал, хотя дрожжевой грибок, несомненно, сыграл шутку с моим сознанием. Меня опьянила, успокоила, сковала и растворила в себе история; она заставила меня почувствовать себя бессмысленным и придавленным ею. Я назвал сидр «Тяготением» и лежал, отяжелевший и укачиваемый действием поразительного метаболизма дрожжевого гриба.

ЭПИЛОГ

ВЕСЬ ЭТОТ КОМПОСТ

Руки наши впитывают словно корни,
поэтому я возлагаю их на все, что есть пре-
красного в этом мире.

— *СВЯТОЙ ФРАНЦИСК АССИЗСКИЙ*

Ребенком я любил осень. С большого каштана падали листья и собирались в наносы в саду. Я сгребал их в кучи и тщательно следил за ними, добавляя все новые пригоршни листьев каждую неделю. Вскоре кучи становились достаточно большими, чтобы ими можно было заполнить несколько ванн. Снова и снова я спрыгивал с нижних ветвей каштана в эти листья. Оказавшись внутри кучи, я ворочался, пока не зарывался в листья целиком, и потом лежал, погруженный в их шуршание, затерявшись в удивительных запахах.

Отец поощрял во мне стремление бесстрашно погружаться в окружающий меня мир. Бывало, он носил меня на плечах по саду и я засовывал лицо в цветы, словно был пчелой. Должно быть, мы опылили бесчисленное число цветков, медленно переходя от растения к растению. Мои щеки были в желтых и оранжевых пятнах, я пытался скорчить лицо так, чтобы оно лучше поместилось в павильоны, которые создавали лепестки, и оба мы наслаждались запахами, обилием красок и беспорядком.

Мои кучи опавших листьев были одновременно и потайным местом, и мирами, которые нужно было исследовать. Но по мере того, как проходили месяцы, мои кучи уменьшались. Становилось все труднее зарыться в них це-

ликом. Я пытался выяснить причину, дотягиваясь до самых глубоких мест в куче, вытаскивая влажные пригоршни того, что все меньше напоминало листья и все больше выглядело как почва. Начали появляться черви.

Приносили ли они с собой землю в кучи листьев или уносили листья в почву? Я не был ни в чем уверен. По моим ощущениям, кучи листьев сжимались, но если они сжимались, то во что? Насколько глубока была почва? Что поддерживало мир на плаву в этом твердом море?

Я задал этот вопрос отцу. Он объяснил. Я ответил новым «почему». Сколько бы раз я ни вворачивал свое «почему», у него всегда находился ответ. Эти игры продолжались, пока у меня не истощался запас вопросов. Именно во время одного из этих раутов я и узнал впервые о разложении. Я изо всех сил пытался представить себе невидимых существ, поедавших все листья, и понять, как у таких крошечных созданий может быть такой громадный аппетит. Лежа погруженным в листья, я старался вообразить, как они могли пожрать все собранные мною листовенные кучи. И почему я не мог этого увидеть. Если они настолько дико голодны, уж конечно, я мог бы застать их в процессе, если бы зарылся глубоко в листья и лежал бы достаточно тихо. Но они казались неуловимыми.

Отец предложил эксперимент. Мы отрезали верх у прозрачной пластиковой бутылки. Внутри ее мы положили по очереди слои земли, песка, опавших листьев и, наконец, пригоршню земляных червей. Следующие несколько дней я наблюдал, как черви, извиваясь, проползали между слоями. Они перемешивали их и ворошили. Ничто не оставалось неподвижным. Песок просачивался в землю, а листья перемешивались с песком. Четкие края слоев растворялись друг в друге. Червей можно увидеть, объяснил отец, но есть много других существ, которые ведут себя как черви, но их невозможно заметить. Крохотные червяки. И существа еще меньше, чем крошечные черви. И другие создания, еще меньше непохожие на червей, но способные ворошить, и перемешивать, и заставлять разные вещества растворяться друг в друге, точно так же, как это делают

черви. Композиторы слагают музыку, а эти существа — деструкторы, которые разлагают жизненные объекты. Ничто не может произойти без их вмешательства.

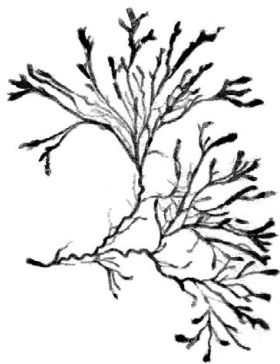
Это была такая полезная идея. Меня словно научили разворачиваться, обращаться мысленно назад. Теперь стрелки указателей были обращены одновременно в обе стороны. Композиторы слагают; деструкторы разлагают. И если они не вызовут разложения, композиторам не из чего будет творить. Эта мысль изменила мое отношение к миру. И именно из этой мысли, из этого увлечения существами, разлагающими материю, вырос мой интерес к грибам.

Именно из компостной кучи вопросов и увлечений сложилась эта книга. Вопросов было так много, а ответов так мало, и это по-настоящему будоражит. Неоднозначность уже не вызывает такого зуда, как раньше; мне проще сопротивляться искушению заменить неопределенность определенностью. В разговорах с исследователями и энтузиастами я невольно начал играть роль посредника, отвечая на вопросы о том, чем занимаются люди в различных, сильно удаленных друг от друга областях микологического исследования, иногда принося несколько крупинок песка в почву, в других случаях — несколько комков земли в песок. На лице у меня больше пылицы, чем было, когда я начинал. Новые «почему» наслоились на старые. Куча для прыжков стала больше, а пахнет она точно так же таинственно, как и вначале. Но сырости в ней больше, больше места, где можно зарыться в нее, и больше простора для исследований.

Грибы могут создать плодовые тела, но сначала они должны что-нибудь разрушить. Теперь, когда эта книга создана, я могу отдать ее грибам для разрушения. Я намочу один экземпляр и посею в нем мицелий вешенки. Когда он проест все слова, и страницы, и форзацы и отрастит на обложке и корешке плодовые тела, их съем я. Из другого экземпляра я удалю все страницы, измельчу их и, используя слабую кислоту, растворю всю целлюлозу в страницах, превратив ее в углеводы. В получившийся сахарный рас-

твор я добавлю дрожжи. Когда ферментация закончится, я выпью получившееся пиво, замкнув таким образом круг.

Грибы создают миры; они их также разрушают. Застать их за этим можно по-разному: когда вы готовите грибной суп или просто едите его; когда идете по грибы или покупаете их; когда вы с помощью брожения получаете алкоголь, сажаете растение или просто погружаете руки в землю. И допускаете ли вы гриб в свое сознание или пытаетесь понять, как он может проникнуть в сознание кого-нибудь другого; вылечил ли вас гриб или вы наблюдаете, как он лечит кого-то другого; строите ли вы дом из грибов или начинаете выращивать грибы у себя дома, грибы застанут вас за этим занятием. Если вы живы, это уже произошло.



БЛАГОДАРНОСТИ

Без руководства и терпения и помощи многих специалистов, исследователей, ученых и энтузиастов эта книга была бы невысказана. В особенности я бы хотел выразить свою благодарность Ральфу Эйбрахаму, Эндрю Адаматски, Филу Эйресу, Альберту-Ласло Барабаши, Эбену Байеру, Кевину Бейлиеру, Луи Белтрану, Майклу Бьюгу, Мартину Битарто-до, Линн Бодди, Ульфу Бюнгтону, Данкану Камерону, Киту Клэю, Иву Кудеру, Брину Дентингеру, Жюли Делипп, Кейти Филд, Эммануэлю Форту, Марку Фрикеру, Марие Джованне Галлиани, Люси Джилберт, Руфино Гонсалесу, Тревору Говарду, Кристиану Гроно, Омару Эрнандесу, Эдуарду Аллену Херру, Дейvidу Хиббетту, Стефану Имхофу, Дейvidу Джонсону, Тоби Киерс, Кэллему Кингуеллу, Натушке Ли, Чарльзу Лефевру, Эгберту Лею, Дейvidу Льюку, Скотту Мангану, Майклу Мардеру, Питеру Маккою, Деннису Маккенне, Полу Акселю Олссону, Стефану Олссону, Магнусу Рату, Элану Рейнеру, Дейvidу Риду, Дэну Ревиллини, Маркусу Роуперу, Яну Сапшу, Каролине Сармиенто, Джастину Шафферу, Джейсону Скотту, Марку-Андре Селоссу, Джейсону Слоту, Самеху Солиману, Тоби Сприбиллу, Полу Стемецу, Майклу Штуссеру, Анне Цзин, Раскалу Турбевиллю, Бену Тернеру, Милтону Уэйнрайту, Хокану Валландеру, Джо Райту и Полу-Камило Заламеа.

Я безгранично благодарен моему агенту Джессике Вуллард и моим редакторам Уиллу Хэммонду в *Bodley Head* и Хилари Редмон в *Random House* за постоянную поддержку, ясность видения и мудрые советы. В *Bodley Head/Vin-*

tage мне повезло сотрудничать с Грэмом Костером, Сьюзан Дин, Софи Пеинтер и Джо Пикерингом, а в *Random House* я работал с прекрасной командой, состоящей из Карлы Еофф, Лукаса Хайнриха, Тима О'Брайана, Саймона Сулливана, Молли Тёрпин и Ады Йоненака. Колин Елдер проэкспериментировал с чернилами, сделанными из навозника белого, и создал замечательные иллюстрации — изображения грибов. Я признателен Ксавье Бакстону, Сими Фроенд, Джулии Харт, Питу Райли и Анне Вестер Майер за помощь с различными переводами. Пэм Смарт оказала мне ценную помощь с транскрибированием, а Крис Моррис из организации *Spores for Thought* собрал отпечатки спор. Кристиан Циглер присоединился ко мне в Панаме, в лесу, и сумел запечатлеть на пленке необычную магию микогетеротрофических растений.

Я беспредельно признателен тем, кто читал отдельные части этой книги или всю ее целиком на различных стадиях ее развития: Лео Амиелю, Анжелике Кодор, Надие Чейни, Моник Чарльзуорт, Либби Дейви, Тому Эвансу, Чарльзу Фостеру, Сими Фроенд, Стивену Хардингу Иену Хендерсону, Джони Лифшцу, Роберту Макфарлейну, Барнаби Мартину, Уте Пашковски, Джереми Принну, Джилл Пёрс, Питу Райли, Эрину Робинсонгу, Николасу Розенстоку, Уиллу Сэпцу, Эмме Сэйер, Козмо Шелдрейку, Руперту Шелдрейку, Саре Шьолунд, Тэдди Сан-Обэну, Эрику Фернбургену и Флоре Уоллас. Я не смог бы обойтись без их понимания и чуткости.

За проявленное чувство юмора, внимание, заботу и вдохновение в процессе работы я благодарен Дейvidу Эйбраму, Милизе Эбсон, Мэтью Барли, Фавну Бэрону, Финну Бимсу, Джерри Брейди, Дину Бродериду, Кэролайн Кейси, Удаби Крус-Маркес, Майку де Дананн Датурса, Андреа де Кайзер, Линди Дюфферэн, Саре Перл Эгендорф, Заку Эмбри, Аманде Фильдинг, Джону Флинну, Виктору Фрэнкелю, Дане Фредерик, Чарли Гилмору, Стивену Хардингу, Люси Хинтон, Рику Инграши, Джеймсу Кию, Оливеру Келхэммеру, Эрике Кон, Натали Лоренс, Сэму Ли, Энди Летчеру, Джейн Лонгман, Луису Эдуардо Луна, Вахану Матоссяну,

Шону Мэттесону, Тому Фортис Мэйеру, Эвану МакГауну, Зейну Мохамеду, Марку Мори, Виктории Мулловой, Мише Муллову-Аббадо, Чарли Мёрфи, Дэну Николсону, Ричарду Пёрлу, Джону Престону, Энтони Рэмсею, Вильме Рэмсей, Полу Рэфаэлу, Стиву Руку, Грифону Роуэру-Апджону, Мэту Сигаллу, Рупиндеру Сидху, Уэйну Силби, Паоло Роберто Сильва э Суза, Джоэлю Соломону, Анне Штильманн, Пегги Тэйлор, Роберту Темплу, Джереми Тресу, Марку Вонешу, Флоре Уоллес, Эндрю Уэйлу, Кхари Уэнделл-МакКлеелланд, Кейт Уитли, Хиде Вулф и Джону Янгу. Я в неоплатном долгу перед многими чудесными учителями и наставниками, помогавшими мне годами, особенно Патрисии Фара, Уильяму Фостеру, Говарду Гриффитсу, Дэйвиду Хэнку, Нику Жардэну, Мику Майерусу, Оливеру Рэкхэму, Фергусу Риду, Саймону Шафферу, Эду Тэннеру и Луи Возу.

Я признателен за поддержку нескольким учреждениям: Клэр-колледжу, Кембридж, и факультету растениеводства, факультету истории и философии науки в Кембриджском университете, где я провел несколько потрясающих лет; Смитсоновскому институту тропических исследований за помощь и поддержку во время моего пребывания в Панаме и за продолжающуюся заботу о природном памятнике, острове Барро-Колорадо; и Холлихоку, Британская Колумбия, за предоставление мне чудесного места для работы зимой.

Бесчисленные часы музыки помогали мне продумывать и прочувствовать данную книгу во время ее создания. Особое значение для меня имели песни народа ака, музыка Иоганна Себастьяна Баха, Уильяма Бёрда, Майлса Дэйвиса, Жуана Жильберту, Чарльза Мингуса, Билли Холидей, Телониуса Монка, Мундога, Бада Пауэлла, Томаса Таллиса, Фэтса Уоллера и Тэдди Уилсона. Два места — Хэмпстед-Хит и остров Кортес — сыграли чрезвычайно важную роль в рождении этой книги. Этим двум местам и тем, кто живет там и оберегает их, я обязан больше, чем мог бы выразить словами. И выше всего я благодарен Эрин Робинсонг, Козмо Шелдрейку и моим родителям, Джилл Пёрс и Руперту Шелдрейку, за их вдохновляющую поддержку, любовь, остроумие, мудрость, щедрость и бесконечное терпение.

ПРИМЕЧАНИЯ

ВВЕДЕНИЕ. БЫТЬ ГРИБОМ

«способны творить здесь, на земле»: Хафиз (1315–1390), у Ladinsky (2010).

видов остаются неописанными и неизученными: Ferguson et al. (2003). Существует много других сообщений об огромных грибницах опят. В научной работе, опубликованной Anderson et al. (2018), исследована мицелиальная система в Мичигане возрастом предположительно 2500 лет, весом по крайней мере 400 тонн и простирающаяся примерно на 75 гектаров. Исследователи обнаружили, что у данного гриба очень низкий уровень генетической мутации, что позволяет предположить, что он каким-то образом защищается от вредного воздействия на его ДНК. Как грибу удастся поддерживать такой стабильный геном, неизвестно, но, возможно, именно этим объясняется то, что он смог дожить до столь почтенного возраста. Кроме опят, одними из самых крупных организмов являются вегетативно размножающиеся морские травы и водоросли (Arnaud-Haond et al. [2012]).

чем род человеческий на Земле: Moore et al. (2011), ch. 2.7; Honegger et al. (2018). Окаменелости прототакситов (*Prototaxites*) обнаружены в Северной Америке, Европе, Африке, Азии и Австралии. С середины XIX века ученые пытаются определить, чем являлись прототакситы. Сначала считалось, что это сгнившие деревья. Вскоре после этого их статус повысили до гигантских морских водорослей, несмотря на подавляющее количество свидетельств того, что они росли на суше. В 2001 году, после десятилетий споров, был выдвинут аргумент в пользу того, что они были плодовые-

ми телами некоего гриба. Аргумент весьма убедительный: прототакситы состояли из плотно переплетенных волокон, больше напоминающих грибные гифы, чем что-либо иное. Углеродно-изотопный анализ указывает на то, что они, скорее всего, выживали, поглощая то, что их окружало, а не за счет фотосинтеза. Недавно Selosse (2002) заявил, что более правдоподобной является версия, что прототакситы были гигантскими лишайникообразными структурами, представлявшими собой союз грибов и живущих за счет фотосинтеза водорослей. Он доказывает, что прототакситы были слишком велики, чтобы выжить за счет разложения растений. Если же они частично поддерживали себя фотосинтезом, прототакситы смогли бы добавить к своей диете из мертвых растений энергию, получаемую благодаря фотосинтезу. У них были бы и стимул, и средства, чтобы вырастать выше всего, что их окружало. Более того, прототакситы содержали жесткие полимеры, обнаруженные в водорослях того периода, и это позволяет предположить, что клетки водорослей жили внутри их, тесно переплетаясь с грибными гифами. Гипотеза о лишайниках также объясняет, почему они вымерли. После 40 миллионов лет, когда они доминировали на всей планете, прототакситы таинственным образом вымерли, как раз тогда, когда растения начали эволюционировать в деревья и кустарники. Это наблюдение прекрасно сочетается с гипотезой о том, что прототакситы были организмами, подобными лишайникам, потому что большее количество высоких растений означало меньше света для них.

как листья или корни: более широкий обзор грибного разнообразия и распространения см.: Peay (2016); о морских грибах см.: Bass et al. (2007); о грибных эндифитах см.: Mejía et al. (2014), Arnold et al. (2003) и Rodriguez et al. (2009). Исследование специализирующихся на алкоголе грибов, обнаруженных на ликероводочных заводах, где они процветают благодаря спиртным парам, поднимающимся от бочек с виски, по мере того как те стареют, ищите у Alpert (2011).

используют солнечную энергию: грибы, переваривающие камень, см.: Burford et al. (2003) и Quirk et al. (2014); о пластидах и ТНТ см.: Peay et al. (2016), Harms et al. (2011), Stamets

(2011) и Khan et al. (2017); о не восприимчивых к радиации грибах см.: Tkavc et al. (2018); о радиографических грибах см.: Dadacheva and Casadevall (2008) и Casadevall et al. (2017). *снег, снег с дождем и град*: об извержении спор см.: Money (1998), Money (2016) и Dressaire et al. (2016). О споровой массе и влиянии на погоду см.: Fröhlich-Nowoisky et al. (2009). Обзор многочисленных красочных решений, которые грибы создали в процессе эволюции, чтобы решить проблему рассеивания своих спор, см. в Roper et al (2010) и Roper and Seminara (2017).

нейронные клетки нервной системы животных: о потоке, см.: Roper and Seminara (2017); об электрических импульсах см.: Harold et al. (1985) и Olsson and Hansson (1995). Дрожжевые грибы составляют примерно 1 % грибного мира и размножаются почкованием, или простым делением на два. Некоторые дрожжевые грибы при особых обстоятельствах способны формировать гифовые структуры (Sudbery et al. [2004]).

нарисованы чернилами из навозника белого, Coprinus comatus: отчеты о том, как грибы пробиваются сквозь асфальт и поднимают тротуарные плиты см. в: Moore (2013b), ch. 3. *кусочками листьев*: муравьи-листорезы не просто кормят свои грибы и дают им кров, они их также лечат. Грибные «огороды» муравьев-листорезов монокультурны, в них выращивается только один вид грибов. Подобно монокультурным посадкам человека, эти грибы очень уязвимы. Особенную опасность для них представляет гриб-паразит, который способен уничтожить весь грибной огород. Муравьи-листорезы собирают в хитроумные камеры на своих кутикулах бактерии, которые кормят из особых желез. Каждый муравейник культивирует свой собственный штамм бактерий, которых они отличают от всех остальных и предпочитают другим, даже близкородственным бактериям. Эти прирученные бактерии производят антибиотики, дающие мощный отпор паразитирующим грибам-вредителям и способствуют росту культивируемого данной муравьиной семьей гриба. Без этих грибов колонии муравьев-листорезов никогда бы не достигли таких больших размеров. См. Currie et al. (1999), Currie et al. (2006), Zhang et al. (2007).

в ближайшие десятилетия — по поводу древнеримского бога Робигуса см.: Money (2007), ch. 6 и Kavalier (1967), ch. 1. О грибных супербактериях см.: Fisher et al. (2012, 2018), Casadevall et al. (2019), и Engelthaler et al. (2019); грибковые болезни земноводных описаны у Yong (2019); о заболеваниях бананов см.: Махман (2019). Среди животных болезни, вызываемые бактериями, представляют бóльшую опасность, чем те, что вызваны грибами. Для растений большую угрозу представляют болезни, вызванные грибами, а не бактериями. Такая схема действует и в плане заболеваний, и в плане поддержания здоровья. В микробиомах животных, как правило, доминируют бактерии, в то время как в микробиомах растений доминируют грибы. Это не значит, что животные совсем не страдают от грибковых заболеваний. Casadevall (2012) выдвигает гипотезу, что начало расцвета млекопитающих и сокращение количества рептилий, последовавшие за вымиранием динозавров на рубеже мелового и третичного периода, произошло благодаря тому, что млекопитающие были способны сопротивляться грибковым заболеваниям. По сравнению с рептилиями у млекопитающих есть несколько недостатков: быть теплокровным очень энергозатратно, а еще больше энергии требует производство молока и интенсивная родительская забота. Но вполне возможно, что именно повышенная температура тела млекопитающих препятствовала развитию грибковых патогенов, которые, как считается, в изобилии водились «во всемирной куче компоста», которая появилась в результате массовой гибели лесов во время вымирания мел-третичного периода. И до сегодняшнего дня млекопитающие более резистентны к обычным грибковым заболеваниям, чем земноводные и рептилии.

в качестве лекарства: исследование жизни неандертальцев см. в Weyrich et al. (2017); по поводу ледяного человека Этци см.: Peintner et al. (1998). Для каких конкретно целей ледяной человек использовал березовый трутовик (*Fomitopsis betulina*), узнать наверняка невозможно, но они горькие и похожи на пробку, так что очевидно, что он не собирался употреблять их в пищу. То, как аккуратно ледяной человек нес эти гри-

бы — нанизанными на кожаный ремень, — говорит о глубоких знаниях об их ценности.

Второй мировой войны: о лекарственных препаратах на основе плесневых грибов см.: Wainwright (1989a 1989b). В костях человека из археологических раскопов в Египте, Судане и Иордане, датируемых примерно 400 годом н. э., было обнаружено высокое содержание антибиотика тетрациклина, что указывает на его длительный и регулярный прием, скорее всего в лечебных целях. Тетрациклин вырабатывается бактериями, а не грибами, но самым вероятным его источником было заплесневелое зерно, которое, скорее всего, предназначалось для приготовления лечебного пива (Bassett et al.[1980], Nelson et al. [2010]). Путь от первых наблюдений Флеминга до появления пенициллина прямым не был и потребовал огромных усилий: экспериментов, промышленных технологий, вложений капитала и политической поддержки. Прежде всего, Флемингу было очень трудно заинтересовать кого-нибудь своим открытием. По словам Милтона Уэйнрайта, микробиолога и историка науки, Флеминг был эксцентричен и слыл бездельником. «У него была репутация сумасшедшего и человека, делающего всякие нелепости — например, создавшего портрет королевы в чашке Петри при помощи бактериальных культур». Убедительное доказательство терапевтической ценности пенициллина появилось только через 12 лет после первых наблюдений Флеминга. В 1930-х годах группа исследователей в Оксфорде разработала метод экстрагировать и очищать пенициллин, а в 1940-х провела испытания, которые продемонстрировали его потрясающую способность бороться с инфекциями. Тем не менее производить пенициллин было по-прежнему сложно. В его отсутствие в широком доступе в медицинской литературе публиковали инструкции по выращиванию плесневых грибов. Грубые «кухонные» экстракты вместе с крошечным мицелием на хирургической марле — «мицелиевые тампоны» — использовались некоторыми врачами для лечения инфекций, что, как показывали наблюдения, было удивительно эффективным (Wainwright [1989a и 1989b]). Промышленным способом производить пенициллин стали

в Соединенных Штатах. Это произошло отчасти благодаря хорошо налаженным американским технологиям по выращиванию грибов в промышленных биореакторах, а отчасти — тому, что были открыты штаммы пенициллинового плесневого гриба с большей урожайностью, которая была еще больше увеличена несколькими мутациями. Промышленное производство пенициллина привело к тому, что ученые более усердно стали искать новые антибиотики и для этого исследовали тысячи грибов и бактерий.

грибов увеличиваются ежегодно: по поводу лекарств/наркотиков см.: Linnakoski et al. (2018), Aly et al. (2011), Gond et al. (2014). О псилоцибине см.: Carhart-Harris et al. (2016a), Griffiths et al. (2016), Ross et al. (2016). Информацию о вакцинах и лимонной кислоте ищите в *The State of the World's Fungi* (2018). Сведения о рынке съедобных и лекарственных грибов можно найти на сайте www.knowledge-sourcing.com/report/global-edible-mushrooms-market [дата обращения 29 октября 2019 года]. В 1993 году в опубликованной в журнале *Science* статье сообщалось, что паклитаксель (paclitaxel) (продаваемый под брендом Taxol) производится грибом-эндодифитом, выделенным из коры тихоокеанского тиса (Stierle et al. [1993]). После этого обнаружилось, что паклитаксель вырабатывается в значительно бóльших количествах грибами, не растениями — примерно двумя сотнями грибов-эндодифитов, разбросанных по нескольким грибным семействам (Kusari et al. [2014]). Это сильное противогрибковое средство, и оно играет важную защитную роль: грибы, способные производить паклитаксель, способны отпугивать другие грибы/грибки. Против грибов он действует так же, как и против раковых клеток, — прерывая их деление. Производящие паклитаксель грибы не подвержены его воздействию, как и другие эндодифиты тиса (Soliman et al. [2015]). Целый ряд других «грибных» противораковых препаратов появился в традиционной фармацевтике. Лентинан, полисахарид из гриба шиитакэ, стимулирует способность иммунной системы бороться с разными видами рака и официально одобрен системой здравоохранения Японии для лечения рака груди и пищеварительного тракта (Rogers [2012]). PSK, соединение,

выделенное из траметеса разноцветного, увеличивает время выживания пациентов, страдающих от ряда видов рака, и используется в Китае и Японии наряду с традиционными противораковыми средствами (Powell [2014]).

устойчивых к радиации биоматериалов: о грибных меланинах см.: Cordero (2017).

сложность и хитросплетения грибной жизни: о приблизительных оценках числа видов грибов см.: Hawksworth (2001) и Hawksworth and Lücking (2017).

когда действительно смотрим: среди неврологов вовлечение наших ожиданий в восприятие известно как влияние по нисходящей, или байесовский вывод (в честь Томаса Байеса, математика, который сделал фундаментальный вклад в теорию вероятностей). См.: Gilbert and Sigman (2007), и Mazzucato et al. (2019).

«они умнее меня»: Adamatzky (2016), Latty and Beekman (2011), Nakagaki et al. (2000), Bonifaci et al. (2012), Tero et al. (2010), и Oettmeier et al. (2017). В книге *Advances in Physarum Machines* («Достижения в области физаровых машин» (Adamatzky [2016])) исследователи подробно описывают многочисленные удивительные свойства слизевиков. Некоторые используют слизевиков для разработки схем принятия решений, другие воспроизводят исторические миграции людей и моделируют возможные схемы миграции людей на Луну в будущем. Математические модели, созданные благодаря слизевикам, включают бесквантовое воплощение факторизации Шора, вычисление самых коротких путей и проектирование сетей поставок. Oettmeier et al. (2017). Заметьте, что Хирохито, император Японии в 1926–1989 годах, был увлечен слизевиками и в 1935 году опубликовал на эту тему книгу. С тех пор изучение слизевиков остается в Японии очень престижным занятием.

возможно, начнет изменяться: система классификации растений и животных, составленная Карлом Линнеем и опубликованная в его *Systema Naturae* в 1735 году, несколько измененную версию которой мы используем и по сей день, включила в эту иерархию и человеческие расы. На вершине пирамиды были европейцы: «Очень умные, изобретатель-

ные. Покрыты плотно облегающей одеждой. Подчиняются закону». Далее следовали американцы: «Ими управляет традиция». Затем азиаты: «Ими правит мнение». После них африканцы: «Медлительные, ленивые... хитрые, туповатые, беспечные. Подчиняются капризу». (Kendi [2017]) В том, в каком порядке в иерархических классификациях расставляются виды, можно усмотреть «видовой расизм».

звезд в нашей Галактике: о микробных сообществах в различных частях тела см.: Costello et al. (2009) и Ross et al. (2018). Сравнение со звездами нашей Галактики взято из работы Yong (2016), ch.1. Уистон Хью Оден в своем «Новогоднем поздравлении» (“New Year Greeting”) предлагает экосистемы своего тела своим жильцам-микробам. «Существам вашего размера я предлагаю / свободный выбор места обитания, / так что устраивайтесь в зоне, / которая подходит вам лучше всего: в водоемах / моих пор или тропических / лесах моих подмышек и паха, / в пустыне моих предплечий, / или в прохладных лесах волос на голове».

неотъемлемая часть жизни: относительно пересадки органов и клеточных культур человека см.: Ball (2019). О приблизительной оценке размера нашего микробиома можно узнать в работе Bordstein and Theis (2015). О вирусах внутри вирусов см.: Stough et al. (2019). Общее введение в изучение микробиомов см.: Yong (2016) и специальный выпуск журнала *Nature*, посвященный человеческим микробиомам (май 2019 г.): www.nature.com/collections/fiabfcjbfj [дата обращения 29 октября 2019 г.].

темной материей или темной жизнью: В каком-то смысле все биологи являются ныне экологами, однако у профессиональных экологов есть преимущество, и их методы и технологии начали просачиваться в новые области. Ряд биологов стали призывать к применению экологических методов в областях биологии, исторически не связанных с экологией. См.: Gilbert and Lynch (2019) и Venner et al. (2009). Существует множество примеров эффекта домино, связанного с микробами, живущими внутри грибов. Исследование, опубликованное Marquez et al. (2007) в журнале *Science* в 2007 г., описывает «вирус, живущий в грибке, живущем в растении». Это расте-

ние — тропическая трава — растет в естественных условиях в хорошо прогретой почве. Однако без грибка-партнера, живущего в ее листьях, трава не сможет выжить при высоких температурах. И у грибка, развивающегося самостоятельно, дела идут не лучше — выжить он тоже не может. Но, как выясняется, способность выживать при высокой температуре дарует отнюдь не грибок. Устойчивость к ней предоставляет вирус, живущий внутри грибка: без этого вируса ни растение, ни грибок не перенесут экстремальных условий. Иными словами, микробиом грибка определяет роль, которую грибок играет в микробиоме растения. Исход ясен: жизнь или смерть. Пожалуй, одним из самых показательных примеров микробов, обитающих внутри других микробов, является печально известный грибок, вызывающий пирикулярриоз риса, или рисовую гниль — *Rhizopus microsporus*. Токсины *Rhizopus* вырабатываются некоей бактерией, которая живет в гифах этого гриба. Эффективной иллюстрацией того, насколько взаимозависимы судьбы грибов и их компаньонов-бактерий, является необходимость этой бактерии для этого гриба не только в деле провоцирования болезни риса, но и для размножения. Если «вылечить» *Rhizopus*, избавив его от бактерий, он потеряет способность производить споры. Бактерия отвечает за самые важные аспекты жизни гриба, от его диеты до сексуального поведения. См.: Araldi-Brondolo et al. (2017), Mondo et al. (2017) и Deveau et al. (2018).

только сейчас начинаем осознавать: Замечания, касающиеся потери собственной идентичности, см.: Relman (2008). Вопрос о том, воспринимать ли человека как единое целое или некое множество, совсем не нов. В физиологии XIX века тела многоклеточных организмов воспринимались как сообщество клеток, и каждая была индивидуальностью — по аналогии с гражданами национальных государств. Эти вопросы усложняются развитием отраслей микробиологии, потому что многочисленные клетки в вашем организме не связаны непосредственно между собой родственными связями, как, например, обычная клетка печени с обычной почечной клеткой. См.: Ball (2019), ch. 1.

Глава 1. СОБЛАЗН

Кто кого соблазняет?: Музыкант и исполнитель Prince, “Illusion, Coma, Pimp & Circumstance, Musicology” (2004).

для глаз животных они невидимы: психотропные «трюфели», продающиеся в Амстердаме, плодовыми телами подлинных трюфелей, несмотря на свое название, не являются. Это грибные органы для переживания неблагоприятных условий, известные как склероции, которые называют трюфелями за внешнее сходство.

вспоминают запахи, ассоциирующиеся с их травмой: по поводу триллионов запахов см.: Bushdid et al. (2014); об ориентировании при помощи обоняния см.: Jacobs et al. (2015); об обонятельных воспоминаниях и человеческом обонянии в целом см.: McGann (2017). Некоторых людей считают «супернюхачами», или гиперосмическими личностями, то есть людьми с болезненно обостренным обонянием. В исследовании, опубликованном Trivedi et al. (2019), сообщалось о том, как такой «супернюхач» только по запаху диагностировал болезнь Паркинсона.

металлический и масляный запах: по поводу запаха различных химических соединений и связей см.: Burt (2012), ch. 2.

олимпийских бассейнах: эти рецепторы входят в большое семейство рецепторов, сопряженных с G-белком (GPCR). Они также известны как семиспиральные, или серпантинные, рецепторы. О чувствительности человеческих органов обоняния см.: Sarrafchi et al. (2013). Согласно автору, люди способны почувствовать некоторые запахи, когда их концентрация составляет всего 0,001 частицы на триллион.

«...визуальные и эмоциональные воспоминания»: О *turmas de tierra* см.: Ott (2002). По словам Аристотеля, трюфели — это «плоды, посвященные Афродите». Считается, что Наполеон Бонапарт и маркиз де Сад использовали их в качестве афродизиака, а Жорж Санд описала их как «черное магическое яблоко любви». Французский гастроном Жан Антельм Брилья-Саварен сделал запись о том, что «трюфели способствуют эротическому наслаждению». В 1820-х годах он отпраздничал проверять это распространенное мнение и провел

ряд консультаций с дамами («все ответы были ироничны или уклончивы») и кавалерами («которые в силу своей профессии наделены особым доверием»). Он пришел к выводу, что «трюфель не является настоящим афродизиаксом, но при определенных обстоятельствах женщины под его воздействием становятся более нежными, а мужчины — более внимательными» (Hall et al. [2007], p. 33).

«скоропортящиеся и недолговечные»: о Лоране Рамбо см.: Chri-safis (2010). Журналист Райан Джейкобс (Ryan Jacobs) приводит свидетельства грязных махинаций, которые происходят по всем каналам добычи и поставок трюфелей. Некоторые отравители используют фрикадельки со стрихнином, другие травят водоемы в лесу, чтобы отравить даже собак в специальных намордниках, третьи разбрасывают куски мяса с осколками стекла, четвертые используют крысиный яд или антифриз. На основании отчетов ветеринаров, сотни отравленных собак поступают к ним на лечение каждый трюфельный сезон. Власти пришли к тому, что стали охранять определенные леса с помощью собак, натасканных на поиск отравы. (Jacobs [2019], pp. 130–34). В 2003 году *The Guardian* сообщила, что у Мишеля Турнэра (Michel Tournaure), французского эксперта по трюфелям, похитили охотничью собаку. Турнэр подозревал, что похитители не продали его собаку, а использовали ее для воровства трюфелей на чужой территории (Hall et al. [2007], p. 209). Разве есть более искусный способ украсть трюфели, чем предварительная кража трюфельной собаки-ищейки?

разрушающими древесину: о лосях с окровавленными носами см.: Tsing (2015), “Interlude. Smelling”; об опыляемых мухами орхидеях читайте Policha et al. (2016); об орхидных пчелах эуглоссилах, собирающих сложные ароматические соединения, см. Vetter and Roberts (2007); о сходстве с соединениями, вырабатываемыми грибами, см.: de Jong et al. (1994). Орхидные пчелы выделяют жирное вещество, которым они обмазывают пахучий объект. Как только запах впитался, они соскабливают жир с поверхности предмета и собирают его в «кармашках» на задних лапках. Этот метод идентичен анфлеражу, который люди используют уже сотни

- лет для вытяжки ароматических масел из таких цветов, как жасмин, — слишком нежных, чтобы подвергать их тепловой обработке (Eltz et al. [2007]).
- исчезновению деревьев рода Аквилария в дикой природе*: Naef (2011).
- призрачные тени на дискотеке*: о Бордо см.: Corbin (1986), р. 35.
- нелинейно с увеличением их размеров*: о трюфеле-рекордсмене можно узнать на [news.bbc.co.uk/1/hi/world/europe/7123414.stm](https://www.bbc.com/news/world-europe-7123414) [дата обращения 29 октября 2019 г.].
- работы нескольких организмов*: о роли микробиома трюфелей в создании ароматов см.: Vahdatzadeh et al. (2015). Когда я был на охоте с Паридом и Даниэлем, я заметил, что трюфель, извлеченный из заиленной почвы у реки, пах не так, как трюфель, откопанный из более плотной глинистой почвы дальше в долине. Подобное отличие вряд ли будет иметь значение для голодной землеройки. Однако белый трюфель, найденный в Альбе, будет продан в четыре раза дороже белого трюфеля из окрестностей Болоньи (хотя тот факт, что торговцы трюфелями часто выдают трюфели из-под Болоньи за трюфели из Альбы, свидетельствует о том, что не все способны эту разницу почувствовать). Региональные отличия профилей летучих компонентов трюфельных ароматов были подтверждены научными изысканиями (Vita et al. [2015]).
- Андростенол никто из них не нашел*: первое сообщение о том, что трюфели вырабатывают андростенол, см.: Claus et al. (1981); о продолжении исследования девять лет спустя см.: Talou et al (1990).
- даже для классификации и измерений*: с годами количество летучих компонентов, производимых единственным видом трюфелей, постоянно увеличивается — по мере того, как улучшается чувствительность инструментов и методов. Они все еще уступают в тонкости восприятия человеческому носу, и количество летучих ароматических соединений скорее всего увеличится в будущем. О летучих ароматических соединениях белых трюфелей см.: Pennazza et al. (2013) и Vita et al. (2015); о других видах см.: Splivallo et al. (2011). Существует ряд причин не приписывать только одному соединению заслугу

создания обаяния трюфельного аромата. В работе Talou et al. (1990) исследовано крайне мало животных и лишь один вид трюфелей, закопанных только в одном месте на одинаково небольшой глубине. Другие подгруппы характеристик летучих соединений могли бы проявиться лучше, если бы трюфели были закопаны на разной глубине и в разных местах. Более того, в природе трюфели привлекают самых разных животных — от диких свиней до мышей-полевков и насекомых. Возможно, разные элементы коктейля летучих соединений, производимых трюфелями, привлекают разных животных. Возможно, андростенол действует на животных более тонко. Он может не действовать сам по себе, как предполагалось в эксперименте, но только в сочетании с другими соединениями. С другой стороны, его роль может быть не так важна для поиска трюфелей, но в то же время является мотивом для поедания гриба. Более подробную информацию о ядовитых трюфелях см.: Hall et al. (2007). Кроме *Gautieria*, трюфели вида *Choironomyces meandriformis* описываются как пахнущие «тошнотворно, перебивающие остальные запахи»; в Италии он считается несъедобным (хотя в Северной Европе он очень популярен). *Balsamia vulgaris*: еще один вид, считающийся малосъедобным в Италии, хотя собакам, кажется, очень нравится его запах «прогорклого жира».

с ними с такой поспешностью: об экспорте и упаковке трюфелей см.: Hall et al. (2007), pp. 219, 227.

привлечь себя к себе: в тех областях мицелия, которые исследуют территорию, гифы растут в разные стороны, не соприкасаясь. В более зрелых частях мицелиевой системы наклонности гиф меняются коренным образом. Растущие кончики гиф начинают стремиться друг к другу (Hickey et al. [2002]). Каким образом гифы притягивают или отталкивают друг друга, еще очень плохо изучено. Работа с модельными организмами, хлебным плесневым грибом *Neurospora crassa*, уже дает кое-какие ключи к пониманию этих процессов. Кончики гиф по очереди испускают некий феромон, который привлекает и возбуждает другие гифы. Благодаря этому движению феромонов взад-вперед, словно пасы мячом, как пишут авторы одного исследования, гифы способны вовлечь

друг друга во взаимодействие и настроиться друг на друга, следуя определенному ритму. Именно это колебание — «химическое ралли» — позволяет им увлечь других, не приходя в возбуждение. Делая «пас», они не способны заметить феромон. Когда «бьет» другая сторона, они возбуждаются (Read et al. [2009] и Goryachev et al. [2012]).

постепенно раствориться в другой сущности: о типах спаривания *Schizophyllum commune* см.: McCoy (2016), p. 13; о слиянии между сексуально несовместимыми гифами см.: Saure (2000) и Moore et al. (2011), ch. 7.5. Способность гиф сливаться друг с другом определяется их «вегетативной совместимостью». Как только соединение произошло, отдельная система типов спаривания определяет, которое ядро будет подвергаться половой рекомбинации. Эти две системы регулируются по-разному, хотя половая рекомбинация не может произойти, если гифы не слились и не поделили генетический материал. Предсказать результат вегетативного слияния разных мицелиевых систем может быть очень сложно (Ryder et al. [1995] и Roper et al. [2013]).

для этого притягивающим противоположный пол феромоном: о подробностях сексуальной жизни трюфелей см.: Selosse et al. (2017), Rubini et al. (2007) и Taschen et al. (2016); примеры интерсексуальности в мире животных см.: Roughgarden (2013). Если производители трюфелей действительно хотят освоить эту отрасль, они должны разбираться в половой жизни этих грибов. Проблема в том, что они ничего о ней не знают. Никто никогда не заставлял трюфели в процессе оплодотворения. Быть может, это и не удивительно, если вспомнить, насколько недоступным является их образ жизни. Удивительнее то, что еще никому не удалось обнаружить гифу, играющую мужскую, отцовскую роль. Исследователям удалось найти только материнские гифы, растущие на корнях и в почве, не важно со знаком «+» или «-». Кажется, у отцовских гиф очень короткая жизнь: окончив оплодотворение, они исчезают: «рождение, капля секса, после — ничего» (Dance [2018]).

снуют повсюду и ангажируют друг друга бесчисленные корни, грибы и микробы: гифы некоторых видов микоризных

грибов могут втягиваться обратно в свои споры и выпускать ростки позднее (Wipf et al. [2019]).

физиологии своих партнеров: о воздействии грибов на корни растений см.: Ditengou et al. (2015), Li et al. (2016), Splivallo et al. (2009), Schenkel et al. (2018), и Moisan et al. (2019).

друг другу в режиме реального времени: об эволюции средств коммуникации в микоризных симбиозах, включая ослабление иммунного ответа, см.: Martin et al. (2017); о сигнальных каскадах между грибами и растениями и их генетической основе см.: Bonfante (2018); об общении между грибами и растениями в других типах микоризных связей см.: Lanfranco et al. (2018). Химические призывы, посылаемые грибами, полны нюансов и обладают широким динамическим диапазоном. Летучие химические соединения, используемые грибом для общения с растением, могут также использоваться для передачи информации популяциям бактерий (Li et al. [2016] и Deveau et al. [2018]). Грибы также используют летучие соединения для отпугивания грибов-соперников; растения используют такие соединения, чтобы отгонять нежелательные грибы (Li et al. [2016] и Quintana-Rodriguez et al. [2018]). Одно и то же летучее соединение в разной концентрации может по-разному воздействовать на растения. Растительные гормоны, производимые некоторыми трюфелями для манипуляции принимающими растениями, могут убить растение, если повысить концентрацию гормона. Но они же могут играть и роль оружия против конкурентов, отпугивая растения, которые могут соперничать с их растениями-партнерами (Splivallo et al. [2007 и 2011]). Некоторые виды грибов паразитируют на определенных видах трюфелей, возможно привлеченные их химическими сигналами. Трюфель-паразит, *Tolyposcladium capitata*, двоюродный брат грибов *Ophiocordyceps*, паразитирующих на насекомых, паразитирует, как известно, на некоторых видах трюфелей, таких как олений трюфель *Elaphomyces* (Rayner et al. [1995]; фото см. на сайте mushrooming.com/cordyceps-blog [дата обращения 29 октября 2019 г.]).

за ними пока не успевает: о первом сообщении о развитии плодового тела *Tuber melanosporum* на Британских островах — что, как считают, было вызвано погодными измене-

ниями, — см.: Thomas and Büntgen (2017). «Современный» метод выращивания *Tuber melanosporum* был разработан только в 1969 году и привел к появлению первой партии искусственно оплодотворенных трюфелей в 1974-м. Корневая рассада выращивается вместе с мицелием *Tuber melanosporum* и высаживается в грунт, когда грибы уже полностью обосновались на корнях. Через несколько лет в благоприятных условиях гриб начнет производить плодовые тела. Территория, на которой искусственно выращивают трюфели, постоянно увеличивается (более 40 000 гектаров по всему миру), и трюфельные огороды, где выращивается черный перигорский трюфель, приносят хороший урожай от Соединенных Штатов до Новой Зеландии (Büntgen et al. [2015]). Лефевр объяснил, что даже если бы он подробно расписал свою методику по пунктам, ее бы трудно было воспроизвести. Так много делается интуитивно, что передать это сложно, это трудно проследить. Мельчайшие детали — от капризов погоды до условий в питомнике для рассады — имеют огромное значение. Частью проблемы является еще и скрытность. Производители трюфелей много времени убивают, блуждая в потемках неопределенности, на ощупь отыскивая обходной путь вокруг ревностно охраняемых авторских методик. «У традиции сбора грибов древние корни, — сказал мне Бюнтген (Büntgen). — Многие идут в лес собирать грибы, но никогда ничего не рассказывают. Если спросить, как прошел их день, они ответят: “О, я нашел столько грибов!”, но скорее всего, они не нашли ничего. Это продолжается поколениями и очень замедляет исследования». Не отчаиваясь, Лефевр каждый год выращивает деревья с мицелием неуловимого *Tuber magnatum* в надежде, что что-нибудь как-нибудь послужит толчком к формированию плодовых тел. Вооружась тем же оптимизмом, он продолжает эксперименты по скрещиванию видов европейских трюфелей с американскими деревьями (оказалось, что у *Tuber magnatum* складываются вполне здоровые, хотя и бесплодные отношения с осинами). Другие производители изолируют бактерии из трюфелей, надеясь, что они стимулируют рост мицелия *Tuber* (некоторые группы бактерий кажутся многообещающими). Я спросил Лефевра,

многие ли покупают его деревья с *Tuber magnatum* для своих трюфельных ферм. «Немногие, — ответил он, — но мы все равно продаем деревья, считая, что если не пытаться, ничего ни у кого никогда не получится».

подслушивают и шпионят за своими жертвами: о химическом «подслушивании» и «шпионаже» см.: Hsueh et al. (2013).

Условно можно назвать стрекательными: Nordbring-Hertz (2004) и Nordbring-Hertz et al. (2011).

опцию, остается неизвестным: Nordbring-Hertz (2004).

или забыть метить: сегодня область биологии, воспламененная спорами об антропоморфизме, — изучение растений и тех способов, которыми они воспринимают среду и реагируют на нее. В 2007 году 36 выдающихся ботаников подписали письмо, которое уничтожило зарождающуюся «область нейробиологии растений» (Alpi et al. [2007]). Те, кто выдвинул этот термин, утверждали, что у растений есть системы электрических и химических сигналов, эквивалентные тем, что были обнаружены у человека и других животных. 36 авторов письма заявили, что это «поверхностные аналогии и сомнительные экстраполяции». Последовал весьма оживленный спор (Trewavas [2007]). С антропологической точки зрения, эти противоречия необыкновенно интересны. Наташа Майерс, антрополог из Йоркского университета в Канаде, опросила ряд ботаников, как они понимают поведение растений (Muers [2014]). Она описала беспокойную ситуацию в отношении к антропоморфизму и различные способы, которые исследователи применяли, чтобы разобраться в ней.

попадают в другую западню: Kimmerer (2013), “Learning the Grammar of Animacy”.

от которых зависит их существование: «Его отношения с деревом, приютившим его, очень плохо изучены, — объяснил Лефевр, — даже в тех местах, где урожайность трюфелей высока, соотношение корней, колонизированных грибом, часто чрезвычайно низкое. Это значит, что объяснить урожайность количеством минеральных веществ, получаемых грибом от его дерева, нельзя».

не принадлежащих миру людей организмах: о запахах и их сходстве см.: Burr (2012), ch. 2. Антрополог Анна Цзин (Анна

Tsing) пишет, что в период Эдо в Японии (1603–1868) запах грибов мацутакэ стал популярной темой в поэзии. Прогулки за грибами мацутакэ превратились в осенний эквивалент празднования цветения сакуры и ссылки на «осенний аромат» или «аромат грибов» стали привычными поэтическими тропами (Tsing [2015]).

Глава 2. ЖИВЫЕ ЛАБИРИНТЫ

и нет нити, ведущей из него: Sixous (1991).

каким-то невероятным образом, является и одним, и многими одновременно: о поиске грибом выхода из лабиринта см.: Hanson et al. (2006), Held et al. (2009, 2010, 2011, 2019). Великолепные видео и дополнительную информацию о Held et al. (2011) см. на сайте www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1878614611000249 [дата обращения 29 октября 2019 г.] и www.pnas.org/content/116/27/13543/tab-figures-data [дата обращения 29 октября 2019 г.].

бросающий вызов нашему воображению, ограниченному принадлежностью к животному миру: о морских грибах см.: Hyde et al. (1998), Sergeeva and Kopytina (2014) и Peay (2016); о грибах в пыли см.: Tanney et al. (2017); по поводу приблизительного определения длины грибных гиф в почве см.: Ritz and Young (2004).

Она полностью перестроилась: часто наблюдаемое явление см.: Boddy et al. (2009) и Fukusawa et al. (2019).

еще не знаем, что лежит в основе их памяти: Fukusawa et al. (2019). Послужил ли новый кусок дерева причиной изменения концентрации химических веществ или экспрессии генов по всей сети? Или мицелий быстро перераспределился в пределах старого куска дерева, чтобы расти заново в одном направлении было проще? У Бодди (Boddy) и ее коллег уверенности в этом нет. Исследователи, ставившие перед грибами задачу найти выход из микроскопических лабиринтов, заметили, что структуры внутри растущих кончиков гиф ведут себя как встроенные гироскопы. Они позволяют гифам запоминать направление, благодаря чему те возвращаются на изначальную траекторию роста после отклонения от нее.

Так они обходят препятствия (Held et al. [2019]). Однако маловероятно, чтобы этот механизм вызвал эффект, который наблюдали Бодди и ее коллеги, так как все гифы — включая кончики — были полностью удалены с первого куска дерева, прежде чем его поместили в новую чашку Петри.

Мицелий — это множество: грибные гифы не похожи на клетки тел животных или растений, у которых (обычно) есть четко определенные границы. Строго говоря, гифы вообще не стоит считать клетками. По всей длине гиф многих грибов имеются разделительные перегородки — септы, — которые могут открываться и закрываться. Когда они открыты, содержимое гиф может перетекать из «клетки» в «клетку», и тогда о грибницах говорят, что они перешли в «надклеточное» состояние (Read [2018]). Одна грибница может слиться со многими другими с образованием обширных «гильдий». Внутри их веществами, проходящими по одной мицелиевой сети, могут воспользоваться и другие грибницы. Где начинается и заканчивается клетка? Где начинается и заканчивается мицелиевая сеть? Ответить на эти вопросы зачастую невозможно. О недавних исследованиях стайного и роевого поведения см.: Bain and Bartolo (2019), а также комментарии Oullette (2019). В этом исследовании стаи и рои трактуются как единые сущности, а не как коллектив особей, ведущих себя в соответствии с локальными правилами. Рассматривая стаю или рой как флюидный поток, можно смоделировать схему их поведения. Вполне возможно, что при помощи этих «гидродинамических» моделей нисходящих потоков можно построить матрицу роста кончиков гиф. Но это сложнее, если опираться на модели стаи/роя, основанные на взаимодействии отдельных особей, подчиняющихся локальным правилам.

или программировать роботов: по поводу слизевиков см.: Tero et al. (2010), Watanabe et al. (2011), Adamatzky (2016); о грибах см.: Asenova et al. (2016) и Held et al. (2019).

в поисках еды: об обсуждении компромиссов, на которые идут грибницы, см.: Bebbet et al. (2007).

тело без структуры: дискуссию о естественном выборе связей в мицелиевых сетях см.: Bebbet et al. (2007).

«*Детям нравилось*»: о роли грибной биолюминесценции и распространения спор насекомыми см.: Oliveira et al. (2015); о лисьих огнях и «Черепаше» (the *Turtle*) см.: www.cia.gov/library/publications/intelligence-history/intelligence/intelltech.html [дата обращения 29 октября 2019 г.] и Diamant (2004), p. 27. В своем руководстве по грибам, опубликованном в 1875 году, Мордехей Кук (Mordecai Cooke) писал, что биолюминесцентные грибы обычно растут на деревянных опорах, используемых в угольных шахтах. Шахтеры «хорошо знакомы с фосфоресцирующими грибами и утверждают, что грибы дают столько света, “что видно руки”. Разновидности трутовика светились настолько ярко, что их было видно за 20 ярдов».

другое физиологическое состояние: видео Olsson см. на сайте doi.org/10.6084/m9.figshare.c.4560923.v1 [дата обращения 29 октября 2019 г.].

за такое короткое время: в исследовании, опубликованном Oliveira et al. (2015), говорилось, что биолюминесцентный мицелий *Neonothopanus gardneri* регулируется циркадными температурозависимыми биоритмами. Авторы выдвигают теорию, что, усиливая свечение ночью, грибы привлекают насекомых, которые разносят их споры. Явление, которое наблюдал Олссон, тем не менее нельзя объяснить, опираясь на циркадные биоритмы, так как оно наблюдалось лишь однажды за несколько недель.

тела в пищу: о диаметрах гиф см.: Fricker et al. (2017). Эколог Роберт Уиттэкер (Robert Whittaker) заметил, что в то время, как эволюция животных — это история «изменчивости и вымирания», эволюция грибов — это история «консерватизма и преемственности». Огромное разнообразие строения тел животных, найденных в виде окаменелых ископаемых, иллюстрирует многочисленные способы питания, избранные ими. О грибах этого сказать нельзя. У мицелиевых грибов было намного больше времени для развития, чем у многих других организмов, но грибные окаменелости поразительно похожи на грибы, что растут в наши дни. Оказывается, существует всего несколько способов существования в виде сети. См.: Whittaker (1969).

ловить падающие листья: о мицелиевых сетях, которые ловят опадающие листья, см.: Hedger (1990).

восьмитонный школьный автобус: измерения давления, оказываемого патогенным грибом рисовой гнили, ищите у Howard et al. (1991); о восьмитонном школьном автобусе, как и об агрессивном росте грибов, см.: Money (2004a). Чтобы оказать такое высокой давление, гифы должны приклеиться к растению и не отставать от его поверхности. Для этого они вырабатывают клейкое вещество, которое выдерживает механическое напряжение 10 мегапаскалей. Для сравнения: суперклей может выдержать механическое напряжение в 15–25 мегапаскалей, хотя, вероятно, не на восковой поверхности листа растения (Roper and Seminara [2017]).

600 в секунду: клеточные полости известны как везикулы (в переводе с латыни — «пузырьки»). Ростом кончиков гиф управляет клеточное образование, или органелла, которую называют телом конца гифы (Spitzenkörper). В отличие от большинства органелл, у этой нет четко очерченных границ. Она не представляет собой единую структуру, такую как ядро, хотя кажется, что ведет себя как единое целое. Это тело рассматривают как «центр поставки везикул», получающий везикулы изнутри гиф и сортирующий их, а затем распределяющий по растущим гифовым концам. Оно управляет и собой, и своими гифами. Деление концов вызывает ветвление гиф. Когда прекращается рост, исчезает и эта органелла. Если изменить ее положение в растущем кончике гифы, ее можно направить в другую сторону. Эта органелла может уничтожить то, что создает, растворив стенки гиф и дав таким образом возможность слиться разным частям мицелиевой сети. Об этой органелле см.: Moore (2013a), ch. 2, а также Steinberg (2007); о том, что гифы некоторых разновидностей грибов могут увеличиваться в длину на глазах, см.: Roper and Seminara (2017).

в его постоянном развитии: описание течения времени, сделанное французским философом Анри-Луи Бергсоном, напоминает описание развития грибных гиф: «Длительность — это непрерывное продвижение вперед прошлого, которое вгрызается в будущее и набухает по мере продви-

- жения вперед» (Bergson [1911], p. 7). С точки зрения биолога Дж. Б. С. Хэлдейна (J. B. S. Haldane), жизнь представлена не объектами, а стабилизированными процессами. Хэлдейн зашел настолько далеко, что назвал «концепцию вещи, или материального объекта, бесполезной» для биологической мысли (Dupré and Nicholson [2018]). Введение в процессуальную биологию ищите у Dupré and Nicholson (2018). Цитату Бейтсона см. в Bateson (1928), p. 209.
- «весил 83 фунта»*: о сморчках вонючих, прорастающих сквозь асфальт, см.: Niksic et al. (2004); о Куке см.: Moore (2013b), ch. 3. Рост кончиков происходит не только у грибных гиф, но и у других организмов; это исключение, а не правило. Нейроны в организме животных растут, удлиняясь на конце, то же самое происходит и с некоторыми типами растительных клеток, например пыльцевыми трубками. Но ни те, ни другие не способны удлиняться бесконечно, как грибные гифы в способствующих их росту условиях (Riquelme [2012]).
- и существуя бок о бок*: Фрэнк Дуган (Frank Dugan) описывает «травниц» или «знахарок» в Европе эпохи Реформации как «повитух/акушерок» области современной микологии (Dugan [2011]). Множество письменных свидетельств позволяет предположить, что женщины были основными хранительницами знаний о грибах. Большую часть информации о грибах, которые они описали в своих научных трудах, мужчины-ученые того времени, включая Каролуса Клузиуса (Шарля де Леклюза; 1526–1609) и Франциска ван Стербека (1630–1693), почерпнули именно у таких женщин. Ряд художественных полотен — от «Торговки грибами» (Феличе Бозелли (1650–1732)) до «Женщин, собирающих грибы» (Камиль Писсаро (1830–1903)) и «Сборщиц грибов» (Феликс Шлезингер, 1833–1910) — изображают женщин, занимающихся грибами. В многочисленных заметках европейских путешественников XIX и XX веков описываются женщины, собирающие или продающие грибы.
- воспроизведенные каждым из них мелодии будут сильно отличаться друг от друга*: о полифонии и ее определении см.: Bringhurst (2009), ch. 2, «Поющие с лягушками: теория и практика литературной полифонии» (“Singing with the frogs: the theory and practice of literary polyphony”).

образований, до сих пор неясно: оценку скорости перемещения потока веществ в шнуровидных образованиях и ризоформах можно найти у Fricker et al. (2017). Обычно считается, что для регулирования своего развития грибы используют химические вещества, однако о том, какие именно, известно очень мало (Moore et al. [2011], ch. 12.5, и Moore [2005]). Как могут такие четкие формы возникнуть из однородной массы гифовых нитей? Палец любого представителя животного царства является очень сложной формой. Но он создан из сложного сочетания различных видов клеток — кровяных клеток, костных клеток, нервных клеток и всех остальных. Грибы тоже представляют собой сложные формы, но они — пучки, извлеченные только из одного вида клеток, из гиф. Как грибы создают свои плодовые тела, очень долго оставалось тайной. В 1921 году русский эволюционный биолог Александр Гурвич размышлял о развитии грибов. Ножка гриба, юбочка вокруг нее и шляпка гриба состоят из гиф, торчащих в разные стороны, как «лохматые нечесанные волосы». Вот что его озадачивало. Строить плодовое тело гриба только из гиф — это все равно что пытаться создать лицо из одних только мышечных клеток. С точки зрения Гурвича, то, как гифы срастаются для создания сложных форм, являлось одной из самых главных загадок во всей эволюционной биологии. Организация тела животного специализирована на самых ранних стадиях его развития. Форма его тела возникает из четко организованных составляющих; регулярность порождает дальнейшую регулярность. Но форма грибного плодового тела складывается из *менее* организованных частей. Правильная форма возникает из не имеющего четкой организации материала (von Bertalanffy [1933], pp. 112–17). Отчасти воодушевленный процессом грибного роста, Гурвич выдвинул гипотезу о том, что развитие организмов управляется полями. Расположение железных стружек можно изменить при помощи магнитного поля. Аналогичным образом, развивал свою теорию Гурвич, расположением клеток и тканей внутри организма можно управлять при помощи формирующих биологических полей. Полевая теория развития Гурвича была подхвачена целым рядом современных биологов. Майкл Ле-

вин (Michael Levin), исследователь Университета Тафтса в Бостоне, описывает, как все клетки омываются «насыщенным морем информации», состоящим либо из физических, либо из химических, либо из электрических сигналов. Эти информационные поля помогают объяснить, как могут возникнуть сложные формы (Levin [2011] и [2012]). В исследовательской работе, опубликованной в 2004 году, была построена математическая модель, воспроизводящая процесс роста грибного мицелия — «кибергриб» (Meskkauskas et al.) [2004], Money [2004b], и Moore [2005]). В данной модели каждый кончик гифы способен влиять на поведение других гифовых кончиков. В исследовании сообщается, что грибообразные формы могут возникнуть, когда абсолютно все концы гиф в своем развитии подчиняются одним и тем же правилам роста. Эти изыскания подводят к выводу о том, что формы плодовых тел грибов могут рождаться в результате «коллективного поведения» гиф, не нуждаясь в той координации развития по нисходящей, которая проявляется у животных и растений. Но чтобы это осуществилось, десятки тысяч гифовых концов должны одновременно подчиниться одному и тому же набору правил, а затем переключиться на другой набор правил, и тоже одновременно — современная интерпретация загадки Гурвича. Исследователи, создавшие кибергриб, предполагают, что изменения в развитии могут координироваться клеточными «часами» и биоритмами, но ничего подобного такому механизму пока обнаружено не было, и то, как живые грибы координируют свое развитие, остается загадкой.

тем местом, где выросли сами плодовые тела грибов: о микротрубочковых моторах см.: Fricker et al. (2017); о домовом грибе *Serpula Lakrymans* в Хэддон-Холл см.: Moore (2013b), ch. 3; с дискуссией о роли потока веществ в развитии грибов можно ознакомиться у Alberti (2015) и Fricker et al. (2017). Скорость потока веществ в грибных гифах варьируется от 3 до 70 микрометров в секунду, что иногда в 100 раз превышает скорость только пассивного переноса (Abadeh and Lew [2013]). Алану Рейнеру (Alan Rayner) нравится сравнение с рекой, потому что реки — это «системы, которые и формируют ландшафт, и формируются ланд-

шафтом». Река течет между берегами. В процессе течения она придает форму берегам, в пределах которых она течет. Рейнер воспринимает гифы как реки с тупым концом, текущие между берегами, которые они создают для себя. Как и в любой проточной системе, давление — это главное. Гифы поглощают воду из окружающей их среды. Внутренний поток воды увеличивает давление в сети. Но само по себе давление не вызывает течения. Чтобы вещество потекло по мицелию, гифы должны создать пространство, в которое поток устремится. Это происходит благодаря росту гиф. Содержимое гиф направляется в сторону их растущих кончиков. Вода течет по мицелиевой сети в сторону быстро набухающего плодового тела гриба. Если изменить перепад давления на противоположный, поток направится обратно (Roper et al. [2013]). Однако гифы, оказывается, способны более точно регулировать поток. В работе, опубликованной в 2019 году, авторы отследили движение питательных веществ и сигнальных соединений по гифам в режиме реального времени. В определенных больших гифах поток клеточной жидкости каждые несколько часов менял направление, позволяя таким образом потоку сигнальных соединений и питательных веществ двигаться по сети в обе стороны. Примерно в течение трех часов поток двигался в одном направлении. В последующие три часа поток устремлялся в противоположную сторону. Как гифам удается контролировать поток материи внутри их, неизвестно, но благодаря ритмичному изменению направления клеточного потока вещества распределяются по сети более эффективно. Авторы высказывают предположение, что скоординированное открывание и закрывание гифовых пор является «основным фактором» в управлении двунаправленным потоком по транспортным гифам (Schmieder et al.) [2019], см. также комментарии Roper and Dressaire [2019]). «Сжимающиеся вакуоли» (*contractile vacuoles*) являются еще одним способом, который грибы могут использовать для направления потока внутри себя. Вакуоли представляют собой трубки внутри гиф, по которым могут проходить волны сокращений и которые, как сообщалось, играют определенную роль

- в транспортировке веществ по мицелиевым сетям (Shepherd et al. [1993], Rees et al.) [1994], Allaway and Ashford [2001], и Ashford and Allaway [2002]).
- как иронично заметил один из исследователей:* Roper et al. (2013), Hickey et al. (2016), и Roper and Dressaire (2019). Следующие видео можно посмотреть на YouTube: “Nuclear dynamics in a fungal chimera” (www.youtube.com/watch?v=FSuUQP_BBc); “Nuclear traffic in a filamentous fungus” (www.youtube.com/watch?v=AtXKcro5o30).
- в сотни раз интенсивнее:* Cerdá-Olmedo (2001) и Ensminger (2001), ch. 9.
- но это еще предстоит доказать:* о «самом умном» см.: Cerdá-Olmedo (2001); о реакции избегания см.: Johnson and Gamow (1971) и Cohen et al. (1975).
- разновидностей «других»:* свет влияет на многие аспекты жизни мицелия, от развития плодовых тел до создания взаимоотношений с другими организмами — пугающий всех патогенный грибок рисовой гнили заражает свои жертвы только ночью, Deng et al. [2015]). О восприятии света у грибов см.: Purschwitz et al (2006), Rodriguez-Romero et al (2010)), и Corrochano and Galland (2016)); о восприятии поверхностной топографии см.: Hoch et al. (1987) Brand and Gow (2009); о восприятии силы земного притяжения см.: Moore (1996), Moore et al. (1996), Kern (1999), Bahn et al. (2007), и Galland (2014).
- хоть сколько-то напоминающим мозг:* Darwin and Darwin (1880), с. 573. Об аргументах в пользу гипотезы «корневого мозга» см.: Trewavas (2016), а также Calvo Garzón and Keijzer (2011); об аргументах против аналогий с мозгом см.: Taiz et al (2019); с введением в дебаты по поводу «интеллекта растений» можно ознакомиться в Pollan, “The Intelligent Plant” (2013).
- одновременно и в больших количествах:* о поведении кончиков гиф см.: Held et al. (2019).
- такой быстрый перенос информации по сети грибницы:* о магических, или ведьминых, кругах см.: Gregory (1982).
- других немногих возможностей, а именно электричество:* некоторые исследователи сообщали о внезапных сокращениях гиф, или подергиваниях, которые могли использоваться для

передачи информации. Однако эти сокращения недостаточно регулярны, чтобы использоваться на постоянной основе. См.: McKerracher and Heath (1986a and 1986b), Jackson and Heath (1992), и Reynaga-Peña and Bartnicki-García (2005). Некоторые ученые предполагают, что информация может передаваться по мицелиевым сетям посредством изменения алгоритмов потока внутри сети, при этом его направление может иногда изменяться при помощи ритмических колебаний (Schmieder et al.) [2019] и Roper and Dressaire [2019]). Это вполне перспективное исследовательское направление, и, возможно, будет полезно воспринимать мицелиевые сети как своего рода «жидкие компьютеры», многочисленные версии которых созданы и применены в различных системах контроля — от истребителей до атомных реакторов (Adamatzky [2019]). Однако изменения в потоке в грибнице все еще происходят слишком медленно, чтобы объяснить многие явления. Вполне возможно, что регулярная пульсация, вызванная метаболической деятельностью, проходящая по мицелиевым сетям, служит грибницам для координации своих действий по всей сети, и все же эти импульсы слишком замедленны, чтобы объяснить многие феномены (Tlalka et al.) [2003, 2007], Fricker et al.) [2007a и 2007b, и 2008]). Образцовым организмом для объяснения жизнедеятельности сетей являются решающие головоломки слизевики. Хотя их нельзя считать грибами, слизевики выработали в процессе своей эволюции способы координировать поведение своих расползающихся, меняющих очертания тел и очень полезны в качестве модели для понимания трудностей, с которыми сталкиваются мицелиевые грибы, и возможностей, которые у них появляются. Благодаря тому, что они растут быстрее, чем грибницы, их проще изучать. Слизевики общаются с различными частями своих тел, посылая ритмические импульсы, прокатывающиеся по ответвлениям их сетей волнами сокращений. Ответвления, обнаружившие еду, выделяют сигнальную молекулу, которая усиливает сокращения. Более интенсивные сокращения увеличивают объем клеточного потока, проходящего именно по этому отростку сети. С каждым сокращением по более короткому пути будет

проходить больше вещества, чем по более длинному. Чем больше вещества проходит по конкретному отрезку сети, тем больше он укрепляется. Именно цикл обратной связи позволяет организму перестраиваться, устремляясь по «более перспективным» путям за счет «менее перспективных» маршрутов. Импульсы, исходящие из разных частей сети, объединяются, влияют друг на друга и усиливают друг друга. Таким образом слизевики способны интегрировать информацию, поступающую из разных частей их тел, и решать сложные проблемы маршрутизации, обходясь без какого-либо особого места для этого (Zhu et al.) [2013], Alim et al. [2017], и Alim [2018]).

важную роль в жизни грибов: в середине 1980-х один из исследователей заметил, что «грибная электробиология — это самое радикальное отступление от традиционной биологии, на которое могут решиться современные исследователи» (Harold et al. 1985). С тех пор, тем не менее, было обнаружено, что грибы реагируют на стимуляцию электричеством удивительным образом. Обработка мицелия ударами электрического тока может существенно увеличить урожай грибных плодовых тел (Takaki et al.) [2014]). Урожаи чрезвычайно ценных грибов мацутакэ — вида микоризных грибов, которые до сих пор не удавалось выращивать на плантациях, — могут практически удвоиться, если через землю вокруг их партнеров-деревьев пропустить заряды электричества в 50 киловольт. Исследователи провели этот эксперимент после рассказов грибников о том, что небывалое количество грибов мацутакэ вырастает вокруг того места, в которое попала молния, через несколько дней после ее удара (Islam and Ohga [2012]). О биоэлектрических потенциалах у растений см.: Brunet and Arendt (2015); первые сообщения о биоэлектрических потенциалах у грибов можно найти у Slayman et al. (1976); общие сведения о грибной электрофизиологии можно найти у Gow and Morris (2009); о «кабельных бактериях» см.: Pfeffer et al. (2012); о волнах активности, подобных биоэлектрическим потенциалам, можно прочесть у Prindle et al. (2015), Liu et al. (2017), Martinez-Corral et al. (2019) и в резюме Porpkin (2017).

пищей для этого вида: Олссон оценил скорость прохождения сигнала, измерив время между стимуляцией и реакцией на нее. Таким образом этот показатель учитывает время, которое а) требуется грибу, чтобы ощутить стимуляцию; б) требуется сигналу, чтобы пройти из точки А в точку В; в) требуется на то, чтобы зарегистрировать реакцию микроэлектродами. То есть фактическая скорость может быть куда выше измеренной. Насколько известно, максимальная скорость потока внутри грибного мицелия в целом — 180 мм/ч (Whiteside et al. [2019]). Олссон показал, что импульс, подобный потенциалу действия, проходит со скоростью 1800 мм/ч.

«других существ вокруг него»: Olsson and Hansson (1995) и Olsson (2009). Сделанную Олссоном запись изменений в активности, подобной биоэлектрическим потенциалам, можно найти на doi.org/10.6084/m9.figshare.c.4560923.v1 [дата обращения 29 октября 2019].

использовал ее в качестве метафоры: Oné Pagán указывает на то, что общепринятого определения мозга не существует. Он утверждает, что логичнее давать определение мозгу, описывая его активность, нежели конкретные особенности его анатомии (Pagán [2019]). Об управлении порами в грибных сетях см.: Jedd and Pieuchot (2012), Lai et al. (2012).

в грибной компьютер: Adamatzky (2018a, 2018b).

«сетевым» организациям: примеры вычислительной деятельности сети можно найти у van Delft et al. (2018) и Adamatzky (2016).

к которым они чувствительны: Adamatzky (2018a, 2018b).

«если это окажется правильным»: я спросил у Олссона, почему никто не продолжил его исследований с 1990-х годов. «Когда я сделал доклад на конференции, моя работа действительно заинтересовала очень-очень многих, — ответил он. — Но они считали ее странной». Все исследователи, которых о его работе спрашивал я, были увлечены его идеями и хотели узнать о его работе больше. С момента доклада его работу цитировали уже много раз. Но добиться финансирования на продолжение своей работы в этой области Олссон

так и не смог. Считалось, что его работа, скорее всего, ни к чему не приведет — используя официальную формулировку, она была «слишком рискованной».

задолго до того, как мозг стал таким, каким мы его знаем: по поводу «архаичного мифа» читайте Pollan (2013); о древних клеточных процессах, лежащих в основе мозговой деятельности, читайте работу Manicka and Levin (2019). «Гипотеза движения» утверждает, что мозг развился как причина и следствие того, что у животных появилась необходимость перемещаться с места на место. Организмы, остающиеся на одном месте, не сталкиваются с таким типом проблем, и, соответственно, у них развились системы другого рода для разрешения сложностей, которые встают перед ними (Solé et al. [2019]).

все, что нужно: высказывание Darwin (1871), приводимое Trewavas (2014), ch. 2. О «минимальном познании» см.: Calvo Garzón and Keijzer (2011); о «биологически воплощенном познании» см.: Keijzer (2017); о сознании растений см.: Trewavas (2016); о познании «базальных ядер» и степеней познания читайте Manicka and Levin (2019); обсуждение микробиологического интеллекта можно найти у Westerhoff et al. (2014); информация о разных типах «мозга» приводится в работе Solé et al. (2019).

гибко перестраивающихся нейронов: о «сетевой неврологии» см.: Basset and Sporns (2017) и Barbey (2018). Научные достижения, позволяющие выращивать культуры тканей головного мозга в лабораторных условиях — известные как «органоиды» мозга, — еще больше усложняют наше восприятие понятия «интеллект». Философские и этические вопросы, поднятые этими технологиями — и отсутствие четких ответов, — являются напоминанием о том, что в определении границ нашего собственного биологического Я ясность тоже отсутствует. В 2018 году несколько ведущих неврологов и биоэтиков опубликовали статью в журнале *Nature*, в которой они рассматривали некоторые из этих вопросов (Farahany et al. [2018]). В грядущие десятилетия достижения в выращивании тканей головного мозга позволят создать искусственный «минимозг», который будет более точно имитировать работу человеческого

головного мозга. Авторы пишут, что «по мере того, как суррогатный мозг будет становиться больше и сложнее, возможность того, что у него появится способность ощущать и разумность, сходные с человеческими, станет все ближе. Среди них, возможно, будут и такие, как способность испытывать удовольствие, боль или отчаяние; способность хранить и восстанавливать воспоминания; или, вероятно, способность ощущать и воспринимать себя как индивидуальность». Некоторых ученых беспокоит мысль о том, что эти органоиды мозга когда-нибудь могут оказаться умнее нас (Thierry [2019]).

тянуться и хватать: об эксперименте с плоскими червями см.: Shomrat and Levin (2013); о нервной системе осьминогов см.: Hague et al. (2013) и Godfrey-Smith (2017), гл. 3.

катастрофические глобальные изменения: Bengtson et al. (2017) и Donoghue and Antcliffe (2010). С нарочитой осторожностью Bengtson и его коллеги указывают на то, что их образцы, возможно, и не являются в действительности грибами, но могут относиться к семейству древних организмов, всеми своими явными проявлениями напоминающих современные грибы. Можно понять их нерешительность. Авторы заявляют, что если бы эти окаменелости действительно оказались грибами, они бы полностью перевернули наше нынешнее представление о том, где и как появились первые грибы. Грибы плохо сохраняются и превращаются в ископаемые, и до сих пор идут споры о том, когда именно грибы впервые ответвились от древа жизни. Методы, основанные на анализе ДНК — использующие так называемые «молекулярные часы», — позволяют предположить, что впервые грибы отклонились в своем развитии от древа жизни около миллиарда лет назад. В 2019 году исследователи сообщили об обнаружении окаменелого мицелия, которому было около миллиарда лет, в арктическом сланце (Loron et al. [2019] и Ledford [2019]). Более ранним грибным окаменелостям, согласно анализу, порядка 450 миллионов лет (Taylor et al. [2007]). Самым ранним окаменелостям грибов с гимениальными пластинами примерно 120 миллионов лет (Heads et al.) [2017]).

бесконечно перестраивают себя: о Барбаре МакКлинток (Barbara McClintock) см.: Keller (1984).

понять: там же.

одного из старейших лабиринтов жизни: Александр Гумбольдт (Humboldt) (1849), т. 1, стр. 20.

Глава 3. БЛИЗОСТЬ НЕЗНАКОМЦЕВ

говоря «мы»: Rich (1994).

«получим назад наши образцы»: BIOMEX — один из нескольких астробиологических проектов. О BIOMEX см.: de Vera et al. (2019); О платформе EXPOSE см.: Rabbow et al. (2009).

«ограниченности земных форм жизни»: цитату «границ возможностей и ограниченности земных форм жизни» можно найти у Sancho et al. (2008); обзор организмов, отправленных в космос, включая лишайники, см.: Cottin et al. (2017); о лишайниках как о модельных организмах для астробиологических исследований читайте в работе Meeßen et al. (2017) и de la Torre Noetzel et al. (2018).

нельзя понять, изолировав их от всего остального: Wulf (2015), ch. 22.

по отдельности никто из них не выжил бы: о Швенденере и гипотезе двойственности (о «полезном и дающем силы паразитизме») см.: Sapp (1994), ch. 1.

«не верим в теорию Швенденера»: Sapp (1994), ch. 1; о «сенсационном романе» см.: Ainsworth (1976), ch. 4. Некоторые из биографов Беатрис Поттер предполагали, что она была сторонницей гипотезы двойственности Швенденера, но со временем, вероятно, изменила свое к ней отношение. Тем не менее в 1897 году в письме к Чарльзу Макинтошу, сельскому почтальону и натуралисту-любителю, она четко сформулировала свою позицию в этом вопросе: «Видите ли, мы не верим в теорию Швенденера, а в более старых книгах говорится, что лишайники постепенно перерождаются в перелеску благородную через листовидные разновидности. Мне бы очень хотелось вырастить спору одного из этих больших плоских лишайников, а также спору настоящей перелески, чтобы сравнить два вида прорастания.

Названия неважны. Я могу их засушить. Если бы Вам удалось добыть для меня еще спор лишайника и перелески, когда изменится погода, я была бы Вам очень обязана» (Kroken [2007]).

совершенно неожиданное: они сходились: дерево — один из основополагающих образов в современных теориях эволюции и, как известно, единственная иллюстрация в работе Дарвина «О происхождении видов». Дарвин ни в коем случае не был первым, кто использовал этот образ. Веками ветвящаяся форма дерева придавала упорядоченности и наглядности человеческой мысли в различных областях — от теологии до математики. Лучше всего, вероятно, всем знакомы генеалогические древа, уходящие корнями в Ветхий Завет (Древо Иессеево).

отношений на противоположном конце: с дебатами по поводу изображения Швенденером лишайников можно познакомиться у Sapp (1994), ch. 1, и Honegger (2000); об Альберте Франке и симбиозе см.: Sapp (1994), ch. 1, Honegger (2000) и Sapp (2004). Сначала Франк использовал слово *simbiotismus*, «симбиотизм».

описал их как «микролишайники»: предки зеленых морских слизней (зеленых морских огурцов) — *Elysia viridis* — поглощали водоросли, продолжавшие жить в их тканях. Зеленые морские слизи получают энергию из солнечного света так же, как и растения. О новых симбиотических открытиях читайте работу Honegger (2000); о «животных-лишайниках» см.: Sapp (1994), ch. 1; о «микролишайниках» читайте работу Sapp (2016).

сотрудничества между природными царствами: цитату из Хаксли ищите у Sapp (1994), p. 21.

«выглядят как сказочные персонажи»: приблизительная оценка — 8 % площади земли, покрытой лишайниками, приводится Ahmadjian (1995); о территории, превышающей площадь тропических лесов, см.: Moore (2013a), ch. 1; образ «подвешены в хэштегах» (“hung in hashtags”) можно найти у Hillman (2018); о разнообразии ареалов обитания лишайников, включая блуждающие лишайники и лишайники, живущие на насекомых, читайте работу Seaward (2008);

- интервью с Knudsen можно найти на aeon.co/videos/how-bsd-helped-a-scientist-find-beauty-in-a-peculiar-and-overlooked-form-of-life [дата обращения с 29 октября 2019].
- «консистенции глины»: цитату «каждый памятник» (*every monument*) можно найти на twitter.com/GlamFuzz [29 октября 2019]; о горе Рашмор см.: Perrottet (2006); о гигантских головах с острова Пасхи можно узнать на www.theguardian.com/world/2019/mar/01/easter-island-statues-leprosy [дата обращения 29 октября 2019].
- смогли сформироваться новые почвы*: о подходах лишайников к выживанию см.: Chen et al. (2000), Seaward (2008) и Porada et al. (2014); о лишайниках и формировании почвы см.: Burford et al. (2003).
- создавали новую жизнь*: об истории панспермии и связанных с ней идеях см.: Temple (2007) и Steele et al. (2018).
- сегодня известна как астробиология*: в ответ на опасения Ледерберга о возможности межпланетного заражения NASA разработала способы стерилизации космического корабля перед его стартом с Земли. Полной дезинфекции, однако, добиться не удалось: на борту Международной космической станции процветает популяция добровольцев-бактерий и грибов (Novikova et al. [2006]). Когда в 1969 году после первого полета на Луну «Аполлон 11» вернулся на Землю, космонавтов поместили в строжайший карантин на три недели в специально переоборудованный трейлер (Scharf [2016]).
- по несколько часов в день*: после исследований, проведенных Фредериком Гриффитсом в 1920-х годах, результаты которых были подтверждены позднее, в начале 1940-х, Освальдом Эйвери и его коллегами, стало известно, что бактерии способны получать ДНК из окружающей их среды. То, что продемонстрировал Джошуа Ледерберг, было способностью бактерий активно обмениваться друг с другом генетическим материалом — процесс, известный как конъюгация. О результатах исследований Ледерберга см.: Lederberg (1952), Sapp (2009), ch. 10, и Gontier (2015b). Вирусные ДНК имели и имеют глубочайшее влияние на жизнь представителей царства животных: считается, что вирусные гены сыграли

ключевую роль в эволюционном отделении плацентарных млекопитающих от их яйцекладущих предков (Gontier [2015b] и Sapp [2016]).

во всех сферах жизни: ДНК бактерий обнаруживают в геномах животных (общую информацию можно найти у Yong [2016], ch. 8). ДНК бактерий и грибов находят в геномах растений и водорослей (Pennisi [2019a]). ДНК грибков обнаруживают в формирующих лишайники водорослях (Beck et al. [2015]). Передача генов по горизонтали распространена среди грибов (Gluck-Thaler and Slot [2015], Richards et al. [2011] и Milner et al. [2019]). По крайней мере 8 % человеческого генома началось с вирусов (Horie et al. [2010]).

потенциально катастрофическими последствиями: о «резком ускорении» эволюции на Земле из-за попадания на планету чужеродных ДНК см.: Lederberg and Cowie (1958).

в пределах 24 часов: о враждебности условий открытого космоса см.: de la Torre Noetzel et al. (2018).

«некоторую степень биологической активности»: Sancho et al. (2008).

без каких-либо видимых проблем: даже после облучения 18 килогреями гамма-радиации у образцов лишайника *Circinaria yugosa* только сократилась способность к фотосинтезу на 70 %. После гамма-облучения 24 килогреями фотосинтез сократился на 95 %, но полностью способность к нему не была утрачена (Meeßen et al. [2017]). Если рассматривать эти результаты в контексте устойчивости к радиации, то одними из наиболее выносливых организмов, когда-либо изученных, является архея (с чрезвычайно подходящим названием — *Thermococcus gammatolerans*), извлеченная из глубоководных гидротермальных ключей, которая может выдержать гамма-излучение в 30 килогреев (Jolivet et al. [2003]). Резюме космических исследований лишайников см.: Cottin et al. (2017), Sancho et al. (2008) и Brandt et al. (2015); о воздействии высоких доз радиации на лишайники см.: Meeßen et al. (2017), Brandt et al. (2017) и de la Torre et al. (2017); о тихходках в космосе см.: Jönsson et al. (2008).

«Они просвещают нас»: некоторые дисциплины регулярно «получают информацию» от лишайников. Лишайники на-

столько чувствительны к некоторым формам промышленного загрязнения, что их используют в качестве индикаторов чистоты воздуха (лихеноиндикация): «лишайниковые пустыни» распространяются с подветренной стороны от городской территории и могут быть использованы для картирования загрязненных индустриальными выбросами зон. В некоторых случаях лишайники служат индикаторами практически в буквальном смысле слова. Геологи используют их для определения возраста скальных образований (дисциплина, известная как лихенометрия). И лакмус, чувствительный к *pH* краситель для изготовления индикаторной бумаги — которую можно найти во всех школьных химических кабинетах, — для определения кислотности и щелочности среды, тоже получается из лишайника.

где происходит фотосинтез: недавние исследования, проведенные Thijs Ettema и его группой в Уппсальском университете, позволяют предположить, что эукариоты зародились внутри архей. Точная последовательность этапов развития остается весьма спорной (Eme et al. [2017]). Очень долго считалось, что у бактерий отсутствуют внутриклеточные структуры — оргanelлы. Сейчас это мнение меняется. Оказывается, что у многих бактерий существуют оргanelлоподобные структуры, специализирующиеся на конкретных функциях. Обсуждение этого вопроса можно найти у Cepelewicz (2019). «близость незнакомцев»: Margulis (1999); Mazur (2009), “Intimacy of Strangers and Natural Selection”.

внутри которых тоже живут бактерии: о «слиянии и поглощении» см.: Margulis (1996); об истоках эндосимбиоза см.: Sapp (1994), chs. 4 and 11; цитату Stanier (Станье) см.: Sapp (1994), p. 179; о «теории серийного эндосимбиоза» см.: Sapp (1994), p. 174; о бактериях, живущих внутри бактерий, обитающих внутри насекомых, см.: Bublitz et al. (2019); чтобы найти оригинальную статью Margulis (подписанную именем Sagan) см.: Sagan (1967).

«...сумма составных частей»: цитату «вполне аналогичным (лишайникам)» ищите у Sagan (1967); цитату «поразительные примеры» см.: Margulis (1981), p. 167. Для de Vary в 1879 году наиболее значимым следствием симбиоза могла быть

возможность появления в результате его эволюционно новых организмов (Sapp [1994], p. 9). Первые российские сторонники теории симбиоза, Константин Мережковский (1855–1921) и Борис Михайлович Козо-Полянский (1890–1957), назвали процесс, посредством которого симбиоз мог привести к появлению новых видов, симбиогенезом (то есть «становлением благодаря сосуществованию») (Sapp [1994], pp. 47–48). Козо-Полянский несколько раз упоминает в своей работе лишайники. «Не следует считать, что лишайники представляют собой результат сложения определенных водорослей и грибов. Скорее они обладают множеством своеобразных характеристик, которые нельзя обнаружить ни у грибов, ни у водорослей... везде — в их химическом составе, их форме, структуре, образе жизни и распространении — сложносоставные лишайники демонстрируют новые черты, не свойственные по отдельности составляющим их видам» (Kozo-Polyansky trans. [2010], pp. 55–56).

«...биологии XX столетия»: цитаты Докинза (Dawkins) и Деннетта (Dennett), помимо прочих, можно найти у Margulis (1996).

Объединяются путем анастомоза, как грибные гифы: «Мне кажется, метафора “эволюционное древо жизни” не совсем верна, — заметил генетик Ричард Левонтин (Richard Lewontin [2001]). — Быть может, сравнение с замысловатым и сложным плетением макраме подойдет больше». Это не совсем справедливо по отношению к деревьям. Ветви некоторых видов могут сливаться друг с другом. Процесс этот известен как иноскуляция, от латинского слова *osculare*, означающего «целовать». Но взгляните на ближайшее к вам дерево. Скорее всего, оно больше ветвится, чем сливается ветвями. Ветви большинства деревьев не похожи на грибные гифы, для которых ежедневное слияние друг с другом — обычное дело. Вопрос, подходит ли сравнение с деревом для описания эволюционного развития, обсуждается много десятилетий. Дарвин сам беспокоился о том, что образ «коралла жизни» мог бы подойти лучше, хотя под конец он решил, что использование такой метафоры «чрезвычайно все усложнит» (Gontier [2015a]). В 2009 году, во время одного из самых высоких всплесков

желчности по отношению к вопросу о древе жизни, журнал *New Scientist* вышел в обложке, на которой провозглашалось: «Дарвин ошибался». «Вырвем с корнем древо (“Uprooting Darwin’s tree”) Дарвина», — крикливо заявлял заголовок редакторской статьи. Как и следовало ожидать, все это вызвало яростную реакцию (Gontier [2015a]). Среди бури протестов выделяется письмо, посланное в редакцию Дэниелом Деннеттом (Daniel Dennett): «Да о чем же вы думали, выпуская эту аляповатую обложку, провозглашающую, что “Дарвин ошибался”?..» Можно понять, что вызвало такое сильное раздражение у Деннетта. Дарвин не ошибался. Просто он выдвинул свою теорию эволюции до того, как стало известно о существовании ДНК, генов, симбиотических слияний и передаче генов по горизонтали. Эти открытия преобразили наше восприятие истории жизни. Но основной тезис Дарвина о том, что эволюция идет путем естественного отбора, не ставится под сомнение — хотя оспаривается степень влияния естественного отбора на эволюционный процесс в качестве основной движущей силы (O’Malley [2015]). Симбиоз и передача генетического материала по горизонтали стали источниками зарождения новых видов; они стали новыми соавторами эволюции. Но естественный отбор по-прежнему выступает в роли редактора. Тем не менее в свете симбиотических объединений и горизонтальной передачи генов многие биологи начали переосмысливать образ древа жизни, заменяя его образом сложной сетчатой структуры, образуемой по мере того, как родовые линии разветвляются, сливаются и переплетаются друг с другом. «Сетчатая система», или «паутина», «сеть», «ризома», или «корневище», или «паутинка» (Gontier [2015a] и Sapp [2009], ch. 21). Линии на этих диаграммах сплетаются в узлы и растворяются друг в друге, объединяя разные виды, царства и даже домены жизни. Связующие петли вытягиваются из мира вирусов, генетических сущностей, даже не воспринимаемых как живые существа, и снова уходят внутрь его. Если понадобится новый образцовый организм для эволюционной метафоры, его не придется долго искать. Такое представление о жизни больше всего напоминает грибной мицелий, или грибницу.

заново построить отношения: у некоторых лишайников образуются специализированные рассеивающие структуры, называемые соредиями, которые состоят из грибковых и водорослевых клеток. В некоторых случаях только что проросший лишайниковый грибок может войти в партнерство с каким-нибудь фикобионтом, который не совсем удовлетворяет его потребности и сохраняется как маленький «фотосинтетический комок», или предслоевище, пока не образуется настоящее слоевище (Goward [2009c]). Некоторые лишайники могут разделяться на составляющие и вновь собираться, не образуя спор. Если определенные виды лишайника поместить в чашку Петри и создать нужные условия питания, партнеры разъединятся и расплзутся в стороны. После разделения они могут воссоздать свои партнерские отношения (хотя обычно и не в лучшей форме). В этом смысле лишайники обратимы, или реверсивны. По крайней мере, в некоторых случаях мед можно отделить от каши. До сих пор, однако, только в случае с единственным лишайником — *Endocarpon pusillum* — удалось разделить партнеров, вырастить их отдельно друг от друга и воссоединить опять, пройдя все стадии формирования и развития лишайника, включая и производство вполне функциональных спор — процесс, известный как повторный синтез “от споры до споры» (Ahmadjian and Heikkilä [1970]).

«...самых лишайников вы не видите»: симбиотическая природа лишайников вызывает несколько любопытных технических проблем. Лишайники уже давно стали маленьким кошмаром для таксономистов и классификаторов. Так сложилось, что лишайникам дают названия по именам их грибных партнеров. К примеру, лишайник, возникающий из взаимодействия грибка *Xanthoria parietina* (ксантория настенная) и водоросли *Trebouxia irregularis* (требуksия нерегулярная), известен как *Xanthoria parietina*. Подобным же образом сочетание гриба *Xanthoria parietina* и водоросли *Trebouxia arboricola* (требуksия древовидная) тоже известно под названием ксантория настенная (*Xanthoria parietina*). Названия лишайников — синекдохи в том смыс-

ле, что они обозначают целое названием части (Spribille [2018]). Существующая в настоящее время система подразумевает, что грибковый компонент лишайника и есть сам лишайник. Но это в корне неверно. Лишайники возникают из договоренностей, достигнутых между несколькими партнерами. «Воспринимать лишайник как гриб, — сетует Goward, — значит не увидеть лишайника вообще» (Goward [2009c]). Это как если бы химики называли любое содержащее углерод соединение — от алмазов до метана и метамфетамина — *углеродом*. Пришлось бы, вероятно, признать, что они кое-что упускают из виду. Это не просто ворчание на тему семантики. Дать чему-то название — значит признать его существование. Когда обнаруживают новый вид, его описывают и дают ему название. А у лишайников действительно есть свои имена, множество имен. Лихенологи не практикуют аскетизм при классификации видов. Просто единственные имена, которые они могут использовать, отскакивают, не задевая его, от явления, которое они стремятся описать. Это структурный вопрос. Биология опирается на систему классификации, или таксономическую систему, которая никоим образом не может признать симбиотического статуса лишайников. Они буквально безымянные.

миры, уменьшенные в размерах: Sancho et al. (2008).

после регидратации через 30 дней: de la Torre Noetzel et al. (2018).

метаболическое наследие этих отношений: об уникальных соединениях в лишайниках и их использовании человеком см.: Shukla et al. (2010) и в публикации State of the World's Fungi (2018); о метаболическом наследии лишайниковых отношений см.: Lutzoni et al. (2001).

уже тысячи лет: сообщения о находках ученых из Глубинной углеродной обсерватории можно прочесть у Watts (2018).

уже более 9000 лет: о лишайниках в пустыне см.: Lalley and Viles (2005) и “State of the World's Fungi” (2018); о лишайниках внутри камней см.: de los Ríos et al. (2005) и Burford et al. (2003); о Сухих долинах Мак-Мердо (бесснежных долинах антарктических оазисов) см.: Sancho et al. (2008); о жидком

- азоте см.: Oukarroum et al. (2017); о долголетию лишайников см.: Goward (1995).
- более подходящие для межпланетных путешествий:* Sancho et al. (2008).
- никаких абсолютно живых клеток:* об ударе при выбросе с планеты см.: Sancho et al. (2008), Cockell (2008). В ряде исследований было доказано, что бактерии более устойчивы к воздействию высокими температурами и ударным давлением, чем лишайники. О повторном вхождении в атмосферу см.: Sancho et al. (2008).
- вопрос остается открытым:* Sancho et al. (2008) и Lee et al. (2017).
- в зависимости от обстоятельств:* о происхождении лишайников см.: Lutzoni et al. (2018) и Honegger et al. (2012). Идет очень много споров по поводу идентификации древних лишайникоподобных окаменелостей и их принадлежности к сохранившимся разновидностям лишайников. Были обнаружены подобные лишайникам морские организмы, которым уже 600 миллионов лет (Yuan et al. [2005]), и некоторые ученые утверждают, что эти морские лишайники сыграли роль в миграции предков лишайников на сушу (Lipnicki [2015]). О многократном эволюционном развитии лишайников и повторной лихенизации см.: Goward (2009c); о делихенизации см.: Goward (2010); о дополнительной лихенизации см.: Selosse et al. (2018).
- в обществе друг друга:* Nom and Murray (2014).
- симбиотического образа жизни:* о «песне, а не певце» см.: Doolittle and Booth (2017).
- воплне могли бы быть другими планетами:* *Hydropunctaria Maura* («полночь в брызгах воды») была раньше известна как *Verrucaria tauro* («пупырчатая полночь»). Информацию о долгосрочном изучении зарождения лишайников на только что появившемся острове читайте в истории острова Сюртсей: www.anbg.gov.au/lichen/case-studies/surtsey.html [дата обращения 29 октября 2019].
- не только существительное, но и глагол:* о «едином целом» и «наборе составляющих частей» см.: Goward (2009a).
- столетия пристального наблюдения:* Spribille et al. (2016).

«одного гриба и одной водоросли»: о грибном разнообразии внутри лишайников см.: Arnold et al. (2009); о дополнительных партнерах волчьего лишайника см.: Tuovinen et al. (2019), Jenkins and Richards (2019).

что представляют собой живые организмы: по поводу «Неважно, как вы их назовете» см.: Hillman (2018). Goward сформулировал определение лишайников, которое учитывает эти недавние изыскания: «Долговечный физический побочный продукт лихенизации, определяемый как процесс, посредством которого система, состоящая из любого числа грибных, водорослевых и бактериальных таксонов, создает таллус [одно, общее на всех, тело лишайника], рассматриваемый как только что возникшая собственность всех его составляющих» (Goward 2009b).

сгусток в лабораторной чашке: о лишайниках как о резервуарах микробов см.: Grube et al. (2015), Aschenbrenner et al. (2016) и Cernava et al. (2019).

«нам сложно соотносить себя с ними»: о теории странности/нетрадиционности, предложенной для лишайников, см.: Griffiths (2015).

Или, вернее, всех вас: См.: Gilbert et al. (2012) для более подробной информации о том, как микроорганизмы вносят сумятицу в самые разные определения биологической индивидуальности. Дальнейшую информацию о микробах и иммунитете можно найти у McFall-Ngai (2007) и в работе Lee and Mazmanian (2010). Некоторые ученые предлагают альтернативные определения биологических индивидов на основе «общей судьбы» жизненной системы. Например, Frédéric Bouchard предлагает следующую формулировку: «Биологический индивид — это функционально интегрированная сущность, чья интеграция связана общей судьбой с системой, когда окружающая их среда подвергает их жесткому отбору» (2018).

что они действительно существуют: Gordon et al. (2013); Bordenstein and Theis (2015).

полны трениями и конфликтами: об инфекциях, вызываемых кишечными бактериями, см.: Van Tyne et al. (2019).

«Мы все лишайники»: Gilbert et al. (2012).

Глава 4. МИЦЕЛИЕВОЕ СОЗНАНИЕ

и мне отвечают: Maria Sabina, из записи, сделанной Gordon Wasson и процитированной в работе Schultes et al. (2001), p. 156.

границ своего Я: краткое резюме клинических исследований психоделиков см.: Winkelman (2017); расширенную информацию и подробности ищите у Pollan (2018).

действующие как растяжки на войне: Hughes et al. (2016).

на главной жилке: о высоте, на которой совершается смертельный захват, и о времени, когда это происходит, см.: Hughes et al. (2011) и у Hughes (2013); об ориентировании грибом насекомых см.: Chung et al. (2017). Существует много разновидностей кордицепса (*Ophiocordyceps*) и муравьев-древоточцев, но каждая из разновидностей муравьев-древоточцев становится жертвой только одной разновидности кордицепса, и каждая разновидность гриба может контролировать только одну разновидность муравьев-древоточцев (de Bekker et al. [2014]). В своем определении места смерти различные грибо-муравьиные пары крайне разборчивы. Некоторые грибы заставляют своих насекомых-аватаров впиваться своим предсмертным укусом в сучья, другие — в кору, а третьи — в листья (Andersen et al. [2009] и Chung et al. [2017]).

над поведением муравьев: о соотношении массы гриба в биомассе муравьиного тела см.: Mangold et al. (2019); визуализацию грибницы внутри муравьиных тел см.: Fredericksen et al.

управлении поведением муравьев: гипотезу о том, что грибы манипулируют поведением муравьев при помощи определенных химических веществ, см.: Fredericksen et al. (2017); о химических соединениях, вырабатываемых кордицепсом (*Ophiocordyceps*), см.: de Bekker et al. (2014); о кордицепсе и алкалоидах спорыньи (*Ophiocordyceps* and ergot alkaloids) читайте работу Mangold et al. (2019).

сознание, которым можно было управлять: об окаменелостях листьев со шрамами от укусов муравьев см.: Hughes et al. (2011).

примерно в равной мере: цитату McKenna читайте в работе Letcher (2006), p. 258.

культурными традициями и духовными обрядами: Schultes et al. (2001), p. 9. Обширное, хотя иногда и некритичное обсуждение интоксикации в мире животных см.: Siegel (2005) и Samorini (2002).

конвульсии, спровоцированные эрготизмом: рассуждения о мухоморе красном (*Amanita muscaria*) см.: Letcher (2006), chs. 7–9. Некоторые исследователи выдвигают гипотезу о том, что обвинители во время судов над ведьмами в Салеме страдали от конвульсий, вызванных отравлением алкалоидами спорыньи (Caporael [1976] и Matossian [1982]), хотя против их доводов энергично выступили со своими контраргументами Spanos и Gottlieb (1976). Считается, что вызванные эргоцизмом видения и душевные страдания и муки, известные в Средние века и эпоху Возрождения как «огонь святого Антония», послужили источником вдохновения при изображении Ада современниками этих событий. О Босхе и его творчестве см.: Dixon (1984). Домашний скот также подвержен отравлению спорыньей. «Сонная трава», «пьяная трава» и «плевел-шатун» — все эти названия отражают воздействие алкалоидов спорыньи на крупный рогатый скот, лошадей и овец (Clay [1988]). Спорынья обладает также сильным лечебным действием и сотнями лет использовалась повитухами для остановки послеродового кровотечения. Генри Уэлком, предприниматель, на чьи пожертвования был основан Wellcome Trust, изучал сообщения о терапевтическом действии спорыньи, гриба-паразита зерновых. Он сделал запись о том, что повитухи Шотландии, Германии и Франции XVI века считали, что спорынья «обладает замечательной и несомненной действенностью» для вызывания сокращений матки и прекращения кровотечения после родов. Именно от таких травниц и повитух мужчины-врачи узнали о терапевтических свойствах спорыньи, на которых основано лечебное действие эргометрина, все еще используемое в наши дни для прекращения особенно сильных послеродовых кровотечений (Dugan [2011], pp. 20–21). Именно благодаря ее доброй славе среди гинекологов Альберт Хофман начал изучать спорынью в *Sandoz Laboratories* в 1930-х в рамках исследовательской программы, которая привела к синтезу

ЛСД в 1938 году. Рассуждения об алкалоидах спорыньи, их истории и применении см.: Wasson et al. (2009) “A Challenging Question and My Answer”.

описаний употребления грибов: информацию об истории применения псилоцибиновых грибов в Мексике см.: Letcher (2006), ch. 5; Schultes (1940); и Schultes et al. (2001), “Little Flowers of the Gods.” Цитату из труда Бернардино де Саагуна (Sahagún) см.: Schultes (1940).

украшенные перьями божества, поедающие грибы и поднимающие их вверх: Letcher (2006), стр. 76.

«...во мраке сознания гоминидов»: о рисунках Тассилин-Аджера в Сахаре, Маккенне и цитате см.: McKenna (1992), ch. 6; рассуждения о Маккенне и рисунках с Тассилин-Аджера см.: Metzner (2005), pp. 42–43; более критическое обсуждение см.: Letcher (2006), pp. 37–38.

в этом был истинным мастером: в статье, опубликованной в 2019 году, анализировались остатки вещества внутри мешочка из лисьей морды, обнаруженного среди предметов ритуального набора возрастом более тысячи лет, найденного во время раскопок в Боливии. В этих остатках ученые обнаружили следы многочисленных психоактивных соединений, включая кокаин (из листьев коки), ДМТ (диметилтриптамин), хармин и буфотенин. Анализ также показал предположительное присутствие псилоцина — психоактивного продукта распада псилоцибина, что позволило бы считать, подтвердись его наличие, что в этом ритуальном наборе были когда-то псилоцибиновые грибы (Miller et al. [2019]). Элевсинские мистерии — празднования, посвященные Деметре, богине зерна и урожая, и ее дочери Персефоне — были одной из важнейших религиозных традиций Древней Греции. Непременной частью торжеств было то, что посвященные выпивали чашу некой жидкости, известной как кикеон. Выпив кикеон, они начинали видеть призраков и впадали в состояние благоговейного трепета, экстаза и предсказывали будущее. Многие из них рассказывали о том, что эти ощущения их навсегда изменили (Wasson et al. [2009], ch. 3). Хотя рецептура и механизм кикеона хранились в строжайшей тайне, скорее всего это был воздействующий на сознание напиток — гром-

кий скандал разразился, когда стало известно, что афинские аристократы пили кикеон дома с гостями во время званых обедов (Wasson et al. [1986], p. 155). Списков приглашенных на ритуалы Элевсина не существовало, поэтому есть некоторая неопределенность относительно тех, кто на них присутствовал. Однако большинство афинян были посвящены в эти таинства, и считается, что многие важные персоны на них бывали, включая Еврипида, Софокла, Пиндара и Эсхила. Платон довольно подробно описывал посвящение в таинства в своих произведениях «Пир» и «Федр», используя термины, ясно указывающие на ритуалы Элевсина (Burkett [1987], pp. 91–93). Аристотель, не ссылаясь непосредственно на мистерии Элевсина, открыто упоминает посвящение в таинства, что, вероятно, равносильно указанию на элевсинские мистерии с учетом превосходства элевсинских ритуалов к середине IV века до н. э. Хофман, наряду с Гордоном Уоссоном и Карлом Руком выдвигал гипотезу о том, что кикеон изготавливали из спорыньи, росшей на злаках, каким-то образом очистив его, чтобы избежать ужасных симптомов, связанных со случайным отравлением (Wasson et al. [2009]). Маккенна предполагал, что жрецы в Элевсине распространяли псилоцибиновые грибы (McKenna [1992], ch. 8). Другие считали, что существовал некий препарат из опиумных маков. Есть и другие примеры использования грибов в древних религиозных обрядах. В Средней Азии возник религиозный культ, связанный с влияющим на сознание препаратом под названием «сома» (*soma*). Сомы вызывала состояние экстаза, и гимны, посвященные соме, записаны в Ригведе, древнем тексте, датируемом примерно 1500 годом до н. э. Как и в случае с кикеоном, природа и состав напитка остаются неизвестными, многие — и чаще всех Уоссон — утверждали, что его готовили из мухомора, гриба с красной шляпкой и белыми пятнами на ней (*Amanita muscaria*). Об этом см.: Letcher [2008], ch. 8). Маккенна — как и следовало ожидать — утверждал, что псилоцибиновые грибы были более вероятными кандидатами. Другие предполагали использование марихуаны и гашиша. Ни для одного из этих предположений нет неопровержимых доказательств.

умами и сознанием жертв: ссылки на придуманных монстров см.: Yong (2017). В 2018 году исследователи в японском Университете Рюкю обнаружили, что некоторые виды цикад «приручили» кордицепсы (*Ophiocordyceps*), живущие в их телах (Matsuura et al. [2018]). Как и многие другие насекомые, питающиеся в основном соком, цикады зависят в своем выживании от бактерий, находящихся с ними в симбиозе и вырабатывающих определенные необходимые для жизни витамины и питательные вещества. Но у ряда японских видов цикад этих бактерий заменили определенные виды гриба кордицепса. Это было самое невероятное из того, что могло произойти. Кордицепсы — жестокие и умелые убийцы, оттачивавшие свои способности десятками миллионов лет. И все же в течение их долгой совместной жизненной истории кордицепсы стали незаменимыми партнерами в жизни цикад. Более того, такое происходило по крайней мере трижды внутри трех родов цикад. Прирученные грибки кордицепсы служат напоминанием о том, что грань между «полезными» и «паразитирующими» микроорганизмами не всегда четкая.

секретное средство для сохранения вечной молодости: об иммуноподавляющих лекарственных препаратах читайте в State of the World's Fungi (2018), "Useful Fungi"; о панацее для сохранения вечной молодости см.: Adachi & Chiba (2007).

своими жертвами-насекомыми: Coyle et al. (2018); об «убойном» открытии читайте на сайте twitter.com/mbeisen/status/1019655132940627969 [дата обращения 29 октября 2019].

центральная нервная система остается невредимой: описание поведения зараженных мух см.: Hughes et al. (2016) и Cooley et al. (2018); о «летающих солонках смерти» ("flying saltshakers of death") см.: Yong (2018).

совершенно иной истории: об исследовании Кассона (Kasson) см.: Boyce et al. (2019), с дискуссией можно познакомиться в работе Yong (2018). Это не первое сообщение о том, что грибы — манипуляторы насекомыми могут использовать химические вещества, способные также менять человеческое сознание, для контролирования своих жертв; во время некоторых туземных церемоний в Мексике грибы, близко-

родственные кордицепсу, едят вместе с псилоцибиновыми грибами (Guzmán et al. [1998]).

Но как именно — неизвестно: катинон, в соответствии с научными изысканиями, увеличивает агрессию у муравьев и, возможно, является причиной гиперактивного поведения, наблюдаемого у инфицированных цикад (Boyce et al. [2019]). *когда охотятся на лосей:* см.: Ovid (1958), p. 186; о шаманизме среди племен Амазонии см.: Viveiros de Castro (2004); о юкагирах см.: Willerslev (2007).

«гриб, переодетый муравьем»: см.: Hughes et al. (2016). Нейромикробиология — относительно новая область, и осознание влияния кишечных микроорганизмов на поведение, восприятие и психологические состояния животных все еще остается фрагментарным (Hooks et al. [2018]). Тем не менее определенные тенденции начинают уже проявляться. Мышам, например, в первую очередь необходима здоровая кишечная микрофлора для формирования функциональной нервной системы (Bruce-Keller et al. [2018]). Если вывести из строя микробиомы молодых мышей до того, как у них успела сложиться функциональная нервная система, у них разовьются когнитивные отклонения, такие как проблемы с памятью и сложности с узнаванием предметов (de la Fuente-Nunez et al. [2017]). Наиболее впечатляющие результаты были получены во время исследования, где между видами мышей проводился взаимный обмен микробиотой. Когда разновидности «робких» мышей вводят фекальные трансплантаты «нормальных» мышей, они теряют осторожность. Аналогичным образом, если «нормальным» разновидностям мышей ввести кишечные микроорганизмы «робких» мышей, они становятся «чрезмерно осторожными и нерешительными» (Bruce-Keller et al. [2018]). Различия в кишечной микробиоте у мышей влияют на их способность забывать испытанную боль (Pennisi [2019b] и Chu et al. [2019]). Многие кишечные микробы вырабатывают химические вещества, влияющие на работу центральной нервной системы, включая нейротрансмиттеры и короткоцепочечные жирные кислоты. Более 90 % серотонина — нейротрансмиттера, обилие которого вызывает чувство радости и счастья,

а недостаток — чувство подавленности — производится в кишечнике, и кишечные микробы играют главную роль в регулировании его производства (Yano et al. 2015). В двух научно-исследовательских работах изучались результаты подсадки фекальной микробиоты страдающих депрессией пациентов здоровым мышам и крысам. У животных появились симптомы подавленности, включая и тревожность, и потерю интереса к приятным, доставляющим удовольствие занятиям. Эти работы позволяют предположить, что дисбаланс кишечной микробиоты (микрофлоры) не только может привести к депрессии, но и что один и тот же дисбаланс может служить причиной подавленного состояния как у человека, так и у мышей (Zheng et al. [2016] и Kelly et al. [2016]). Дальнейшие исследования, проводившиеся на людях, продемонстрировали, что лечение определенными пробиотиками может уменьшить симптомы депрессии, тревожность, и появление негативных мыслей (Mohajeri et al. [2018] и Valles-Colomer et al. [2019]). Тем не менее за развитием области нейромикробиологии внимательно наблюдает индустрия, вкладывающая миллиарды в производство пробиотиков, и ряд исследователей указывает на тенденцию сильного переоценивания значимости определенных научных результатов. Кишечные сообщества микроорганизмов очень сложны, и манипулировать ими — очень трудная задача. При таком количестве переменных только немногим ученым удалось выявить причинные связи между воздействием конкретных микробов и конкретным поведением (Hooks et al [2018]).

«...и рыбе в этом пруду, и...»: полное изложение понятия «расширенного фенотипа» см.: Dawkins (1982); о «строгих ограничительных требованиях» к идее расширенного фенотипа см.: Dawkins (2004); обсуждение грибной манипуляции поведением насекомых в рамках расширенного фенотипа см.: Andersen et al. (2009), Hughes (2013 и 2014) и у Cooley et al. (2018).

их просто догоняет: изложение истории «первой волны» изучения псилоцибина в 1950-х и 1960-х см.: Duke (2008) и Polan (2018), ch. 3.

истории современной медицины: об исследовании, проведенном в Университете Джона Хопкинса, см.: Griffiths et al. (2016); об исследовании, выполненном в Университете Нью-Йорка, см.: Ross et al. (2016); интервью с Рональдом Гриффитсом (Griffiths) можно найти в фильме *Fantastic Fungi: The Magic Beneath Us*, поставленном Louis Schwartzberg; общую информацию, включая и описание «терапевтического воздействия» рекордных пропорций, можно найти у Pollan (2018), ch. 1.

ясного восприятия себя: об изучении мистических ощущений, вызванных псилоцибином, см.: Griffiths et al. (2008); о роли благоговения в психотерапии с применением психоделиков см.: Hendricks (2018).

единения с природой: о роли псилоцибина в лечении табакозависимости см.: Johnson et al. (2014 и 2015); о чувстве «открытости» и удовлетворения жизнью см.: MacLean et al. (2011); общую информацию о роли психоделиков в лечении зависимости см.: Pollan (2018), ch. 6, pt 2; об ощущении единения с природой см.: Lyons and Carhart-Harris (2018) и Studerus et al. (2011). В сообществах коренных американцев (американских индейцев) существует давняя традиция использования психоделического кактуса пейотля для лечения от алкоголизма. В период с 1950-х по 1970-е годы в ряде исследований рассматривалась возможность использования псилоцибина и ЛСД для лечения от наркотической зависимости. В нескольких были получены положительные результаты. В 2012 году мета-анализ свел воедино данные самых строго контролируемых испытаний. Он показал, что лишь одна доза ЛСД оказывала благотворное действие при лечении алкоголизма, которое продолжалось до полугода (Krebs and Johansen [2012]). В интернет-опросе, созданном для изучения «естественной экологии» данного явления, Мэтью Джонсон (Matthew Johnson) и его коллеги проанализировали опросники более 300 человек, которые сообщали о сокращении тяги к курению или полном отказе от него после единичного приема псилоцибина или ЛСД (Johnson et al. [2017]).

религиозных верований — существует: о том, что многие «начинали завзятыми материалистами или атеистами», см.: Pollan (2018), ch. 4; о нематериальной реальности как

- основе религиозной веры см.: Pollan (2018), ch. 2. Даже наблюдатели, которые руководят проведением сессий и наблюдением за ними, в Университете Джонса Хопкинса сообщали о неожиданных изменениях в своем мироощущении: «Я начинал атеистом, не веря, но во время работы я начал каждый день замечать вещи, которые противоречили моему неверию. Мир мой становился все более таинственным по мере того, как продолжались сессии, на которых я присутствовал вместе с принимавшими псилоцибин» (Pollan [2018], ch. 1).
- и структуру нейронов:* о влиянии психоделиков на рост и архитектуру нейронов читайте работу Ly et al. (2018).
- неконтролируемым потокам в мозге:* о псилоцибине и сети пассивного режима работы мозга (СПРРМ) см.: Carhart-Harris et al. (2012) и Petri et al. (2012); о воздействии ЛСД на коннективность мозга см.: Carhart-Harris et al. (2016b).
- изменение симптомов:* высказывание Абрама Хоффера (Hoffer) можно найти у Pollan (2018), ch. 3.
- новые возможности для познания:* высказывание Джонсона см.: Pollan (2018), ch. 6; о роли псилоцибина в лечении «жесткого, негибкого пессимизма» депрессии см.: Carhart-Harris et al. (2012).
- своей взаимосвязи с миром:* о растворении собственного «эго» и «слиянии» см.: Pollan (2018), prologue and ch. 5.
- людям и грибам по отдельности:* о «прохладной ночи нашего сознания» и «причудливости возможностей» см.: McKenna and McKenna (1976), pp. 8–9.
- целый континент возможных мнений:* цитату Уайтхеда (Whitehead) см.: Russel (1956), p. 39; о «четко организованных», «не выходящих за строго определенные ограничения» рассуждениях см.: Dawkins (2004).
- не так уж и долго:* определить точно, когда первые грибы стали «магическими, волшебными», нелегко. Самым простым было бы предположить, что способность вырабатывать псилоцибин появилась у самого последнего (недавнего) общего предка всех вырабатывающих псилоцибин грибов. Однако использовать этот подход нельзя, потому что: 1) способность создавать псилоцибин передавалась по горизонтали между

грибными родами (Reynolds et al. [2018]), и 2) биосинтез псилоцибина в процессе эволюции появлялся не один раз (Awan et al. [2018]). Джейсон Слот (Jason Slot), исследователь Университета штата Огайо, указал, что примерно 75 миллионов лет назад, в соответствии с одной из гипотез, гены, необходимые для выработки псилоцибина, сгруппировались впервые в предке грибных родов огневке (*Gymnopilus*) и псилоцибе (*Psilocybe*). Слот считает, что именно так и произошло, потому что в других случаях, как было доказано, «псилоцибиновые» гены образовывали кластер в результате горизонтального переноса генов.

свойство очень быстро бы исчезло: о горизонтальном переносе кластеров псилоцибиновых генов см.: Reynolds et al. (2018); о неоднократном возникновении биосинтеза псилоцибина см.: Awan et al. (2018).

что также усложняет дело: некоторые взаимоотношения насекомых и грибов включают и более неоднозначные манипуляции. Например, «грибы-кукушки», которые извлекают для себя пользу из социального поведения термитов, создавая шарики-споры, похожие на яйца термитов, и феромон, содержащийся в настоящих термитных яйцах. Термиты переносят ложные яйца в свои гнезда и ухаживают там за ними. Когда из грибных «яиц» никто не вылушивается, термиты выбрасывают их на кучи отходов в термитнике. Окруженные богатым питательными веществами, компостом, «грибы-кукушки» быстро прорастают и могут спокойно жить вдали от конкуренции с другими грибами (Matsuura et al. [2009]).

в пользу гриба: о муравьях-листорезах, собирающих псилоцибиновые грибы, см.: Masiulionis et al. (2013); о комарах и других насекомых, поедающих псилоцибиновые грибы, и о гипотезе псилоцибинового «соблазна» см.: Awan et al. (2018). Чистый кристаллический псилоцибин очень дорог, к тому же строгие ограничения усложняют проведение исследований. Существуют данные о том, что псилоцибин оказывает тормозящее действие на поведение насекомых и других беспозвоночных. В широко известной серии экспериментов, проведенных в 1960-е годы, ученые-исследователи вводили паукам ряд наркотических средств, чтобы

изучить их влияние на плетение пауками паутин. Пауки, которым давали высокие дозы псилоцибина, вообще прекратили плетение паутин. Пауки, получившие меньшие дозы, плели очень рыхлые паутины, ведя себя так, «словно они были тяжелее». Воздействие ЛСД, напротив, привело к плетению пауками «необыкновенно ровных и правильных паутин» (Witt [1971]). Не так давно проведенные исследования показали, что фруктовые мушки, получившие метитепин, химическое вещество, блокирующее серотониновые рецепторы, которые псилоцибин, наоборот, стимулирует, теряли аппетит. Некоторые исследователи исходя из этих результатов, предположили, что псилоцибин, возможно, аппетит мушек улучшает — вероятно чтобы они разносили грибные споры (Awan et al. [2018]). Майкл Бьюг (Michael Veug), биохимик и миколог в Колледже Вечнозеленого штата, входит в число исследователей, выступающих против гипотезы псилоцибина как отталкивающего, отпугивающего агента. То, что мы привыкли называть грибом, — это плод. Так же как яблоня делает яблоки броскими и заметными, чтобы способствовать распространению своих семян, грибы создают плодовые тела, чтобы содействовать распространению своих спор. Псилоцибин, как указывает Бьюг, в высокой концентрации содержится в вегетативных телах псилоцибиновых грибных видов. В мицелии же большинства производящих псилоцибин грибов концентрации псилоцибина ничтожны (правда, не у всех: в мицелии *Psilocybe caerulescens*, или оползневого гриба, и *Psilocybe semperviva*, или псилоцибе бессмертной, как сообщают, содержится значительная концентрация псилоцибина). И все же именно мицелий, а не плодовые тела гриба, больше всего нуждается в защите. Так зачем бы грибам так стараться защитить свои плоды, оставляя при этом мицелий без защиты (Pollan [2018], ch. 2)?

взаимоотношений человека и грибов: известно, что другие млекопитающие также едят некоторые виды псилоцибиновых грибов без какого-либо вреда для здоровья. Бьюг, биохимик и миколог, отвечающий за работу с сообщениями об отравлении, отправляемыми в Североамериканскую ассоциацию

- микологов, получил множество таких отчетов. «Когда дело касается коров или лошадей, отравления могут быть, а могут и не быть случайными», — сказал мне Бьюг. В некоторых случаях, однако, животные, кажется, отыскивают грибы сами. «Некоторые собаки видят, как их хозяева собирают псилоцибиновые грибы, заинтересовываются этим и потом сами находят и едят эти грибы снова и снова. На них эти грибы оказывают действие, часто наблюдаемое у человека». Лишь один раз он разбирался с отчетами о кошке, постоянно евшей псилоцибиновые грибы и, казалось, совершенно «помешавшейся на грибах».
- «красочным и ярким видениям»*: Schultes (1940).
- «...наросты, вызывающие видения»*: о статье Wasson в журнале *Life* и ее популярности см.: Pollan (2018), ch.2, и у Davis (1996), ch. 4.
- «добавить было нечего»*: цитату «ходил по пятам за нашей матерью» можно найти у Dennis McKenna (2012). Вероятно, первый отчет «о путешествии в мир грез» в печатном органе с широким охватом аудитории был написан журналистом Сидни Кацом (Sidney Katz), который опубликовал статью, озаглавленную «Мои 12 часов сумасшествия», в популярном канадском журнале *Maclean's*. Изложение см.: Pollan (2018), ch. 3.
- «...этих странных глубинных сфер»*: о путешествии Тимоти Лири (Leary) «в мир фантастических грез» и Гарвардском псилоцибиновом проекте см.: Letcher (2006), pp. 198–201, и Pollan (2018), ch. 3. Цитату Leary можно найти у Leary (2005).
- или вынуждены были перейти на нелегальное положение*: Letcher (2006), p. 201 pp. 254–55; Pollan (2018), ch. 3.
- «...в алхимическом золоте»*: о растущем интересе к волшебным грибам см.: Letcher (2006), “Underground, Overground”; о развитии технологий выращивания грибов см.: Letcher (2006), “Muck and Brass”; руководство по выращиванию грибов см.: McKenna and McKenna (1976).
- оттенком действия*: работу *The Mushroom Cultivator* и описание сцен, происходивших в Нидерландах и Великобритании в связи с торговлей магическими грибами, см.: Letcher (2006), “Muck and Brass.”

неподходящий климат умеренных широт: на пастбищах Центральной Америки грибы прекрасно растут, и ничто не указывает на то, что их активно выращивали.

«...судах и тюрьмах штатов»: о содержащих псилоцибин лишайниках см.: Schmull et al. (2014); о распространении псилоцибиновых грибов в мире см.: Stamets (1996 and 2005); цитату «встречаются в изобилии» можно найти в работе Allen and Arthur (2005); об открытии псилоцибиновых грибов по всему миру см.: Letcher (2006), pp. 221–225; о “парках, жилых кварталах” см.: Stamets (2005).

«...как и сами грибы»: Schultes et al. (2001), p. 23.

сделал вывод Джеймс: см.: James (2002), p. 300.

Глава 5. ЧТО БЫЛО ДО КОРНЕЙ

как выглядит небо, опиши мне: Tom Waits/Kathleen Brennan, “Green Grass” (в 16-м студийном альбоме *Real Gone* (2004) Tom Waits).

почти всех земных организмов: об эволюции земных растений см.: Lutzoni et al. (2018), Delwiche and Cooper (2015), Pirozynski and Malloch (1975); о биомассе растений см.: Var-On et al. (2018).

благодействовали моллюски: о ранних биокоростах см.: Beerling (2019), p. 15, Wellman and Strother (2015); о жизни в ордовике см.: [web.archive.org/web/20071221094614/ http://www.palaeos.com/Paleozoic/Ordovician/Ordovician.htm#Life](http://web.archive.org/web/20071221094614/http://www.palaeos.com/Paleozoic/Ordovician/Ordovician.htm#Life) [дата обращения 29 октября 2019].

переход к жизни на суше: о стимулах, появившихся у предков растений, для перехода к жизни на суше см.: Beerling (2019), p. 155. Неудивительно, возможно, что по этому вопросу не всегда существовало единое мнение. Впервые эта идея была предложена Крисом Пирозински (Kris Pirozynski) и Давидом Маллохом (David Malloch) в их работе 1975 года «Происхождение земных растений: вопрос микотропизма» (*The origin of land plants: a matter of mycotropism*). В ней они утверждали, что «растения суши всегда зависели (от грибов), потому что иначе они никогда не смогли бы колонизировать Землю». В то время эта мысль была радикальной: ученые постули-

ровали, что симбиоз был одной из основных движущих сил в одном из наиглавнейших этапов эволюционного развития в истории жизни. Линн Маргулис увлеклась этой идеей и описала симбиоз как процесс, в котором «Луна подняла приливную волну жизни из ее океанских глубин на сушу и в воздух» (Beerling [2019], pp. 126–127). О грибах и их роли в эволюции земных растений читайте работу Lutzoni et al. (2018), Hoysted et al. (2018), Selosse et al. (2015) и Strullu-Derrien et al. (2018).

не можем себе позволить придерживаться такого отношения: о соотношении видов растений, образующих микоризные связи, к остальным видам см.: Brundrent & Tedersoo (2018). 7 % земных растений, не образующих микоризных ассоциаций, выработали альтернативные стратегии, такие как паразитизм или хищничество. Эти цифры могут быть даже меньше 7 %: недавние исследования показали, что растения, традиционно считавшиеся «немикоризными» — такие, например, как относящиеся к семейству капустных, — образуют отношения с немикоризными грибами, которые приносят им такую же пользу, как и микоризные грибы (van der Heijden et al. [2017], Cosme et al. [2018] и Hiruma et al. [2018]).

эволюционным рефреном: о грибах в морских водорослях — микофикобиозе — см.: Selosse and Tacon (1998); о «мягких зеленых шарах» см.: Nom and Murray (2014).

восхищалась Филд: группа существующих сегодня растений, называемая «печеночники, или печеночные мхи», считается самым первым отклонившимся в своем эволюционном развитии родом растений суши, и, возможно, их история протянулась более чем на 400 миллионов лет. Печеночники родов «треубиа» (*Treubia*) и «гапломитриум» (*Haplomitrium*) лучше всего позволяют нам заглянуть в самые ранние этапы жизни растений (Beerling [2019], p. 25). Помимо окаменелостей существуют и другие свидетельства. Генетический аппарат, отвечающий за сигнальные химические соединения, используемые растениями для передачи информации микоризным грибам, идентичен во всех ныне живущих группах растений, что говорит о наличии его у общего предка всех растений (Wang et al. [2010], Bonfante and Selosse [2010] и Delaux et

al. [2015]). Дожившие до наших дней предки самых первых сухопутных растений — печеночные мхи — устанавливают отношения с самыми древними родами микоризных грибов (Pressel et al. [2010]). Более того, самые последние временные оценки предполагают, что грибы перебрались на сушу раньше, чем предки современных земных растений. Это указывает на то, что самые первые растения не могли не столкнуться с грибами. Маловероятно, что они не встретились (Lutzoni et al. [2018]).

вслед за грибами (mykes): об эволюции корней см.: Brundrett (2002) и Brundrett and Tedersoо (2018).

«*У них есть грибы-корни — мико-ризы*»: об эволюции более тонких и легче приспособляющихся корней см.: Ma et al. (2018). Диаметр тонких корешков варьируется, но обычно он от 100 до 500 микрон. У одного из самых древних родов микоризных грибов — арбускулярных — диаметр транспортных гиф составляет около 20–30 микрон, а диаметр их тонких поглощающих, абсорбционных, гиф — только от 2 до 7 микрон (Leake et al. [2004]).

эти цифры сильно приуменьшены: данные об отношении мицелия ко всей биомассе почвы (от трети до половины) см.: Johnson et al. (2013); о приблизительных измерениях длины грибной микоризы в верхнем 10-сантиметровом слое почвы см.: Leake and Read (2017). Эти измерения основаны на данных о длине микоризного мицелия, обнаруженного в различных экосистемах, и учитывают тип микоризы и тип землепользования (Leake et al. [2004]).

«*дереву полный комплекс питательных веществ из почвы*»: о работе Франка (Frank) с микоризными грибами см.: Frank (2005); обсуждение работы Франка см.: Тарре (2005).

выращиваемые в стерильных условиях: описание экспериментов Франка см.: Beerling (2019), p.129. Одним из самых энергичных критиков Франка был ботаник, а позднее и декан юридического факультета Гарварда Роско Паунд, который отвергал предположения Франка как «решительно сомнительные». Паунд принял сторону более «трезвых» авторов, которые настаивали на том, что микоризные грибы, «вероятно, наносили вред, забирая питательные вещества, которые должны были

по праву достаться деревьям». «Во всех случаях, — громогласно заявлял Паунд, — от симбиоза выигрывает только одна сторона, и мы не можем с уверенностью утверждать, что другая сторона не оказалась бы в почти таком же выигрышном положении, будучи предоставлена самой себе» (Sapp [2004]). «*Властелин Колец*»: Tolkien (2014), “For you little gardener”, («Для вас, маленький садовод») vol. II, “Farewell to Lórien” («Прощание с Лоризном»); “Sam Gamgee planted” vol. III, “The Grey Havens” («Серебристая гавань»).

считают, что это вполне вероятно: о быстрой эволюции в девонский период см.: Beerling (2019), pp. 152 and 155; о резком снижении двуокиси углерода (углекислого газа) см.: Johnson et al. (2013) и Mills et al. (2017). Существуют другие гипотезы касательно причин, спровоцировавших резкое снижение концентрации углекислого газа в атмосфере. Например, углекислый газ и другие газы, способствующие возникновению парникового эффекта, выбрасываются в атмосферу при извержении вулканов и другой тектонической активности. Если бы уровни углекислого и других парниковых газов, выбрасываемых в атмосферу извергающимися вулканами, упали, то и содержание их в атмосфере непременно бы сильно снизилось, и это, возможно, послужило бы причиной начала периода глобального охлаждения (McKenzie et al. [2016]).

и климатические условия начнут меняться: о том, как микориза способствовала растительному буму в девонский период, см.: Beerling (2019), p. 162; о погодных условиях в свете микоризной активности см.: Taylor et al. (2009).

состава атмосферы: Миллз использовал модель *COPSE* (*Carbon, Oxygen, Phosphorus, Sulphur, and Evolution* — углерод (C), кислород (O), фосфор (P), сера (S) и эволюция (E)), которая изучает циклы всех этих элементов за долгие периоды эволюции в отношении к «упрощенному представлению земной биоты, атмосферы, океанов и отложений» (Mills et al. [2017]). «...части жизни на Земле»: Миллс et al. (2017); об экспериментах Филд по микоризным реакциям на древние климатические условия см.: Field et al. (2012).

на выигрышную стратегию: общие сведения о микоризной эволюции см.: Brundrett and Tedersoo (2018). Считается, что груп-

па грибов, которые помогли растениям перебраться на сушу и которые прекрасно растут на пастбищах, в саваннах и тропических лесах — арбускулярные микоризные грибы, — появилась в результате эволюции лишь однажды. Арбускулярные микоризные грибы — это грибы, которые образуют перистые доли (арбускулы) внутри растительных клеток. Тип, преобладающий в лесах зон умеренного климата — эктомикоризные грибы, — возникали по крайней мере более 60 раз независимо друг от друга (Hibbett et al. [2000]). Эти грибы — в число которых входят и трюфели — сплетаются в мицелиевые рукава вокруг кончиков корней растений, как заметил Франк в конце XIX века. У орхидей сложился свой тип микоризных отношений, с его собственной эволюционной историей. То же можно сказать и о семействе эриковых, или вересковых (Martin et al. [2017]). Филд и ее коллеги изучают совсем иную группу микоризных грибов, которую открыли только в конце первого десятилетия 2000-х и назвали мукоромикотой (*Micoromycotina*). Она встречается повсюду в растительном царстве и считается ровесницей самых ранних растений, но, несмотря на десятилетия исследований, ее совершенно не замечали. Возможно, на виду прячутся еще очень многие организмы (van der Heijden et al. [2017], Cosme et al. [2018], Hiruma et al. [2018] и Selosse et al. [2018]).

более приятный вид, чем другие: об экспериментах с клубникой см.: Orrell (2018); о дальнейших изысканиях о влиянии микоризных грибов на отношения между растением и опылителем см.: Davis et al. (2019).

Я часто задаю себе этот вопрос: о базилике см.: Copetta et al. (2006); о томатах см.: Copetta et al. (2011) и Roupael et al. (2015); о мяте см.: Gupta et al. (2002); о салате см.: Baslam et al. (2011); об артишоках см.: Ceccarelli et al. (2010); о зверобое и эхинацее см.: Roupael et al. (2015); о хлебе см.: Torri et al. (2013).

растениями и микоризными грибами: Rayner (1945).

впутанными в шквал жестких взаимоотношений: о «социальных функциях интеллекта» см.: Humphrey (1976).

исключительно для своей пользы: о «взаимных выгодах» см.: Kiers et al. (2011). Кирс и ее коллеги смогли добиться та-

кой точности, потому что она использовала искусственную систему. Растения не были обычными растениями, а «корневыми культурами» — отделенными от самих растений корнями, растущими без побегов и листьев. Тем не менее способность растений и грибов отдавать предпочтение некоторым партнерам в снабжении их питательными веществами или углеродом была продемонстрирована на полноценных растениях, растущих в почве (Bever et al. [2009], Fellbaum et al. [2014] и Zheng et al. [2015]). Как именно растениям и грибам удается регулировать эти потоки, точно неизвестно, но эта способность кажется обычной характеристикой их взаимоотношений (Werner and Kiers [2015]).

чем-то между ними: не все виды растений и грибов способны контролировать обмен веществами в такой же степени. Некоторые виды растений наследуют способность выбирать партнеров, которых они снабжают углеродом лучше других. У некоторых видов растений просто отсутствует эта способность (Grman [2012]). Некоторые растения больше зависят от своих партнеров-грибов, чем другие. Другие, как те, что производят «семена-пылинки», не могут прорасти, если рядом нет гриба. Многим растениям присутствие гриба не нужно. Некоторые растения ничего не дают грибам в качестве компенсации, пока не вырастут, и тогда они начинают вознаграждать грибы. Такой образ жизни Филд называет «брать сейчас и платить потом» (Field et al. [2015]).

спроса и предложения: исследование неравномерного распределения ресурсов см.: Whiteside et al. (2019).

больше углерода в ответ: Кирс и ее коллеги измерили скорость переноса веществ по сети, наблюдая, как максимальную скорость в более чем 50 микрон в секунду, что примерно в 100 раз превышает пассивную диффузию, так и регулярные изменения, или колебания, в направлении потока в сети (Whiteside et al. [2019]).

результаты разные: о роли условий окружающей среды в развитии микоризных отношений см.: Hoeksema et al. (2010) и Alzarhani et al. (2019); о влиянии фосфора на «разборчивость» растений см.: Ji and Bever (2016). Даже внутри видов

растений и грибов существует большое разнообразие типов поведения (Mateus et al. [2019]).

от очень большого к очень маленькому и обратно: примерная оценка количества деревьев на Земле приведена в работе Crowther et al. (2015).

чем они действительно занимаются: о пробелах в данных в исследовании микоризы см.: Lekberg and Helgason (2018).

смешанное чувство волнения и отчаяния: об обмене веществами между растениями и грибами и о том, как он контролируется, см.: Wipf et al. (2019). В одном из исследований один гриб, который одновременно установил связи с двумя видами растений — льном и сорго, — поставлял больше нутриентов льну, хотя больше углерода получал от сорго. Основываясь на анализе эффективности затрат, можно было бы ожидать, что гриб будет поставлять больше питательных веществ сорго, а не льну (Walder et al. [2012] и Hortal et al. [2017]). Некоторые виды растений доходят до еще большей крайности и вообще не снабжают своих микоризных партнеров углеродом. В таких ситуациях кажется, что обмен между партнерами не основывается на принципе взаимовыгодного обмена «услуга за услугу». Конечно, могут существовать и многие другие виды затрат и вознаграждений, которые пока не берутся в расчет. Но измерять сразу столько переменных величин очень сложно. По этой причине большинство исследований сосредотачиваются на малом количестве параметров, которыми легко манипулировать, таких как углерод и фосфор. Это позволяет получить точные результаты, но усложняет переход к сложным условиям реальных природных сценариев и перенос на них полученных изысканий (Walder and van der Heijden [2015] и van der Heijden and Walder [2016]).

10 метров в год: о влиянии микоризных грибов на динамику роста лесов в континентальном масштабе см.: Phillips et al. (2013), Bennett et al. (2017), Averill et al. (2018), Zhu et al. (2018), Steidinger et al. (2019) и Chen et al. (2019); о миграции деревьев после таяния Лаврентийского ледяного щита см.: Pither et al. (2018).

оказывается в каком-то новом месте: об исследованиях, проведенных в Университете Британской Колумбии, см.: Pither

et al. (2018) и комментарии Zobel (2018); об изучении наступления растений на пустоши, осуществленном при помощи микоризных грибов, см.: Collier and Bidartondo (2009); о совместной миграции растений и их микоризных партнеров см.: Peay (2016).

в соленых почвах морского побережья: Rodriguez et al. (2009). *один вид пальмы разделился на два:* Osborne et al. (2018), с комментариями Geml and Wagner (2018).

за пределы своих прежних границ: об инволюции см.: Hustak and Myers (2012).

так, как в сельском хозяйстве: о роли отношений между грибами и растениями в адаптации к климатическим изменениям см.: Pickles et al. (2012), Giauque and Hawkes (2013), Kivlin et al. (2013), Mohan et al. (2014), Fernandez et al. (2017) и Terrer et al. (2016); о «пугающем ухудшении здоровья» см.: Sapsford et al. (2017) и van der Linde et al. (2018). Микоризные отношения способны формировать наземный мир несколькими способами, например посредством их влияния на циклы нутриентов в почве. Можно воспринимать циклы питательных веществ в почве (почвенных нутриентов) как химические метеорологические системы. Химический «климат», установленный различными типами грибов, помогает определить, где растут конкретные типы растений. Влияние различных растений, в свою очередь, позволяет получить ответную информацию о поведении микоризных грибов. Арбускулярные микоризные грибы — древняя группа, растущая внутри клеток растений, — настраивают химические метеорологические системы совсем не так, как эктомикоризные грибы — группа грибов, появляющаяся в процессе эволюции неоднократно, чей мицелий оплетает корень растения плотным рукавом. В отличие от арбускулярных микоризных грибов эктомикоризные грибы произошли от самостоятельных разлагающих материю грибов. В результате они лучше справляются с разложением органических веществ, чем арбускулярные микоризные грибы. В масштабах экосистемы различие очень заметно. Эктомикоризные грибы процветают в более холодном климате, где разложение замедляется. Арбускулярные грибы прекрасно чувствуют себя в более те-

плом, влажном климате, где разложение происходит быстрее. Первые обычно вступают в конкуренцию с независимыми разлагающими агентами и снижают скорость циркуляции углерода. Вторые повышают активность независимых разлагающих агентов и увеличивают скорость циркуляции углерода. Первые способствуют тому, что большее количество углерода остается в верхних слоях почвы. Вторые помогают большому количеству углерода просачиваться в нижние слои почвы и оседать там (Phillips et al. [2013], Craig et al. [2018], Zhu et al. [2018] и Steidinger et al. [2019]). Микоризные отношения могут также влиять на то, как растения взаимодействуют друг с другом. В некоторых ситуациях микоризные грибы увеличивают разнообразие растительности, снижая соперничество между растениями и позволяя менее доминирующим растениям укрепить свое положение (van der Heijden et al. [2008], Bennett and Cahill [2016], Bachelot et al. [2017] и Chen et al. [2019]). В других случаях они снижают растительное разнообразие, позволяя растениям исключать конкурентов. В некоторых случаях взаимодействие растений и микоризных грибов наблюдается у нескольких поколений; это явление упоминается в англоязычной профессиональной литературе как *legacy effects* (“унаследованное поведение”) (Mueller et al. [2019]). Изучение воздействия смертоносного для сосен жука на западном побережье Северной Америки показало, что выживание сосновых саженцев зависело от того, откуда прибыло их микоризное сообщество. Если их выращивали с микоризными грибами, привезенными из мест, где взрослые сосны погибали от соснового жука, уровень гибели саженцев был выше. Микоризные сообщества позволяли смертоносному воздействию сосновых жуков обрушиваться каскадом на молодые деревья, проходя через многие поколения сосен (Karst et al. [2015]).

«...будущее человеческой цивилизации»: Howard (1945), chs. 1 and 2.

необходимость срочно принимать меры для борьбы с этим кризисом: об удвоении урожайности посевов см.: Tilman et al. (2002); о выбросах парниковых газов в результате сельскохозяйственной деятельности и прекращении увеличения

- урожайности посевов см.: Foley et al. (2005) и Godfray et al. (2010); о дисфункции при использовании фосфорного удобрения см.: Elser and Bennett (2011); о потере урожая см.: King et al. (2017); о 30 футбольных полях см.: Arsenault (2014); о перспективах глобального спроса на продукты питания см.: Tilman et al. (2011).
- здоровью растений тоже будет нанесен ущерб*: о традиционном земледелии в Китае см.: King (1911); о тревоге Говарда о «жизни в почве» см.: Howard (1940); об ущербе, наносимом сельским хозяйством сообществам почвенных микроорганизмов, см.: Wagg et al. (2014), de Vries et al. (2013) и Toju et al. (2018).
- грибного мицелия в почве*: об исследовании, опубликованном Агроскопом, см.: Banerjee et al. (2019); о влиянии распашки земель на микоризные сообщества см.: Helgason et al. (1998); о сравнении органического и неорганического сельского хозяйства на микоризные сообщества см.: Verbruggen et al. (2010), Manoharan et al. (2017) и Rillig et al. (2019).
- когда-либо живших на планете Земля*: об «инженерах экосистем» см.: Banerjee et al. (2018); о роли микоризных грибов в поддержании стабильности почвы см.: Leifheit et al. (2014), Mardhiah et al. (2016), Delavaux et al. (2017), Lehmann et al. (2017), Powell and Rilling (2018) и Chen et al. (2018); о влиянии микоризных грибов на поглощение воды в почве см.: Martínez-García et al. (2017); о запасах углерода в почве см.: Swift (2001) и Scharlemann et al. (2014); анализ почвенного углерода, находящегося в связанном состоянии в грибах, см.: Clemmensen et al. (2013) и Lehmann et al. (2017); приблизительную оценку количества организмов в почве см.: Berendsen et al. (2012); приблизительную оценку числа людей, когда либо живших на Земле, ищите на сайте www.prb.org/howmanypeoplehaveeverlivedonearth/ [дата обращения 29 октября 2019].
- могут даже ухудшить их*: о воздействии микоризных грибов на сопротивляемость растений стрессовым условиям см.: Zabinski and Bunn (2014), Delavaux et al. (2017), Brito et al. (2018), Rillig et al. (2018) и Chialva et al. (2018). Другие исследования показали, что введение эндофитовых грибов,

- живущих в побегах растений, в посевы может значительно повысить устойчивость посевов к засухам и жаре (Redman and Rodriguez [2017]).
- заметила Филд*: о непредсказуемом влиянии микоризных связей на урожайность посевов см.: Ryan and Graham (2018), Rillig et al. (2019) и Zhang et al. (2019); об исследованиях Филд на тему реакции посевов на микоризные грибы см.: Thirkell et al. (2017); об изменчивости микоризной реакции у разновидностей посевов см.: Thirkell et al. (2019).
- поврежденную кишечную флору*: об эффективности коммерческих микоризных продуктов см.: Hart et al. (2018) и Kaminsky et al. (2018). Становится все больше продуктов, использующих грибные эндофиты растений для защиты посевов. В 2019 Агентство по охране окружающей среды США одобрило использование грибного пестицида, который должен переноситься к растениям пчелами (Fritts [2019]).
- больше заботиться о потребностях растений, чем о своих собственных*: см.: Kiers and Denison (2014).
- лучше культивировать друг друга*: см.: Howard (1940), ch. 11.
- делят одну и ту же грибную сеть*: Bateson (1987), ch. 4.94; Merleau-Ponty (2002), pt. 1, “The Spatiality of One’s Own Body and Motility”.

Глава 6. «ВСЕЛЕСНАЯ ПАУТИНА»

- сетеподобное сложнопереплетенное полотно*: Humboldt (1845), vol. 1, p. 33. Цитируется по переводу на английский Анны Вестермайер (Anna Westermeier). Предложение, содержащее фразу «сетеподобное сложнопереплетенное полотно» (*Eine allgemeine Verkettung, nicht in einfacher linearer Richtung, sondern in netzartig verschlugenem Gewebe, [. . .], stellt sich allmählich dem forschenden Natursinn dar*) в британском издании 1849 года, отсутствует.
- по грибным путям*: российским ботаником был Франц Михайлович Каменский, который опубликовал свои соображения о верглянице одноцветной (*Monotropa*) в 1882 году (Тгарре [2015]); об исследовании с применением радиоактивной глюкозы см.: Björkman (1960).

и сети, и плотно в реальность: о «сетеподобном сложнопереплетенном полотне», упомянутом Гумбольдтом, см.: Wulf (2015), ch. 18.

в естественных условиях: об исследовании Рида (Read) с использованием радиоактивного углекислого газа см.: Francis and Read (1984). В 1988 году, Эдвард Ньюман (Edward I. Newman), автор классического обзора общих микоризных сетей, отмечал, что «если это явление имеет широкое распространение, оно имело бы глубокие последствия для функционирования экосистем». Ньюман выделил пять путей, которыми общие микоризные сети могли бы оказать свое влияние: 1) саженцы быстро оказываются подсоединенными к большой гифовой сети и начинают выигрывать от этого на раннем этапе; 2) одно растение может получать органические вещества (такие, как богатые энергией углеродные соединения) от другого растения через гифовые связи, возможно в достаточном количестве, чтобы ускорить рост и вероятность выжить для реципиента; 3) баланс конкурентной борьбы между растениями может измениться, если они начнут получать минеральные нутриенты из общей мицелиевой сети, а не добывать их по отдельности из почвы; 4) минеральные питательные вещества могут переходить от одного растения к другому, таким образом сокращая конкурентное доминирование одних растений над другими; и 5) питательные вещества, высвобожденные из умирающих корней, могут переходить непосредственно к живым корням по гифовым связкам, не поступая в почву (Newman [1988]).

от избытка к дефициту: Simard et al. (1997). Симард вырастила ростки трех видов деревьев в лесу Британской Колумбии. Два вида — береза бумажная и Дугласова пихта — образуют связи с одним и тем же типом микоризных грибов. Третий вид — западный красный кедр — устанавливает отношения с совершенно иным, неродственным первому, типом микоризного гриба. Это означало, что она могла быть вполне уверена, что у березы и пихты будет одна общая микоризная сеть, в то время как кедр будет просто делить корневое пространство, не имея непосредственных грибных связей (хотя такой метод не может полностью исключить наличие

каких-либо связей у растений — то, за что позднее ее исследование подвергалось критике). Внеся важное изменение в условия предыдущих исследований, проведенных Ридом, Симард подвергла пары саженцев обработке двуокисью углерода с двумя разными метками-изотопами радиоактивного углерода. Используя только один изотоп, невозможно отследить *двустороннее*, или *двунаправленное*, перемещение углерода между растениями. Можно с успехом обнаружить, что растению-реципиенту от растения-донора поступила порция углерода, помеченная изотопом. Но растение-донор могло получить точно такую же дозу углерода от растения-реципиента, а выяснить это совершенно невозможно. Подход Симард позволил ей рассчитать двунаправленное перемещение веществ по сети между растениями.

«*Вселенная паутина*»: Read (1997).

«*ресурсов внутри растительного сообщества*»: о корневых прививках см.: Bader and Leuzinger (2019); фразу “we should place” («нам следует поместить») см.: Read (1997). Корневым прививкам, или прививкам в корень, в последние несколько десятилетий уделялось сравнительно мало внимания, и все же они стали причиной ряда интересных явлений, таких как «живые пни», которые продолжают жить долгое время после того, как дерево было срублено. Корневые прививки могут встречаться в корнях одного растения, растений одного вида и даже среди отдельных представителей разных видов.

«*проникать в общественное сознание*»: Varabási (2001).

использует сетевую модель, чтобы разобраться в предмете: об исследовании всемирной паутины см.: Varabási and Albert (1999); общую информацию о достижениях сетевой науки в 1990-х годах см.: Varabási (2014); «больше общего» см.: Varabási (2001); о «космической паутине» (cosmic web) и сетевой структуре Вселенной см.: Ferreira (2019), а также Gotta (2016), ch. 9, Govoni et al. (2019) и Umehata et al. (2019), с комментариями Hamden (2019).

важную экологическую роль: резюме исследований, в которых был обнаружен биологически значимый перенос ресурсов между растениями, см.: Simard et al. (2015). Информацию о «280 килограммах» можно найти у Klein et al. (2016)

и в комментариях van der Heijden (2016). Необычным в работе Klein et al. (2016) было то, что они измерили перенос углерода между взрослыми деревьями в лесу. Деревья были приблизительно одного возраста, то есть между ними отсутствовало очевидное деление на доноров и реципиентов.

сделал бы один — «частный» — микоризный партнер: об исследованиях, в которых сообщается о незначительной или непостоянной пользе, см.: van der Heijden et al. (2009) и Booth (2004). В целом эксперименты, обнаружившие явную пользу для растений, рассматривали виды, которые устанавливали связи с группой грибов, известных как эктомикоризные. Исследования, продемонстрировавшие менее однозначные результаты, рассматривали одну из самых старых групп грибов, а именно — арбускулярные микоризные грибы.

общее корневое или воздушное пространство: о разнообразии мнений среди исследователей и различий в интерпретации данных см.: Hoeksema (2015). Частью проблемы является то, что проведение экспериментов с общими микоризными сетями сопряжено со сложностями в контролируемых лабораторных условиях, не говоря уже о природных (неокультуренных) почвах. Начать с того, что доказать, что два растения соединены с одним и тем же грибом, очень трудно. Живые системы «протекают». Существует множество возможностей для радиоактивной метки одного растения оказаться в другом. Более того, в любом эксперименте с микоризными сетями растения, соединенные с микоризными сетями, должны сравниваться с растениями, не соединенными с микоризой. Проблема в том, что сети являются стандартным режимом, режимом по умолчанию. Некоторые исследователи разрывают грибные связи между растениями, размещая барьеры из мелкочаеистой сетки между ними. Другие прорывают канавки, чтобы разделить растения, однако определить, оказывает ли такое вмешательство хоть какой-нибудь побочный урон, очень сложно.

как и ростки ели, изучаемые Симард: о многократных возникновениях микогеетеротрофии см.: Мегскх (2013). Дарвин был горячим поклонником орхидей и много времени размышлял о том, как орхидеи умудрялись выживать с таки-

ми маленькими семенами. В 1863 году в письме Иозефу Хукеру (Joseph Hooker), директору Королевских садов Кью, Дарвин писал, что хотя у него не было в распоряжении «ни одного неоспоримого факта», он был «твердо убежден», что прорастающие семена орхидей «паразитируют в юности на криптогамах (или грибах)». И только несколько десятилетий спустя было доказано, что грибы необходимы для прорастания семян орхидей (Beerling [2019], p. 141).

замечил он с нежностью: о саркодесе, или снежном цветке, см.: Muir (1912), ch. 8; про «тысячи невидимых струн» см.: Wulf (2015), ch. 23. Для Мьюра, который также написал о «бесчисленных неразрывных струнах», эта тема повторялась снова и снова. Ему также принадлежит более известная строчка: «Когда мы пытаемся выбрать что-то одно, мы обнаруживаем, что этот объект соединен со всем во Вселенной».

всегда остаются реципиентами: вектор «донор — реципиент» регулирует фотосинтез растений. Когда продукты фотосинтеза накапливаются, скорость фотосинтеза снижается. Микоризные грибные сети ускоряют фотосинтез растений, исполняя роль реципиентов углеродных соединений, таким образом предотвращая накопление продуктов фотосинтеза, что в обычной ситуации замедлило бы этот процесс (Gavito et al. [2019]).

здоровые живые растения — реципиентами: о затенении Симард саженцев ели см.: Simard et al. (1997); об умирающих растениях см.: Eason et al. (1991).

в области дефицита: об изменении направления потока углеродных соединений см.: Simard et al. (2015).

будет вскоре вырвано с корнем: обсуждение эволюционной загадки см.: Wilkinson (1998) и Gorzelak et al. (2015).

в затененном подлеске: о перераспределении избытка ресурсов как «общественного достояния» (public good) см.: Walder and van der Heijden (2015). Еще одна возможность заключается в том, что растения-реципиенты дают прибежище многочисленным и разнообразным видам грибов. Растение А может выиграть от сообщества грибов растения В, когда условия изменяются. Разнообразные грибные со-

общества служат страховкой против непостоянства и неопределенности окружающей среды (Moeller and Neubert [2016]).

путей передвижения между ними: о родственном/семейном отборе при посредничестве общих микоризных связей см.: Gorzelak (2015), Pickles et al. (2017) и Simard (2018). Ряд видов папоротника используют разновидность родственного отбора, или родительской «заботы», при помощи общих микоризных сетей, и, вероятно, делают это уже миллионы лет (Beerling [2019], pp. 138–40). У этих видов папоротников (в родах *Lycopodium*, *Huperzia*, *Psilotum*, *Botrychium*, и *Ophioglossum*) жизненный цикл разделен на две фазы. Споры прорастают и образуют так называемые гаметофиты. Гаметофиты — это маленькие подземные образования, не занимающиеся фотосинтезом. Они находятся там, где должно произойти оплодотворение. Как только оплодотворение произошло, гаметофиты переходят в наземную взрослую форму — спорофитов. Фотосинтез начинается именно в этой фазе. Гаметофиты способны выжить под землей только потому, что они снабжаются углеродом через микоризную сеть, общую со взрослыми спорофитами. Это пример отношений «берите сейчас, платите потом».

между донором и реципиентом: о двунаправленном переносе веществ см.: Lindahl et al. (2001) и Schmieder et al. (2019).

в цифровую утопию: об исследованиях, демонстрирующих преимущества участия растений в общих микоризных сетях, см.: Booth (2004), McGuire (2007), Bingham and Simard (2011) и Simard et al. (2015).

сокращается: об исследованиях, доказывающих отсутствие какого-либо преимущества от участия в общих микоризных сетях, см.: Booth (2004); об увеличении конкуренции общими микоризными сетями см.: Weremijewicz et al. (2016) и Jacobsen and Hammer (2015).

снизив скорость их роста: о «скоростных грибных трассах» и переносе ядовитых веществ по грибным сетям см.: Barto et al. (2011 and 2012), а также Achatz and Rillig (2014).

почти не изучены: о гормонах см.: Pozo et al. (2015); о транспортировке ядер по микоризным грибным сетям см.:

Giovannetti et al. (2004 and 2006); о переносе РНК между паразитирующим растением и его хозяином читайте работу Kim et al. (2014); об осуществляемом посредством РНК взаимодействии растений и грибных патогенов см.: Cai et al. (2018).

а другие — за их потребление: об использовании бактериями грибных сетей читайте Otto et al. (2017), Berthold et al. (2016) и Zhang et al. (2018); о влиянии «эндогифовых» бактерий на метаболизм грибов см.: Vannini et al. (2016), Bonfante and Desirò (2017) и Deveau et al. (2018); о разведении бактерий в толстоногом сморчке см.: Pion et al. (2013) и Lohberger et al. (2019).

и их союзницами осами: Babikova et al. (2013).

размышлял Джонсон: о передающейся от томатного растения к томатному растению информации см.: Song and Zeng (2010); о сигналах о стрессе, идущих от ростков Дугласовых пихт к росткам сосны, см.: Song et al. (2015a); о переносе веществ между ростками Дугласовой пихты и сосны см.: Song et al. (2015b).

«как он в действительности посылается»: об электросигнализации у растений см.: Mousavi et al. (2013), Toyota et al. (2018) и комментарии Muday and Brown-Harding (2018); об электрической реакции растений на растительность см.: Salvador-Recatalà et al. (2014). Остается много вопросов о химическом общении, которое происходит между корнями растений и грибами, в первую очередь позволяя им завязать отношения друг с другом. Рид однажды попытался вырастить микогетеротрофа, тот самый «пылающий огненный столб» по Мьюиру, и добился кое-какого успеха, прежде чем наткнуться на «каменную стену». «Было увлекательно, — вспоминал Рид, — грибница росла в сторону семени, проявляя огромный интерес и волнение — она вся распушилась и сказала “привет!”. Совершенно очевидно, что происходит обмен сигналами. Грустно то, что у нас никогда не было достаточно больших растений, чтобы позволить процессу развиваться. Вопросы о сигналах останутся вопросами, с которыми придется разбираться уже следующему поколению исследователей».

связаны между собой: Veiler et al. (2009 and 2015). В других работах рассматривалась архитектура общих микоризных сетей, на базе которых происходит взаимодействие видов, однако в них не было четкого описания расположения деревьев внутри экосистемы. Среди этих работ исследования, проведенные Southworth et al. (2005), Toju et al. (2014 and 2016) и Toju and Sato (2018).

это вызовет серьезные нарушения: если произвольно провести линии между деревьями на экспериментальном участке леса Бейлера, то каждое дерево окажется связанным примерно таким же числом линий, что и другие. Деревья, соединенные с другими исключительно многочисленными связями или чрезвычайно малым их числом, будут попадаться крайне редко. Можно было бы подсчитать среднее количество связей для одного дерева, и связи большинства деревьев попали бы в это среднее число. Используя сетевую лексику, эта характерная узловая точка представляла бы собой «масштаб» сети. В действительности мы наблюдаем нечто иное. На экспериментальных ли лесных участках Бейлера, или карте всемирной паутины Барабаши, или в сетке авиамаршрутов, всего несколько узлов с очень большим количеством связей охватывают подавляющее большинство соединений в сети. Узловые точки в такого рода сетях настолько сильно отличаются друг от друга, что не существует такого понятия, как характерная узловая точка, или типичный узел. У сетей отсутствует масштаб, и их описывают как «безмасштабные». Открытие Барабаши в конце 1990-х безмасштабных сетей позволило создать схему для моделирования поведения сложных систем. О различии между узлами с большим числом и малым числом связей см.: Barabási (2014), “The Sixth Link: The 80/20 Rule”; об уязвимости безмасштабных сетей см.: Albert et al. (2000) и Barabási (2001); о безмасштабных сетях в природе см.: Vascompte (2009).

целым рядом видов грибов: о различных типах общих микоризных сетей и контрастах их построения см.: Simard et al. (2012); о слиянии и объединении между различными арбускулярными микоризными сетями см.: Giovannetti et al. (2015). Только потому, что два дерева соединены, нель-

зя считать, что они соединены одинаково. Некоторые виды ольхи, например, устанавливают связи с очень немногочисленными видами грибов, которые, в свою очередь, обычно не завязывают отношений с другими растениями, кроме ольхи. Это значит, что ольховые деревья имеют тенденцию к изоляции и образуют между собой закрытые, обращенные внутрь себя сети. В плане общей архитектуры изолированного участка леса ольховая роща могла бы рассматриваться как модуль — с обильными внутренними связями, но лишь незначительным числом «каналов», соединяющих с другими модулями (Kennedy et al. [2015]). Эта идея вполне привычна для нас. Нарисуйте на бумаге сеть своих знакомств. Затем представьте, что каждая связующая линия означает отношения. Сколько из ваших отношений или связей равнозначны? Чем вы расплачиваетесь, когда ставите отношения с сестрой, троюродным кузеном, приятелем с работы и хозяином квартиры, которую вы снимаете, на один уровень в системе вашего социального общения? Ученые, занимающиеся сетевыми системами, Николас Христакис и Джеймс Фаулер описывают степень влияния каждой конкретной связи в социальной сети в плане ее «распространения/заразности». Вас могут связывать социальные отношения и с сестрой, и с квартирным хозяином, но степень влияния, «заразности», каждой из этих связей будет отличаться. Христакис и Фаулер создали теорию о трех степенях влияния, чтобы описать, как снижается социальное воздействие после трех степеней разделения (Christakis and Fowler [2009], ch. 1).

непрерывающемся мерцающем и трепещущем круговом движении: Prigogine and Stengers (1984), ch. 1.

а также чихание и оргазмы: об экосистемах как сложных адаптивных системах читайте работу Levin (2005); о динамическом нелинейном поведении экосистем см.: Hastings et al. (2018).

«кто с кем связан»: о параллелях, проведенных Симард между общими микоризными и нейронными сетями, см.: Simard (2018). Исследователи в других областях разделяют это мнение. Manicka и Levin (2019) утверждают, что методы и техники, до сих пор используемые только для изучения рабо-

ты головного мозга, следует распространить и на изучение других биологических арен, чтобы преодолеть проблему «тематических бункеров», которые разделяют области биологических изысканий. В неврологии термин «коннектом» обозначает карту нейронных связей. Возможно ли было бы начертить карту микоризного коннектома экосистемы? «Если бы у меня не было ограничений в финансировании, — сказал мне Бейлер, — я бы весь лес к бесу разобрал на образцы. Тогда можно было бы получить очень точную картину сети — кто конкретно связан с кем и где, — а также широкомасштабную картину системы в целом». О примере исследования в неврологии, использующем аналогичный подход, см.: Markram et al. (2015).

к грибам и обратно по этим узлам: Simard (2018).

взаимодействуем с растениями: «У многих грибов довольно свободные отношения с корнями растений, — объяснял мне Селосс. — Возьмите, к примеру, трюфели. Конечно, трюфельный мицелий можно обнаружить растущим на корнях их официальных деревьев-хозяев. Но его можно также найти и в корнях окружающих растений, не являющихся их обычными “хозяевами” и вообще, как правило, не вступающих в микоризные отношения. Такие случайные связи не являются, строго говоря, микоризными, но тем не менее они существуют». Больше информации о немикоризных грибах, соединяющих различные растения, см.: Toju and Sato (2018).

Глава 7. РАДИКАЛЬНАЯ МИКОЛОГИЯ

нам...в нем жить: Le Guin (2017).

загрязняющим веществом, вызывающим изменение климата:

многие из этих ранних растений — классифицируемых как ликофиты и птеридофиты — производили относительно мало «настоящей» древесины и, как считается, состояли большей частью из подобного коре материала, перидермы (Nelsen et al. [2016]).

гигатонн углерода: о трех триллионах деревьев см.: Crowther et al. (2015). Самые точные оценки глобального распреде-

ления биомассы на сегодняшний день отводят растениям примерно 80 % всей биомассы на планете. Около 70 % этой доли растений приходится на древесные стебли и стволы, то есть древесина составляет около 60 % биомассы Земли (Bar-On et al. [2018]).

матрицу молекулярных колец: о составе древесины и относительном обилии лигнина и целлюлозы см.: Moore (2013a), ch. 1.

к эмиссии в атмосферу около 10 гигатонн углерода: введение в разложение древесины и ферментное сжигание см.: Moore et al. (2011), ch. 10.7 и Watkinson et al. (2015), ch. 5; о 85 гигатоннах см.: Hawksworth (2009); о глобальных запасах углерода на 2018 год см.: Quéré et al. (2018). Другую значительную группу разлагающих древесину грибов составляют грибы, вызывающие бурую древесную гниль. Такие грибы главным образом поглощают целлюлозную составляющую древесины. Но они также способны использовать химические радикалы для ускорения расщепления лигнина. Их методы несколько отличаются от тех, что применяют грибы, вызывающие белую гниль. Вместо использования свободных радикалов для расщепления молекулы лигнина они производят радикалы, которые вступают в реакцию с лигнином и делают его уязвимым для разложения бактериями (Tornberg and Olsson [2002]).

чтобы усовершенствовать свою технику разложения материи: как столько дерева оставалось неразложившимся в течение такого длительного периода времени, по-прежнему является предметом серьезных обсуждений. В статье, опубликованной в журнале *Science* в 2012 году, группа исследователей во главе с Дэвидом Гиббертом отстаивала мнение, что появление пероксидазы лигнина в процессе эволюции грибов, вызывающих белую гниль, примерно совпало с «резким снижением» отложений углерода в конце каменноугольного периода. Они выдвигали предположение, что отложения углерода накапливались, потому что грибы еще не выработали способности расщеплять лигнин (Floudas et al. [2012], с комментариями Hittinger [2012]). Это изыскание подтверждало гипотезу, впервые выдвинутую Jennifer Robin-

son (1990). В 2016 году Matthew Nelsen et al. опубликовал статью, опровергающую эту гипотезу на основании следующих аргументов: 1) многие растения, образывавшие отложения каменноугольного периода и ставшие причиной большого количества углеродных захоронений, не являлись основными производителями лигнина; 2) расщепляющие лигнин грибы и бактерии могли существовать и до каменноугольного периода; 3) значительные пласты угля сформировались уже после того момента, когда, предположительно, у вызывающих белую гниль грибов появились расщепляющие лигнин ферменты; 4) если бы не было разложения лигнина до каменноугольного периода, весь углекислый газ был бы удален из атмосферы менее чем за миллион лет. См.: Nelsen et al. (2016), с комментариями Montañez (2016). В этом случае ясность и определенность отсутствуют. Соотношение степеней разложения и захоронения углерода измерить сложно, и трудно представить, что способность вызывающих белую гниль грибов расщеплять лигнин и другие жесткие компоненты древесины, такие как кристаллическая целлюлоза, не оказала бы никакого влияния на мировые уровни отложений углерода (Hibbett et al. [2016]).

органического материала избежало внимания грибов: о расщеплении угля грибами см.: Singh (2006), pp. 14–15; «керосиновый гриб» — это дрожжевой гриб, *Candida keroseneae*, выделенный из авиационного топлива (Buddie et al. [2011]).

отдельной областью, даже в наши дни: Hawksworth (2009). Смотрите также работу Rambold et al. (2013), который утверждает, что «микологию следует признать областью биологии на одном уровне с другими основными дисциплинами».

в 2000 году: о микологии в Древнем Китае см.: Yun-Chang (1985); о состоянии микологии в современном Китае и мировом производстве грибов см.: State of the World's Fungi (2018); о смертях от отравления грибами см.: Marley (2010).

иного выхода для исследования грибов: State of the World's Fungi (2018); Hawksworth (2009).

или просто любителями: о недавней истории гражданской науки и *Zooniverse* — цифровой платформе, позволяющей людям участвовать в исследовательских проектах в широ-

ком диапазоне областей, см.: Lintott (2019), обзор, который был проведен West (2019); классическое изложение информации о «непрофессиональных экспертах» в связи с кризисом заболеваемости СПИД см.: Epstein (1995); обсуждение современного участия масс в научных исследованиях, или краудсорсинге, см.: Kelty (2010); о гражданской науке в экологии см.: Silvertown (2009); об истории экспериментальной «бережливой» науки как о научных экспериментах, проводимых в домашних условиях, см.: Werrett (2019). Показательным примером может служить работа Дарвина. Большую часть своей жизни он проводил почти все свои исследования дома. Он разводил орхидеи на подоконниках, яблоки выращивал в своем саду, почтовых голубей и земляных червей — на террасе. Большую часть данных, которыми он подтверждал свою теорию эволюции, Дарвин получил от сообщества любителей, занимавшихся разведением животных и растений. Кроме того, он поддерживал обширную переписку с хорошо организованными сетями любителей-коллекционеров и кустарей-энтузиастов. (Boulter [2010]). Сегодня цифровые платформы открывают новые возможности. В конце 2018 года низкочастотный сейсмический шум прошел по всему миру, не зафиксированный основными системами обнаружения сейсмической активности. Его траектория и характер были описаны и задокументированы благодаря спонтанно возникшему сотрудничеству между учеными-сейсмологами и гражданскими сейсмологами-любителями, обменивавшимися информацией на Твиттере (Sample [2018]).

или ее «низовой слой»: об истории микологии в формате «сделай сам» см.: Steinhardt (2018).

«Вот так грибница и будет разрастаться»: McCoу (2016), р. xx.

сделать воздух чище: цифры по сельскохозяйственным отходам см.: Moore et al. (2011), ch. 11.6; о подгузниках в Мехико см.: Espinosa-Valdemar et al. (2011) — даже в тех случаях, когда не удалялся пластик, потеря в массе составляла вполне впечатляющие 70 %. О сельскохозяйственных отходах в Индии см.: Prasad (2018).

- был гриб мацутакэ*: о распространении грибов в мелово-третичный период вымирания см.: Vajda and McLoughlin (2004); о грибах мацутакэ после Хиросимы см.: Tsing (2015), “Prologue”. Цынь пишет в своих заметках о том, что источник этой истории обнаружить сложно.
- вскоре из банки*: видео вырастающего на сигаретных окурках гриба вешенки, *Pleurotus* см.: <https://web.archive.org/web/20200429100059/https://www.youtube.com/watch?v=f-SAX9P50SNU> [дата обращения 29 октября 2019].
- довольно обычной задачей*: о грибных ферментах широкого спектра действия и потенциальной способности расщеплять токсины см.: Harms et al. (2011).
- «Что нам делать?»*: в 2015 году Стемец получил награду от Общества микологов Америки. В официальном обращении он был назван «в высшей степени оригинальным членом микологического сообщества, оказывающим огромное и стабильное влияние на научную область» (fungi.com/blogs/articles/paul-receives-the-gordon-and-tina-wasson-award [дата обращения с 29 октября 2019]). В интервью 2018 года, данном Тиму Феррису (Tim Ferris), Стемец объяснил, что получил награду «за привлечение в эту область большего числа студентов, чем кто-либо другой за ее историю» (tim.blog/2018/10/15/the-tim-ferriss-show-transcripts-paul-stamets/ [дата обращения 29 октября 2019]).
- грибам, вызывающим белую гниль*: о диметилметифосфонате см.: Stamets (2011), “Part II: Mycorestoration”. Обратите внимание на то, что *Psilocybe azurescens* здесь не упоминается — Стемец рассказал мне о нем лично.
- от антибиотиков до искусственных гормонов*: резюме о способности грибов расщеплять токсины см.: Harms et al. (2011); более полную информацию о микоремедиации найдете у McCoy (2016), ch. 10.
- золота из выброшенной электроники*: о мицелиевых трассах см.: Harms et al. (2011); о микофильтрации (*E. coli*) см.: Taylor et al. (2015); о финской компании, извлекающей золото при помощи мицелия, см.: <https://web.archive.org/20200429095819//phys.org/news/2014-04-filter-recover-gold-mobile-scrap/html> [дата обращения 29 октября 2019].

В ряде работ сообщалось о поглощении грибами тяжелого радиоактивного металла цезия после взрыва на Чернобыльской АЭС и последующих радиоактивных осадков (Oolbekkink & Kuiper [1989], Kammerer et al. [1994] и Nikolova et al. [1997]).

а мы находимся внутри ее: о дополнительных грибных потребностях см.: Harms et al. (2011); о сложностях см.: McCooy (2016), ch. 10.

ни один из них не доведен пока до завершения: о CoRenewal см.: corenewal.org [дата обращения 29 октября 2019]; об очистке территории после пожаров в Калифорнии с помощью грибного мицелия см.: newfoodeconomy.org/mycoremediation-radical-mycology-mushroom-natural-disaster-pollution-clean-up/ [дата обращения 29 октября 2019]; о боновых заграждениях, наполненных мицелием вешенки (*Pleurotus*) в датской гавани, см.: www.sailing.org/news/87633.php#.XCkcIc9KiOE [дата обращения 29 октября 2019].

перерабатывать полиуретановый пластик: о переваривающем полиуретан грибе см.: Khan et al. (2017); о другом расщепляющем пластик грибе в качестве примера см.: Brunner et al. (2018). Миколог Тред Коттер из организации *Mushroom Mountain* координирует сбор штаммов грибов из необычных мест с помощью краудсорсинга, то есть привлекая к этой инициативе огромное количество добровольцев; см.: newfoodeconomy.org/mycoremediation-radical-mycology-mushroom-natural-disaster-pollution-clean-up/ [дата обращения 29 октября 2019].

было очень трудно достать: о Мэри Хант см.: Bennett and Chung (2001). «Толпа» энтузиастов не обязательно должна состоять только из непрофессиональных, «недипломированных ученых». В 2017 году исследовательская работа, опубликованная участниками проекта «Микробиом Земли» (Earth Microbiome Project) в журнале *Nature*, привлекла внимание своей необычной методологией. Исследователи обратились к ученым во всем мире с просьбой присылать образцы хорошо сохранившейся окружающей среды для включения в обзор разнообразия микроорганизмов в мире (Raes [2017]).

приз — 1 миллион долларов США: каждый год Дарвин соревновался со своим кузенном викарием в том, кто сумеет вырастить самые большие груши путем скрещивания самых последних разновидностей. Этот поединок стал источником развлечений для семьи. См.: Boulter (2010), p. 31.

около десяти лет от роду: о об У Сань Куне см.: McCoy (2016), p. 71; о «парижских» грибах см.: Monaco (2017); об общей истории разведения грибов в Европе см.: Ainsworth (1976), ch. 4. В наши дни в Париже произошел поворот в истории выращивания грибов под землей. С уменьшением количества частных автомобилей в Париже несколько подземных гаражей были превращены в весьма продуктивные фермы, выращивающие съедобные грибы; см.: www.bbc.co.uk/news/av/business-49928362/turning-paris-s-underground-car-parks-into-mushrooms-farms [дата обращения 29 октября 2019].

предвестниками радикальной микологии: люди, конечно, не единственные существа, готовящие и заготавливающие грибы. Несколько видов белок в Северной Америке, как известно, сушат грибы и запасают их (O'Regan et al. [2016]).

среди групп насекомых: о возрасте термитников крупных термитов-макротермесов (*Macrotermes*) см.: Erens et al. (2015); о сложности организации сообществ термитов-макротермесов см.: Aanen et al. (2002).

проходит через термитники макротермесов: о переваривании многочисленных материалов и метаболизме термитов-макротермесов (*Macrotermes*) см.: Aanen et al. (2002), Poulsen et al. (2014), и Yong (2014).

популяции малярийных комаров: о термитах, поедающих «частную собственность», см.: Margonelli (2018), ch. 1; о термитах, съевших банкноты, см.: www.bbc.co.uk/news/world-south-asia-13194864 [дата обращения 29 октября 2019]; об убивающих термитов грибах *Stamets* см.: Stamets (2011), «Микопестициды» (“Mycopesticides”). В исследовательской работе, опубликованной в журнале *Science* в 2019 году, сообщалось, что генетически модифицированный штамм энтомопатогенного грибка метаризиум (*Metarhizium*) уничтожил почти всех комаров в экспериментальной «приближенной к природной» среде в Буркина-Фасо. Авторы предлагают исполь-

- зовать данный модифицированный штамм метаризиума для борьбы с распространением малярии (Lovett et al. [2019]).
- быстро оставил свой пост*: о «пробуждении почвы» см.: Fairhead & Scoones (2005); о положительных свойствах земли из термитников см.: Fairhead (2016); о разрушении построек французского гарнизона см.: Fairhead and Leach (2003).
- самого крупного масштаба*: о духовных иерархиях см.: Fairhead (2016). В некоторых частях Гвинеи стены домов обмазывают почвой, взятой изнутри термитников макротермесов (Fairhead [2016]).
- строительные материалы из мицелия*: о материалах, созданных из грибного мицелия, см.: Haneef et al. (2017) и Jones et al. (2019); о шампиньонах портобелло и батареях см.: Campbell et al. (2015); о грибных кожзаменителях см.: Suarato et al. (2018).
- убивающих термитов грибов Stamets*: о термитоустойчивых материалах из грибного мицелия см.: phys.org/news/2018-06-scientists-material-fungus-rice-glass.html [дата обращения 29 октября 2019]. Мицелиевые строительные материалы использовались в ряде высокостатусных экспонатов, включая выставочный павильон 2014 PS1 в Музее современного искусства в Нью-Йорке и инсталляции «Мицелиевый купол» в Кочине, Индия.
- «при очень низких затратах...»*: о выращивании NASA конструкций в космосе см.: www.nasa.gov/directorates/spacetech/niac/2018_Phase_I_Phase_II/Myco-architecture_off_planet/ [дата обращения 29 октября 2019]; о «самовосстанавливающемся» бетоне из грибного мицелия см.: Luo et al. (2018).
- формовочная заготовка абажура лампы*: чтобы создать древесно-мицелиевый композит, древесные опилки и кукурузу перемешивают до состояния жидкой глины. Мицелий вводится в эту смесь, которая затем помещается в пластиковую форму. Грибной мицелий «проходит» через этот субстрат, образуя отливку, созданную из взаимосвязанной массы грибного мицелия и частично переваренной древесины. С кожей и мягким вспененным материалом история другая. Субстрат, в который был введен грибной мицелий, не загружается в форму, а распределяется по плоским поверхностям. Управляя условиями роста, можно «убедить» грибницу расти вверх,

в воздух. Меньше чем через неделю можно снимать пористый слой. После сжатия и окраски он образует материал, на ощупь удивительно напоминающий кожу. Если его высушить не подвергая компрессии, получается вспененный материал.

материал вырастет из их мицелия: более долгосрочной целью Байера (Bayer) является постижение биофизических процессов, при помощи которых мицелий создает физические структуры. «Я представляю себе грибы как нанотехнологические сборщики, которые ставят каждую молекулу на предназначенное ей место, — объяснил он. — Мы пытаемся понять, как трехмерное ориентирование микроволокон влияет на свойства материалов, их прочность, долговечность и гибкость». Байер в будущем стремится создать генетически программируемый грибной мицелий. С таким уровнем контроля, объяснял он, «мы сможем задавать параметры другого материала. Можно было бы добиться того, чтобы грибной мицелий выделял пластифицирующее соединение, такое как глицерин. Тогда был бы получен материал от природы более гибкий и водонепроницаемый. Можно было бы столько сделать». «Можно было бы» — в данном случае ключевое выражение. Грибная генетика архисложна, запутанна и мало изучена. Ввести грибу ген и добиться его экспрессии — это одно. Ввести ген и добиться, чтобы его экспрессия грибом проходила стабильно и предсказуемо, — совсем другое. А запрограммировать грибной мицелий, задав поток генетических команд, — это вообще иная история.

на мицелиевый аналог: не существует прецедента по созданию строительных материалов и строительству из грибного мицелия, следовательно, много исследований приходится проводить с нуля. Для Байера это более масштабный проект, чем обычное строительство. За последние 10 лет они вложили 30 миллионов долларов США в исследования. Для работы с мицелием подобным образом нужны новые методы, новые способы, чтобы убедить грибницу расти и вести себя по-другому.

«миллиметр этого здания»: о FUNGAR см.: info.uwe.ac.uk/news/uwenews/news.aspx?id=3970 и www.theregister.co.uk/2019/09/17/like_computers_love_fungus/ [дата обращения 29 октября 2019].

ряда смертоносных вирусов: о значении опылителей и о снижении численности опылителей см.: Klein et al. (2007) и Potts et al. (2010); о проблемах, вызываемых клещами варроа, см.: Stamets et al. (2018).

более новой, блестящей находкой: обзор грибных антивирусных компонентов см.: Linnakoski et al. (2018); о проекте «БиоЩит» (BioShield) см.: Stamets (2011), ch. 4. Стемец рассказал мне, что грибы с самым сильным противовирусным действием — это листовничная губка (*Laricifomes officinalis*), трутовик скошенный (*Inonotus obliquus*), ганодерма (*Ganoderma spp.*), третовик березовый (*Fomitopsis betulina*) и траметес разноцветный (*Trametes versicolor*). Наиболее богато задокументированная история грибных лекарственных средств и лечения грибами исходит из Китая, где лечебные грибы занимают центральное место в фармакопии по крайней мере уже две тысячи лет. Классическая книга о сельском хозяйстве и лекарственных растениях, датируемая примерно 200 годом н. э., составленная *Shennong Ben Cao*, считается сборником куда более древних устных, передаваемых из поколения в поколение традиций и включает несколько грибов, все еще используемых в наши дни медициной, включая рейши (*Ganoderma lucidum* — ганодерма лакированная) и трутовик зонтичный (*Polyporus umbellatus*). Рейши был одним из самых почитаемых грибов, и его изображение можно встретить на бесчисленных картинах, в резьбе и вышивках (Powell [2014]).

настолько продлить жизнь пчел: Stamets et al. (2018).

Глава 8. ГРИБНАЯ СУТЬ

какие системы систематизируют системы: Haraway (2016), гл. 4.

было обнаружено, что дрожжи являются микроскопическими организмами: о дрожжевых грибах в микробиоме человека см.: Huffnagle and Noverr (2013). О секвенировании генома дрожжевых грибов см.: Goffeau et al. (1996); о Нобелевских премиях за исследование дрожжевых грибов см.: “State of the World’s Fungi” (2018), “Useful Fungi”.

занимаются изготовлением алкоголя намного дольше: о доказательствах практики алкоголеварения на заре человеческой истории см.: Money (2018), ch. 2.

лет до человека: Lévi-Strauss (1973), p. 473.

дрожжевые грибы одомашнили нас: о «приручении» дрожжевых грибов см.: Money (2018), ch. 1 и Legras et al. (2007); о хлебе до пива см.: Wadley and Hayden (2015) и Dunn (2012). Развитие земледелия оказало влияние на ряд отношений человека и грибов. Считается, что многие болезнетворные грибки, поражающие растения, развивались параллельно с развитием культурных растений. Как и сегодня, окультуривание и выращивание растений предоставляет растительным грибкам-патогенам новые возможности (Dugan [2008], стр. 56).

был наполнен бутылками: я был вдохновлен великолепной книгой «Священные сорта травяного и лечебного пива» (Sacred Herbal and Healing Beers) (Buhner [1998]).

культурные понятия человека: о шумерах и древнеегипетской «Книге мертвых» (The Egyptian Book of the Dead) см.: Katz (2003), ch. 2; о народе тюркти см.: Aasved (1988), p. 757; о Дионисе см.: Kerényi (1976) и Paglia (2001), ch. 3.

машиной: о применении дрожжевых грибов в биотехнологии см.: Money (2018), ch. 5; о проекте «Синтезированные дрожжевые грибы 2.0» (Sc2.0) см.: syntheticyeast.org/sc2-0/introduction/ [дата обращения 29 октября 2019].

никогда не могли удержаться от грибного соблазна: о рапсодических поэмах см.: Yun-Chang (1985); цитату из поэмы Ямагучи Содо см.: Tsing (2015), “Prologue”; цитату из Магнуса см.: Letcher (2006), p. 50; цитату из Джерарда см.: Letcher (2006), p. 49.

эту власть по-разному: Wasson & Wasson (1957), vol. II, ch. 18. Супруги Уоссон разделили большую часть мира на категории, которые они создали. Жители Соединенных Штатов (Уоссон был американцем) были микофобами, как и англосаксы, и скандинавы. Жители России (Валентина была из России) были микофилами, как и славяне, и каталонцы. «Греки, — заметил Уоссон пренебрежительно, — всегда были микофобами. От первой страницы до последней в письмен-

ных памятниках древних греков не найти ни одного хвалебного слова о грибах». Конечно, такая прямолинейность и четкость редко встречаются. Супруги Уоссон придумали бинарную систему и стали первыми, кто растворил ее жесткие рамки. Они отметили, что финны «традиционно были микофобами», однако в областях, куда россияне обычно ездили отдыхать, финны научились «узнавать и любить многие виды грибов». Куда конкретно между двумя полюсами можно поместить «реформированных» финнов, Уоссоны, увы, не указали.

что в действительности представляют собой грибы: об изменениях в классификации грибов и бактерий см.: Sapp (2009), p. 47; об истории грибной таксономии см.: Ainsworth (1976), ch. 10.

«а что — разновидность»: о Теофрасте см.: Ainsworth (1976), стр. 35; о связи грибов с ударами молний и в общих чертах о знаниях европейцев о грибах см.: Ainsworth (1976), ch. 2; о «Порядке — грибы» (“The order of Fungi”) и хорошо изложенной общей истории грибной таксономии см.: Ramsbottom (1953), ch. 3.

полностью отказаться: Money (2013).

чтобы не смущать девиц-служанок: Raverat (1952), p. 136.

человека, занимающегося описанием: одна из первых зафиксированных таксономических попыток определить, к какой группе относятся грибы, была сделана в 1601 году. Грибы были разделены на две категории: виды «съедобные» и «ядовитые», то есть в соответствии с потенциальными отношениями, которые бы у них сложились с человеческим организмом (Ainsworth [1976], p. 183). Такие суждения редко имеют смысл. Пивные дрожжи можно использовать для приготовления хлеба и алкоголя, однако при попадании в кровь они могут вызвать опасную для жизни инфекцию.

концептуальной и идеологической пороховой бочкой: термин «мутуализм» в первые десятилетия своего существования носил открыто политический характер, отражая раннюю анархическую философию. Понятие «организм» также воспринималось как откровенно политическое немецкими биологами конца XIX века. По мнению Рудольфа Вирхова, орга-

низм состоял из сообщества сотрудничающих друг с другом клеток, каждая из которых работала ради всеобщего блага, в точности как население взаимосвязанных, сотрудничающих между собой граждан создавало основу, поддерживающую здоровое национальное государство (Ball [2019], ch. 1). *их существование вообще признавали*: по поводу «ближе к периферии» (“close to the margins”) см.: Sapp (2004). Отношения между теорией эволюции Дарвина, происходящей благодаря естественному отбору, анализом баланса запасов продовольствия и численности населения Томаса Мальтуса и теорией рыночных отношений Адама Смита привлекли к себе значительное внимание ученых. Смотрите, например, Young (1985).

«телесного, интеллектуального и морального»: Sapp (1994), ch. 2.

«для Симпозиума в этом году»: Sapp (2004).

свободно от предвзятости, характерной для конкретной культуры: о Джозефе Нидэме см.: Naraway (2004), p. 106; Lewontin (2000), p. 3.

«рыночную прибыль»: Тоби Кирс, профессор Амстердамского свободного университета, является одной из ведущих сторонниц применения «схем биологических рыночных отношений» к взаимодействиям грибов и растений. Биологические рыночные отношения не являются сами по себе новой идеей. Их используют для описания поведения животных уже много десятилетий. Но Кирс и ее коллеги первыми применили эти понятия к организмам, не имеющим мозга (см.: например, работы Werner et al. [2014], Wyatt et al. 2014], Kiers et al. [2016], а также Noë and Kiers [2018]). Для Кирс экономические метафоры поддерживают экономические модели, которые являются удобными исследовательскими инструментами. «Дело не в попытке провести аналогии с человеческими рыночными отношениями, — сказала она мне. — Это позволяет нам делать предположения, которые можно проверить с большей достоверностью». Вместо того чтобы свести изменчивый до головокружения мир обмена между грибами и растениями в размытые понятия «сложности» или «контекст-зависимости», экономические моде-

ли позволяют разорвать плотные паутины взаимодействий и проверить основные, базисные гипотезы. Кирс заинтересовалась биологическими рынками после того, как узнала, что растения и микоризные грибы используют «взаимные выгоды» для регулирования обмена фосфором и углеродом. Растения, которые получают от микоризного гриба больше фосфора, лучше снабжают его углеродом; грибы, получающие от растения больше углерода, поставляют ему больше фосфора (Kiers et al. [2011]). С точки зрения Кирс, рыночные модели позволяют понять, как эти «стратегические торговые отношения» могли развиться в прошлом и как они могли бы измениться в различных условиях. «До сих пор они служили полезным инструментом, хотя бы в том, что они позволяют нам ставить разные эксперименты, — объяснила она. — Мы можем сказать, что теоретически, как только мы изменим число партнеров, торговая стратегия должна измениться определенным образом в зависимости от имеющихся ресурсов. Это позволяет нам провести эксперимент: давайте попробуем поменять количество партнеров — и посмотрим, изменится ли действительно стратегия. Это скорее тест, нежели строгий протокол». В таком случае рыночные системы являются инструментом, собранием историй, основанных на человеческих взаимодействиях, которые помогают сформулировать вопросы о мире, создать новые перспективы. Это не означает, что нужно, как Кропоткин, сказать, что люди должны подражать поведению организмов и существ, не принадлежащих к миру человека. Не значит это и что растения и грибы являются индивидуалистами-капиталистами, принимающими рациональные решения. Конечно, даже если бы они были капиталистами, вряд ли бы их поведение совпало совершенно с рамками конкретной человеческой экономической модели. Как, несомненно, признает любой экономист, человеческие рынки не ведут себя как «идеальные рынки» на практике. Беспорядочная усложненность человеческой экономической жизни выплескивается за рамки моделей, построенных для нее. И в действительности жизнь грибов также не помещается точно в рамки теории биологического рынка. Для начала, биологические рынки зави-

сят — как и человеческие рынки, отражением которых они являются, — от способности идентифицировать отдельных «торговцев», действующих в своих собственных интересах. Суть проблемы здесь состоит в том, что неясно, что считается индивидуальным «торговцем» (Noë and Kiers [2018]). Мицелий «одного» микоризного гриба может слиться с другим мицелием и оказаться с несколькими разными типами ядер — с несколькими разными геномами, — циркулирующими по его сети. Что считать индивидом? Отдельно взятое ядро? Одну взаимосвязанную сеть? Кусочек сети? Кирс четко и прямо воспринимает эти сложности: «Если теория биологического рынка не поможет в изучении взаимодействий грибов и растений, мы перестаем ее использовать». Рыночные системы являются инструментами, полезность которых нельзя определить заранее. Тем не менее для некоторых исследователей в данной области биологические рынки представляются проблемой. Как заметила Кирс, «эти споры могут стать эмоциональными без какой-либо особой причины, которая могла бы эту эмоциональность вызвать». Может быть, действительно верно, что биологические рыночные системы задевают в нас социально-политический нерв? Человеческие экономические модели многочисленны и разнообразны. Однако в основном теория о системах биологических рынков поразительно похожа на капитализм свободного рынка. Принесло ли бы какую-либо пользу сравнение ценности экономических моделей различных национальных культур? Существует множество способов приписывать ценность чему-либо. Вполне возможно, что существует обменная валюта, которую никто не принимал во внимание.

обращаться с ними как с техникой: интернет и всемирная паутина значительно больше отвечают понятию самоорганизующейся системы, чем многие человеческие технологии (по словам Барабаши, всемирная паутина, кажется, имеет «больше общего с клеткой или экологической системой, чем со швейцарскими часами»). Тем не менее эти сети построены из технического оборудования и протоколов команд, которые самоорганизующимися не являются и прекратят действовать без постоянного человеческого наблюдения.

«искусственно создавать дихотомию»: Сапп рассказал мне историю, иллюстрирующую ту легкость, с которой метафоры биологов становятся источниками конфликтов. Он заметил, что многие изображают большие и более сложные организмы, такие как животные и растения, в качестве более «успешных», чем бактерии или грибы, с которыми они являются партнерами. Сапп этому аргументу придал мало значения. «Что считать успешным? В последний раз, когда я присматривался к этому миру, он в основном состоял из микроорганизмов. Эта планета принадлежит микробам. С микробов все начиналось, микробами все и закончится намного позже того, как исчезнут сложные “высшие” животные. Микроорганизмы создали ту атмосферу и ту жизнь, которую мы знаем, они составляют большую часть наших тел». Сапп поделился со мной своим наблюдением за тем, как эволюционный биолог Джон Мейнард Смит принижал роль микроорганизмов изменяя метафору. Если микроб получал выгоду от взаимоотношений с большим организмом, Мейнард Смит называл его «микробным паразитом», а большой организм — «хозяином». Однако если большой организм манипулировал микроорганизмом, Мейнард Смит не приписывал ему паразитизм. Он изменял метафору и называл большой организм «господином», а микроба — «рабом». Больше всего задевало Саппа то, что для Мейнарда Смита микроорганизм всегда был либо паразитом, либо рабом, но никогда не воспринимался как доминантный партнер, управляющий действиями хозяина. Микроб никогда бы не стал контролирующей фигурой.

корень проблемы и коренной житель, радикальный: о слове *prurowee* см.: Kimmerer (2013), “Learning the Grammar of Animacy” и “Allegiance to Gratitude”. Голландский приматолог Франс де Вааль, недовольный людьми, которые используют обвинение в антропоморфизме для защиты исключительности человека, жалуется на «антропоотрицание» — «отрицание *априори* общих характеристик у животных и людей, когда в действительности они могут существовать» (de Waal [1999]).

«пальцы выступают за левый бок»: Hustak and Myers (2012).
за «типичную» форму жизни: Ингольд спрашивает, насколько иными были бы человеческая мысль и философия, если бы

- грибы, а не животные были взяты за «парадигматический образец формы жизни». Он рассматривает возможные последствия того, что будет принята «грибная модель» жизни, утверждая, что люди не менее грибов интегрированы в сети, просто наши «пути взаимоотношений» труднее заметить, чем грибные (Ingold [2003]).
- микологами и бактериологами: об «использовании общих ресурсов» см.: Waller et al. (2018).*
- этими экстраординарными существами: Deleuze and Guattari (2005), p. 11.*
- чтобы все это переварить и ощутить: Carrigan et al. (2015).* Алкогольдегидрогеназа (АДГ) отличается от ацетальдегидрогеназы, другого фермента, отвечающего за метаболизм алкоголя, который по-разному проявляется у разных народов мира и может вызвать у людей проблемы при усвоении алкоголя.
- значительно более древнего увлечения: о гипотезе пьяной обезьяны см.: Dudley (2014).* Грибные заражения, как было доказано, усиливают аромат фруктов, что способствует их поеданию животными и птицами (Peris et al. [2017]).
- без каких-либо видимых негативных признаков опьянения: Wiens et al. (2008) и Money (2018), ch. 2.*
- сельскохозяйственной трансформации человечества: о последствиях производства биотоплива в США см.: Money (2018), ch. 5; об изменениях в землепользовании и биотопливе разных видов см.: Wright and Wimberly (2013); о субсидиях и углеродных выбросах см.: Lu et al. (2018).*
- материя обладает силой притяжения: Stukeley (1752).*

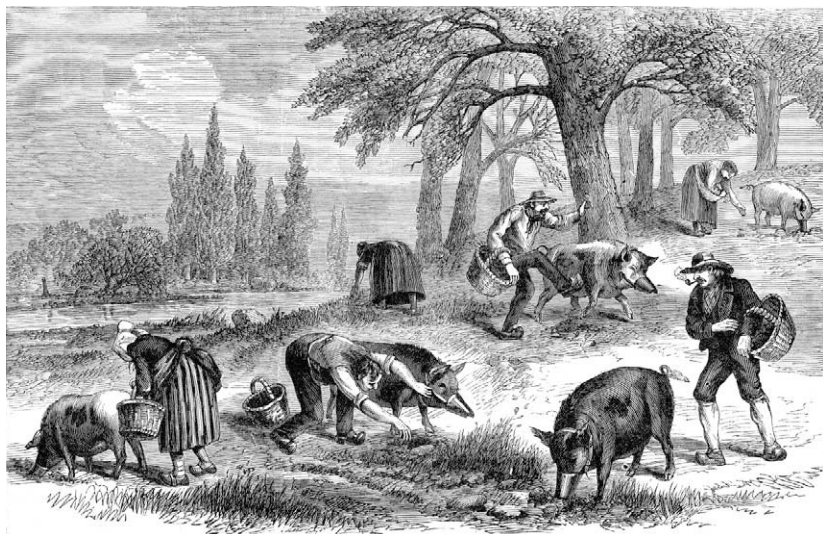
Эпилог: ВЕСЬ ЭТОТ КОМПОСТ

прекрасного в этом мире: Ladinsky (2002).

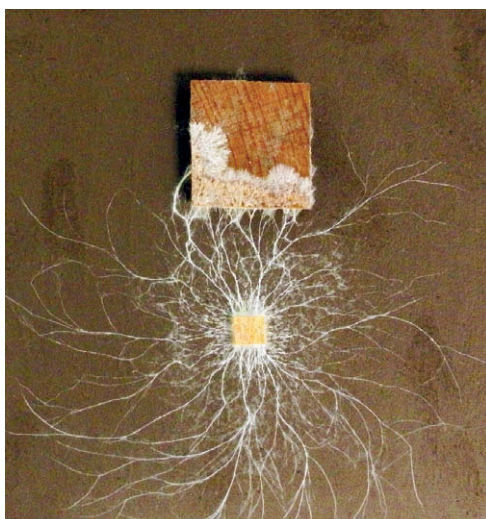
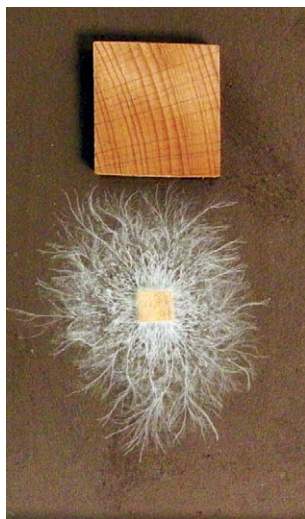


Пьемонтские белые трюфели,
Tuber magnatum. Фото автора

Кайка, собака породы лаготто-романьоло,
охотница за трюфелями. Фото автора



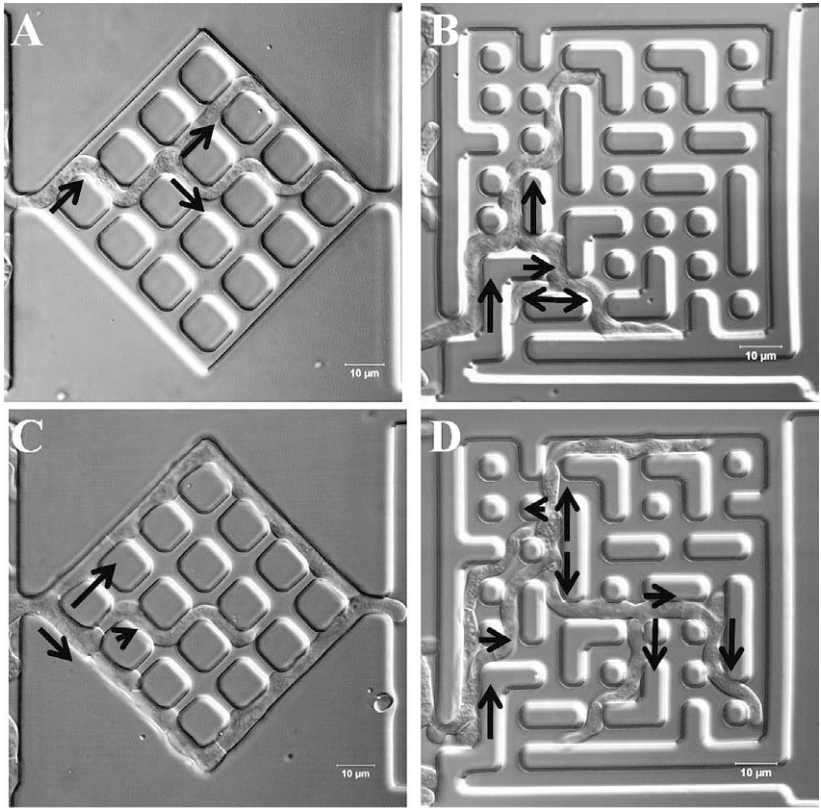
«Охота за трюфелями. Обученные свиньи роют землю в поисках драгоценных съестных припасов». Иллюстрация из книги, опубликованной ок. 1890 г. На свиньях специальные намордники, должны помешать им полакомиться находками. Фото Samantha Vuignier/Corbis via Getty Images



Пищевое поведение вызывающего белую гниль древесины гриба *Phanerochaete velutina*. Первое и последнее фото разделяют 48 дней. Мицелий начинает исследовать поверхность во всех направлениях. Обнаружив пропитание, гриб усиливает гифы, соединяющие со съестным, тогда как никуда не ведущие гифы отмирают. Фото Yu Fukasawa



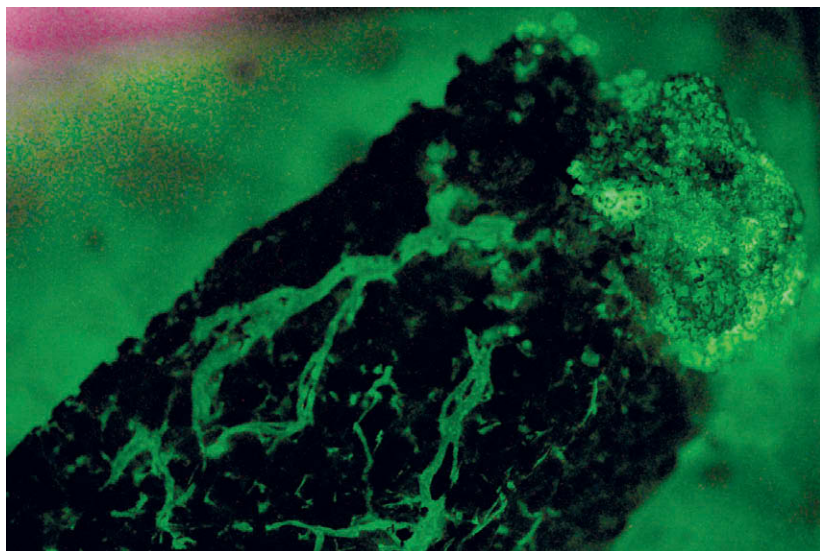
Мицелий домового гриба, изучающий и поглощающий поленья.
Фото Alison Pouliot



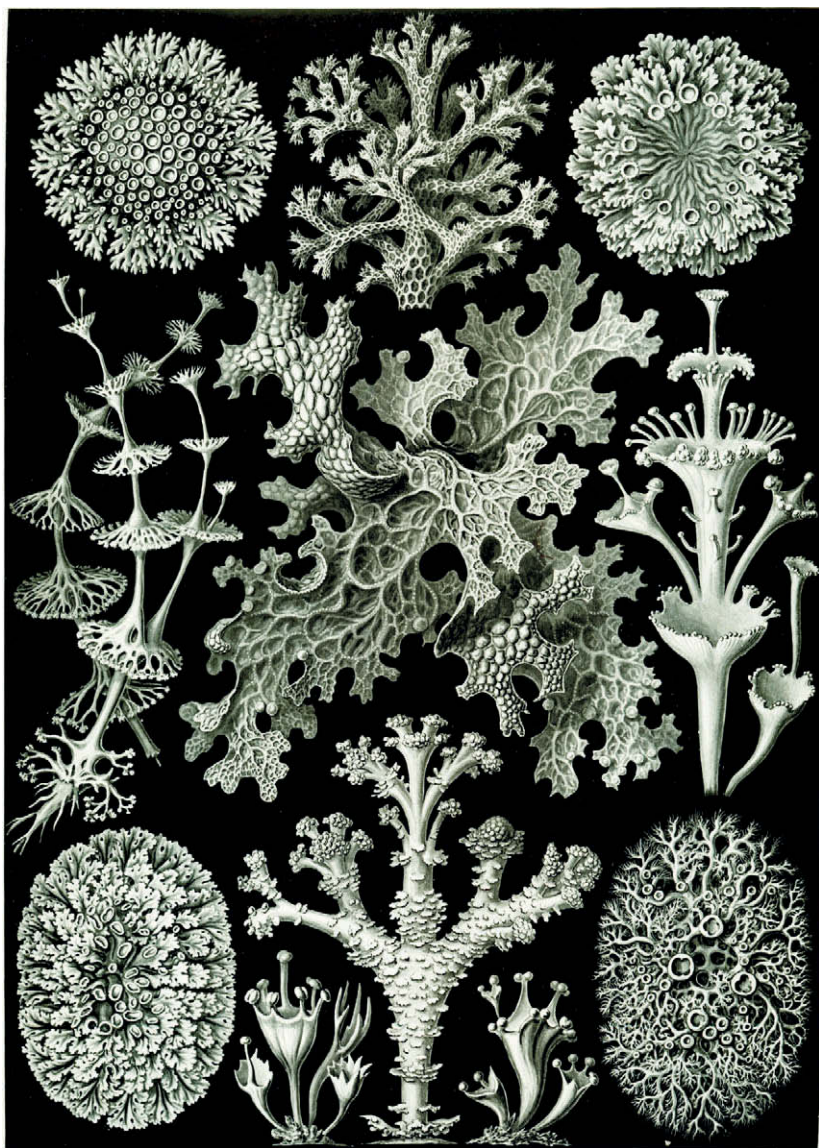
Хлебный плесневый грибок нейроспора густая, *Neurospora crassa*, проходящий микроскопический лабиринт. Черными стрелками помечено направление роста в местах ветвления и на входе. Изображение воспроизводится по изданию Held, et al. (2010)



Биолюминесцентный призрачный
гриб, *Omphalotus nidiformis*.
Фото Alison Pouliot



Биолюминесцентный мицелий сычужного гриба, *Panellus stipticus*,
растущего на обломках дерева. На первой подводной лодке *Turtle*,
сконструированной во время Войны за независимость США, применялись
подобные грибы для подсветки глубиномера. Английские шахтеры
в XIX веке сообщали о грибах на опорах, которые отбрасывали достаточно
света, чтобы различать в темноте руки. Фото Patrick Hickey



Лишайники. Иллюстрация из книги Эрнста Геккеля «Красота форм в природе» (1904)



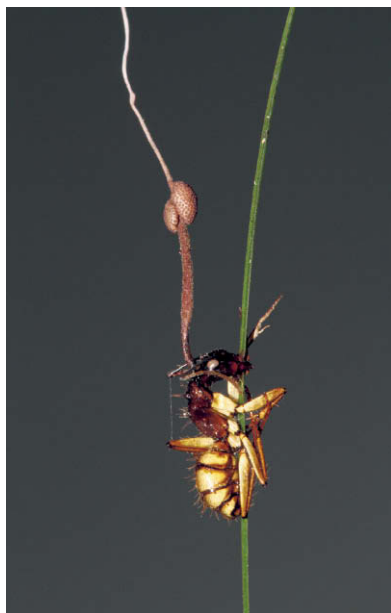
Лишайник кладония, *Cladonia*. Иллюстрация Беатрис Поттер (Beatrix Potter). Via The Armitt Trust



Муравей-древоточец, пораженный кордицепсом Ллойда, *Ophiocordyceps lloydii*. Два плодовых тела гриба показались из тела насекомого в Бразильской Амазонии. Фото João Araújo



Муравей-древоточец, пораженный грибом *Ophiocordyceps camponotidulantis*. Гриб — белесый пушистый налет, а плодовое тело возникает из задней части головы насекомого. Образец найден в Бразильской Амазонии. Фото João Araújo



Муравей-древоточец, пораженный грибом *Ophiocordyceps camponotiatricipis*. Плодовое тело гриба «выстрелило» из головы насекомого. Образец найден в Бразильской Амазонии. Фото João Araújo



Муравей-древоточец, пораженный кордицепсом однобоким, *Ophiocordyceps unilateralis*. Белые шипы — проявления другого гриба, «микопаразита», поражающего кордицепсы, живущие на телах животных. Образец найден в Японии. Фото João Araújo

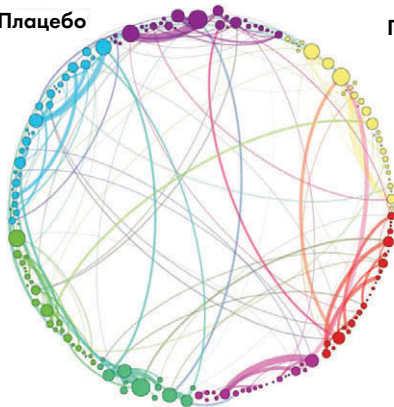


Кордицепс, оплетающий мышечные волокна муравья. Масштаб: 2 мкм. Изображение Colleen Mangold

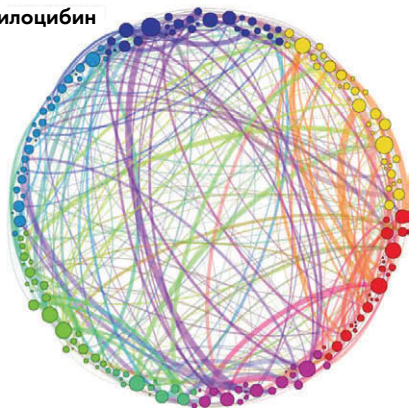


Скульптуры-грибы из Гватемалы, снятые в начале 1970-х годов. Считают, что уцелели около 200 таких скульптур. Они указывают на то, что употребление псилоцибиновых грибов относится по меньшей мере ко II тысячелетию до н. э. Фото Grant Kalivoda via Charlotte Schaarf

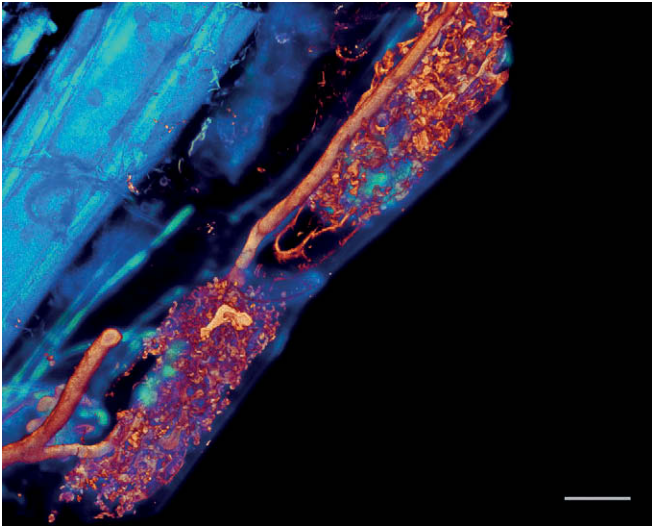
Плацебо



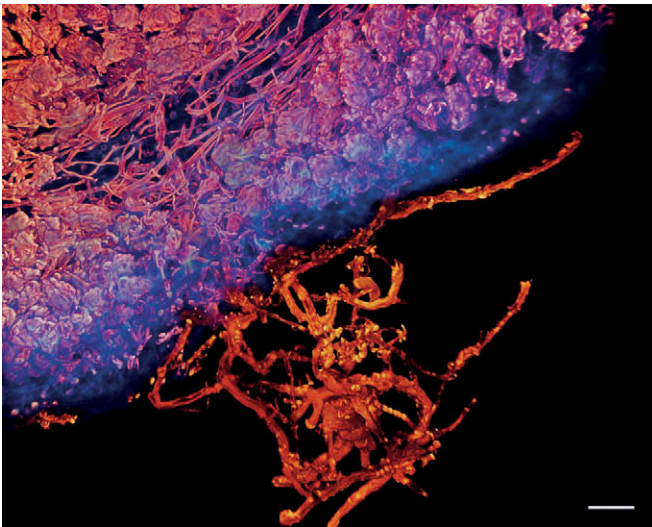
Псилоцибин



Взаимосвязи сетей активности мозга в условиях нормального сознания бодрствующего человека (*слева*) и после инъекции псилоцибина (*справа*). Сети показаны в виде разноцветных точек по окружности. После введения псилоцибина возникает шквал новых нейронных связей. Способность псилоцибина изменять сознание человека, судя по всему, связана с этими потоками в мозге. Изображение воспроизводится по Petri, et al (2014)



Микоризные грибы внутри корней растений. Гриб показан в оттенках красного, растение — синего. Тонкие разветвленные структуры внутри клеток растений известны как арбускулы (в дословном переводе — «деревца»); там и происходит обмен между растением и грибом. Масштаб: 20 мкм. Изображение автора



Микоризные грибы вырастают в корень растения. Гриб показан красным, граница корня растения — синим. Внутри корня грибы обильно разрослись. Масштаб: 50 мкм. Изображение автора

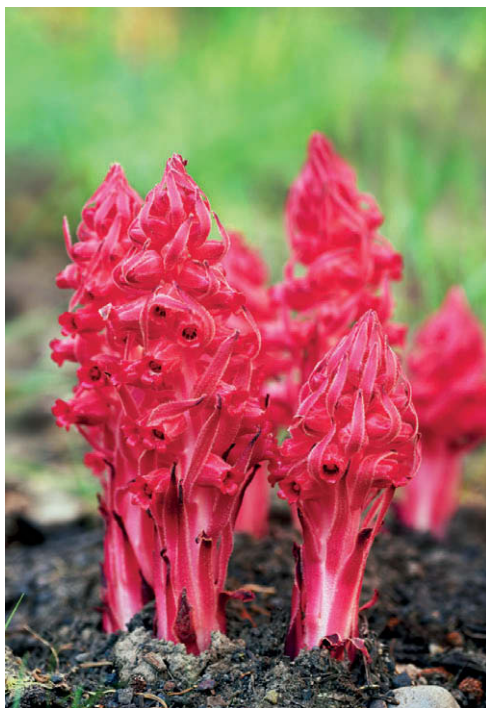


Микогетеротроф *Vougia tenella* из тропического леса в Панаме. Микогетеротрофы — «хакеры» всеобщей лесной сети; они утратили способность к фотосинтезу и извлекают питательные вещества при помощи сети микоризных грибов, которыми выстлан их путь сквозь почву. Фото Christian Ziegler

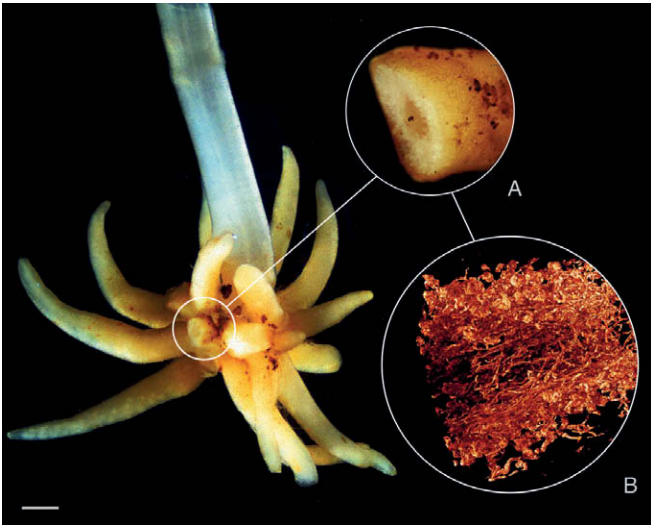


Микогетеротроф вертиляница одноцветковая, *Monotropa uniflora*, в нью-йоркском парке «Адирондак». Фото Dennis Kalma

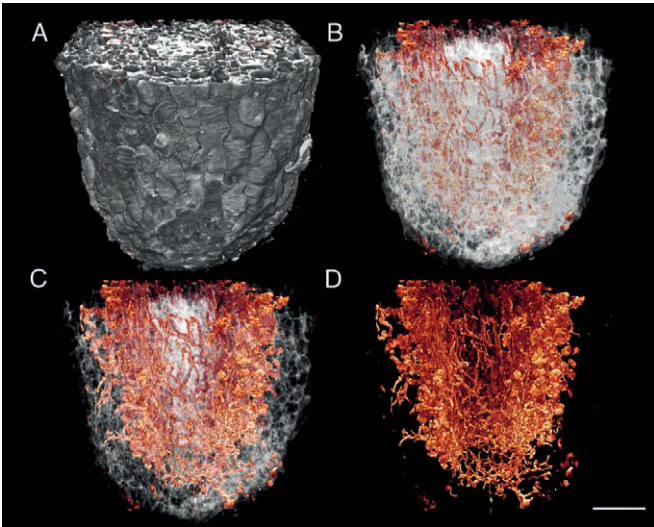
Микогетеротроф саркодес кроваво-красный, *Sarcodes sanguine*, из национального парка «Эльдорадо» в Калифорнии. По описанию Джона Мьюра, британского натуралиста, «пылающий огненный столб». Фото Timothy Boomer



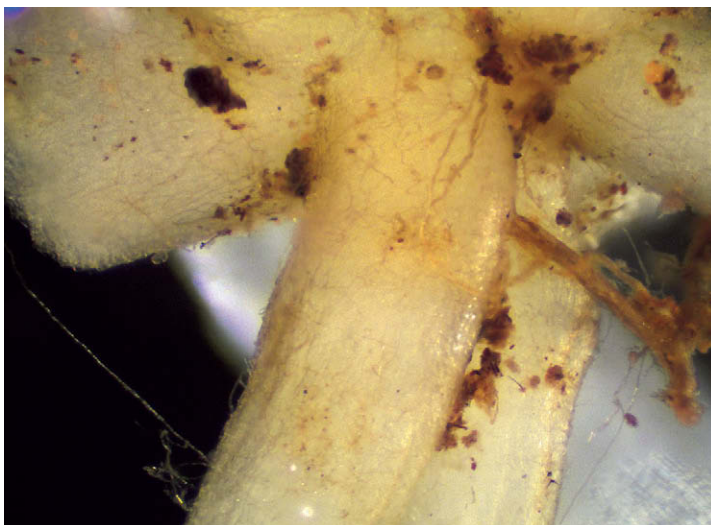
Микогетеротроф аллотропа прутьевидная, *Allotropa virgata*, из государственного заказника «Солт-Поинт» в Калифорнии. Фото Timothy Boomer



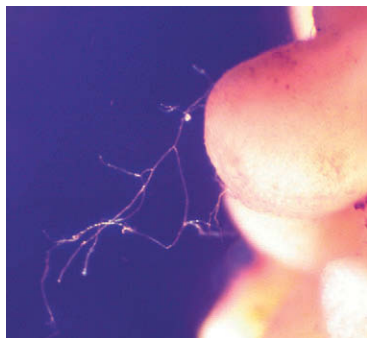
Неподражаемая близость. Корни микогетеротрофа *Voyria tenella* населяют огромные колонии микоризных грибов. В области *A* грибы выглядят как светлое кольцо у края корня. В области *B* грибы показаны красным, а ткани растения не показаны. Масштаб: 1 мм. Изображение воспроизводится по Sheldrake, et al. (2017)



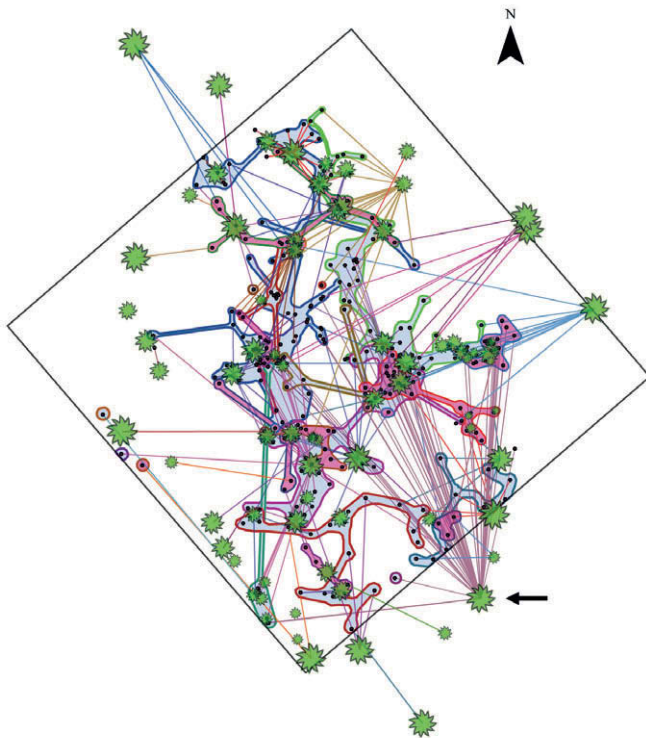
Микоризные грибы внутри корня микогетеротрофа *Voyria tenella*. Гриб показан красным, корни растения — серым. Изображения *A–D* показывают одну область корня, причем ткани растения максимально прозрачны. Масштаб: 100 мкм. Воспроизводится по Sheldrake, et al. (2017)



Корни микогетеротрофа *Voylea tenella* плохо приспособлены к поглощению воды и питательных веществ из почвы и превратились в своеобразные «грибные фермы». Обратите внимание на гифы микоризных грибов, опускающиеся с корней. Частицы почвы задерживаются липкой паутиной мицелия. Это редкий кадр, запечатлевший грибные связи, соединяющие растения с миром. Фото автора



Мицелий микоризных грибов на корнях микогетеротрофа *Voylea tenella*.
Фото автора



Сверху. Карта общей грибной сети Кевина Бейлера (Kevin Beiler). Зеленым показаны Дугласовы пихты, а прямые линии показывают связи между микоризными грибами и корнями деревьев. Черные точки — места, где Бейлер брал образцы. Генетически идентичные грибные сети показаны разными цветами. Сети, образованные микоризным грибом *Rhizopogon vesiculosus*, помечены синим, а грибом *Rhizopogon vinicolor* — розовым. Черная граница — участок 30 × 30 метров; стрелка указывает на дерево с наибольшим числом связей (имеющее отношение к 47 другим деревьям). Изображение воспроизводится по Beiler, et al. (2009)

Слева. Эксперимент Питера Маккоя с вешенкой. В меню гриба нет ничего, кроме сигаретных окурков. Оболочка сигаретного фильтра «размазана» по внутренней стенке банки. Фото Peter McCoy

БИБЛИОГРАФИЯ

- Aanen DK, Eggleton P, Rouland-Lefevre C, Guldberg-Froslev T, Rosendahl S, Boomsma JJ. 2002. The evolution of fungus-growing termites and their mutualistic fungal symbionts. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 99: 14887–892.
- Aasved MJ. 1988. *Alcohol, drinking, and intoxication in preindustrial societies: Theoretical, nutritional, and religious considerations*. PhD thesis, University of California at Santa Barbara.
- Abadeh A, Lew RR. 2013. Mass flow and velocity profiles in *Neurospora* hyphae: partial plug flow dominates intra-hyphal transport. *Microbiology* 159: 2386–394.
- Achatz M, Rillig MC. 2014. Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae enhance transport of the allelochemical juglone in the field. *Soil Biology and Biochemistry* 78: 76–82.
- Adachi K, Chiba K. 2007. FTY720 story. Its discovery and the following accelerated development of sphingosine 1-phosphate receptor agonists as immunomodulators based on reverse pharmacology. *Perspectives in Medicinal Chemistry* 1: 11–23.
- Adamatzky A. 2016. *Advances in Physarum Machines*. Springer International Publishing.
- Adamatzky A. 2019. A brief history of liquid computers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 374: 20180372.
- Adamatzky A. 2018a. On spiking behaviour of oyster fungi *Pleurotus djamor*. *Scientific Reports* 8: 7873.
- Adamatzky A. 2018b. Towards fungal computer. *Journal of the Royal Society Interface Focus* 8: 20180029.
- Ahmadjian V. 1995. Lichens are more important than you think. *BioScience* 45: 123.
- Ahmadjian V, Heikkilä H. 1970. The culture and synthesis of *Endocarpon pusillum* and *Staurothele clopima*. *The Lichenologist* 4: 259–67.
- Ainsworth GC. 1976. *Introduction to the History of Mycology*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Albert R, Jeong H, Barabási A-L. 2000. Error and attack tolerance of complex networks. *Nature* 406: 378–82.
- Alberti S. 2015. Don't go with the cytoplasmic flow. *Developmental Cell* 34: 381–82.

- Alim K. 2018. Fluid flows shaping organism morphology. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373: 20170112.
- Alim K, Andrew N, Pringle A, Brenner MP. 2017. Mechanism of signal propagation in *Physarum polycephalum*. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114: 5136–141.
- Allaway W, Ashford A. 2001. Motile tubular vacuoles in extramatrical mycelium and sheath hyphae of ectomycorrhizal systems. *Protoplasta* 215: 218–25.
- Allen J, Arthur J. 2005. “Ethnomycology and Distribution of Psilocybin Mushrooms.” In *Sacred Mushroom of Visions: Teonanacatl*. Metzner R, ed. Rochester, VT: Park Street Press, pp. 49–68.
- Alpert C. 2011. Unraveling the Mysteries of the Canadian Whiskey Fungus. *Wired*: www.wired.com/2011/05/ff-angelsshare/ [accessed October 29, 2019].
- Alpi A, Amrhein N, Bertl A, Blatt MR, Blumwald E, Cervone F, Dainty J, Michelis M, Epstein E, Galston AW, et al. 2007. Plant neurobiology: no brain, no gain? *Trends in Plant Science* 12: 135–36.
- Aly A, Debbab A, Proksch P. 2011. Fungal endophytes: unique plant inhabitants with great promises. *Applied Microbiology and Biotechnology* 90: 1829–845.
- Alzarhani KA, Clark DR, Underwood GJ, Ford H, Cotton AT, Dumbrell AJ. 2019. Are drivers of root-associated fungal community structure context specific? *The ISME Journal* 13: 1330–344.
- Anderson JB, Bruhn JN, Kasimer D, Wang H, Rodrigue N, Smith ML. 2018. Clonal evolution and genome stability in a 2500-year-old fungal individual. *Proceedings of the Royal Society B* 285: 20182233.
- Andersen SB, Gerritsma S, Yusah KM, Mayntz D, Hywel Jones NL, Billen J, Boomsma JJ, Hughes DP. 2009. The life of a dead ant: the expression of an adaptive extended phenotype. *The American Naturalist* 174: 424–33.
- Araldi-Brondolo SJ, Spraker J, Shaffer JP, Woytenko EH, Baltrus DA, Gallery RE, Arnold EA. 2017. Bacterial endosymbionts: master modulators of fungal phenotypes. *Microbiology spectrum* 5: FUNK-0056-2016.
- Arnaud-Haond S, Duarte CM, Diaz-Almela E, Marbà N, Sintes T, Serrão EA. 2012. Implications of extreme life span in clonal organisms: millenary clones in meadows of the threatened seagrass *Posidonia oceanica*. *PLOS ONE* 7: e30454.
- Arnold EA, Mejía L, Kyllö D, Rojas EI, Maynard Z, Robbins N, Herre E. 2003. Fungal endophytes limit pathogen damage in a tropical tree. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 100: 15649–654.
- Arnold EA, Miadlikowska J, Higgins LK, Sarvate SD, Gugger P, Way A, Hofstetter V, Kauff F, Lutzoni F. 2009. A phylogenetic estimation of trophic transition networks for ascomycetous fungi: are lichens cradles of symbiotrophic fungal diversification? *Systematic Biology* 58: 283–97.
- Arsenault C. 2014. Only 60 Years of Farming Left if Soil Degradation Continues. *Scientific American*: www.scientificamerican.com/article/only-60-years-of-farming-left-if-soil-degradation-continues/ [accessed October 29, 2019].
- Aschenbrenner IA, Cernava T, Berg G, Grube M. 2016. Understanding microbial multi-species symbioses. *Frontiers in Microbiology* 7: 180.

- Asenova E, Lin H-Y, Fu E, Nicolau DV, Nicolau DV. 2016. Optimal fungal space searching algorithms. *IEEE Transactions on NanoBioscience* 15: 613–18.
- Ashford AE, Allaway WG. 2002. The role of the motile tubular vacuole system in mycorrhizal fungi. *Plant and Soil* 244: 177–87.
- Averill C, Dietze MC, Bhatnagar JM. 2018. Continental-scale nitrogen pollution is shifting forest mycorrhizal associations and soil carbon stocks. *Global Change Biology* 24: 4544–553.
- Awan AR, Winter JM, Turner D, Shaw WM, Suz LM, Bradshaw AJ, Ellis T, Dentinger B. 2018. Convergent evolution of psilocybin biosynthesis by psychedelic mushrooms. *bioRxiv*: 374199.
- Babikova Z, Gilbert L, Bruce TJ, Birkett M, Caulfield JC, Woodcock C, Pickett JA, Johnson D. 2013. Underground signals carried through common mycelial networks warn neighbouring plants of aphid attack. *Ecology Letters* 16: 835–43.
- Bachelot B, Uriarte M, McGuire KL, Thompson J, Zimmerman J. 2017. Arbuscular mycorrhizal fungal diversity and natural enemies promote coexistence of tropical tree species. *Ecology* 98: 712–20.
- Bader MK-F, Leuzinger S. 2019. Hydraulic coupling of a leafless kauri tree remnant to conspecific hosts. *iScience* 19: 1238–43.
- Bahn Y-S, Xue C, Idnurm A, Rutherford JC, Heitman J, Cardenas ME. 2007. Sensing the environment: lessons from fungi. *Nature Reviews Microbiology* 5: 57–69.
- Bain N, Bartolo D. 2019. Dynamic response and hydrodynamics of polarized crowds. *Science* 363: 46–49.
- Ball P. 2019. *How to Grow a Human*. London, UK: William Collins.
- Banerjee S, Schlaeppi K, van der Heijden MG. 2018. Keystone taxa as drivers of microbiome structure and functioning. *Nature Reviews Microbiology* 16: 567–76.
- Banerjee S, Walder F, Büchi L, Meyer M, Held AY, Gattinger A, Keller T, Charles R, van der Heijden MG. 2019. Agricultural intensification reduces microbial network complexity and the abundance of keystone taxa in roots. *The ISME Journal* 13: 1722–736.
- Barabási A-L. 2014. *Linked: How Everything Is Connected to Everything Else and What It Means for Business, Science, and Everyday Life*. New York, NY: Basic Books.
- Barabási A-L. 2001. The Physics of the Web. *Physics World* 14: 33–38. physicsworld.com/a/the-physics-of-the-web/ [accessed October 29, 2019].
- Barabási A-L, Albert R. 1999. Emergence of scaling in random networks. *Science* 286: 509–12.
- Barbey AK. 2018. Network neuroscience theory of human intelligence. *Trends in Cognitive Sciences* 22: 8–20.
- Bar-On YM, Phillips R, Milo R. 2018. The biomass distribution on Earth. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: 6506–511.
- Barto KE, Hilker M, Müller F, Mohnhey BK, Weidenhamer JD, Rillig MC. 2011. The fungal fast lane: common mycorrhizal networks extend bioactive zones of allelochemicals in soils. *PLOS ONE* 6: e27195.
- Barto KE, Weidenhamer JD, Cipollini D, Rillig MC. 2012. Fungal superhighways: do common mycorrhizal networks enhance below ground communication? *Trends in Plant Science* 17: 633–37.

- Bascompte J. 2009. Mutualistic networks. *Frontiers in Ecology and the Environment* 7: 429–36.
- Baslam M, Garmendia I, Goicoechea N. 2011. Arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) improved growth and nutritional quality of greenhouse-grown lettuce. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 59: 5504–515.
- Bass D, Howe A, Brown N, Barton H, Demidova M, Michelle H, Li L, Sanders H, Watkinson SC, Willcock S, et al. 2007. Yeast forms dominate fungal diversity in the deep oceans. *Proceedings of the Royal Society B* 274: 3069–77.
- Bassett DS, Sporns O. 2017. Network neuroscience. *Nature Neuroscience* 20: 353–64.
- Bassett E, Keith MS, Armelagos G, Martin D, Villanueva A. 1980. Tetracycline-labeled human bone from ancient Sudanese Nubia (A.D. 350). *Science* 209: 1532–534.
- Bateson B. 1928. *William Bateson, Naturalist*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Bateson G. 1987. *Steps to an Ecology of Mind*. Northvale, NJ: Jason Aronson Inc.
- Bebber DP, Hynes J, Darrah PR, Boddy L, Fricker MD. 2007. Biological solutions to transport network design. *Proceedings of the Royal Society B* 274: 2307–315.
- Beck A, Divakar P, Zhang N, Molina M, Struwe L. 2015. Evidence of ancient horizontal gene transfer between fungi and the terrestrial alga *Trebouxia*. *Organisms Diversity & Evolution* 15: 235–48.
- Beerling D. 2019. *Making Eden*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Beiler KJ, Durall DM, Simard SW, Maxwell SA, Kretzer AM. 2009. Architecture of the wood-wide web: *Rhizopogon* spp. genets link multiple Douglas-fir cohorts. *New Phytologist* 185: 543–53.
- Beiler KJ, Simard SW, Durall DM. 2015. Topology of tree-mycorrhizal fungus interaction networks in xeric and mesic Douglas-fir forests. *Journal of Ecology* 103: 616–28.
- Bengtson S, Rasmussen B, Ivarsson M, Muhling J, Broman C, Marone F, Stampanoni M, Bekker A. 2017. Fungus-like mycelial fossils in 2.4-billion-year-old vesicular basalt. *Nature Ecology & Evolution* 1: 0141.
- Bennett JA, Cahill JF. 2016. Fungal effects on plant–plant interactions contribute to grassland plant abundances: evidence from the field. *Journal of Ecology* 104: 755–64.
- Bennett JA, Maherali H, Reinhart KO, Lekberg Y, Hart MM, Klironomos J. 2017. Plant-soil feedbacks and mycorrhizal type influence temperate forest population dynamics. *Science* 355: 181–84.
- Bennett JW, Chung KT. 2001. Alexander Fleming and the discovery of penicillin. *Advances in Applied Microbiology* 49: 163–84.
- Berendsen RL, Pieterse CM, Bakker PA. 2012. The rhizosphere microbiome and plant health. *Trends in Plant Science* 17: 478–86.
- Bergson H. 1911. *Creative Evolution*. New York, NY: Henry Holt and Company.
- Berthold T, Centler F, Hübschmann T, Remer R, Thullner M, Harms H, Wick LY. 2016. Mycelia as a focal point for horizontal gene transfer among soil bacteria. *Scientific Reports* 6: 36390.

- Bever JD, Richardson SC, Lawrence BM, Holmes J, Watson M. 2009. Preferential allocation to beneficial symbiont with spatial structure maintains mycorrhizal mutualism. *Ecology Letters* 12: 13–21.
- Bingham MA, Simard SW. 2011. Mycorrhizal networks affect ectomycorrhizal fungal community similarity between conspecific trees and seedlings. *Mycorrhiza* 22: 317–26.
- Björkman E. 1960. *Monotropa Hypopitys* L.—an Epiparasite on Tree Roots. *Physiologia Plantarum* 13: 308–27.
- Boddy L, Hynes J, Bebbler DP, Fricker MD. 2009. Saprotrophic cord systems: dispersal mechanisms in space and time. *Mycoscience* 50: 9–19.
- Bonfante P. 2018. The future has roots in the past: the ideas and scientists that shaped mycorrhizal research. *New Phytologist* 220: 982–95.
- Bonfante P, Desirò A. 2017. Who lives in a fungus? The diversity, origins and functions of fungal endobacteria living in Mucoromycota. *The ISME Journal* 11: 1727–735.
- Bonfante P, Selosse M-A. 2010. A glimpse into the past of land plants and of their mycorrhizal affairs: from fossils to evo-devo. *New Phytologist* 186: 267–70.
- Bonifaci V, Mehlhorn K, Varma G. 2012. *Physarum* can compute shortest paths. *Journal of Theoretical Biology* 309: 121–33.
- Booth MG. 2004. Mycorrhizal networks mediate overstorey-understorey competition in a temperate forest. *Ecology Letters* 7: 538–46.
- Bordenstein SR, Theis KR. 2015. Host biology in light of the microbiome: ten principles of holobionts and hologenomes. *PLOS Biology* 13: e1002226.
- Bouchard F. 2018. “Symbiosis, Transient Biological Individuality, and Evolutionary Process.” In *Everything Flows: Towards a Processual Philosophy of Biology*. Dupré J, Nicholson J, eds. Oxford, UK: Oxford University Press, pp. 186–98.
- Boulter M. 2010. *Darwin's Garden: Down House and the Origin of Species*. Berkeley, CA: Counterpoint.
- Boyce GR, Gluck-Thaler E, Slot JC, Stajich JE, Davis WJ, James TY, Cooley JR, Panaccione DG, Eilenberg J, Licht HH, et al. 2019. Psychoactive plant- and mushroom-associated alkaloids from two behavior modifying cicada pathogens. *Fungal Ecology* 41: 147–64.
- Brand A, Gow NA. 2009. Mechanisms of hypha orientation of fungi. *Current Opinion in Microbiology* 12: 350–57.
- Brandt A, de Vera JP, Onofri S, Ott S. 2014. Viability of the lichen *Xanthoria elegans* and its symbionts after 18 months of space exposure and simulated Mars conditions on the ISS. *International Journal of Astrobiology* 14: 411–25.
- Brandt A, Meeßen J, Jänicke RU, Raguse M, Ott S. 2017. Simulated space radiation: impact of four different types of high-dose ionizing radiation on the lichen *Xanthoria elegans*. *Astrobiology* 17: 136–44.
- Bringhurst R. 2009. *Everywhere Being Is Dancing*. Berkeley, CA: Counterpoint.
- Brito I, Goss MJ, Alho L, Brígido C, van Tuinen D, Félix MR, Carvalho M. 2018. Agronomic management of AMF functional diversity to overcome biotic and abiotic stresses—the role of plant sequence and intact extraradical mycelium. *Fungal Ecology* 40: 72–81.

- Bruce-Keller AJ, Salbaum MJ, Berthoud H-R. 2018. Harnessing gut microbes for mental health: getting from here to there. *Biological Psychiatry* 83: 214–23.
- Bruggeman FJ, van Heeswijk WC, Boogerd FC, Westerhoff HV. 2000. Macromolecular Intelligence in Microorganisms. *Biological Chemistry* 381: 965–72.
- Brundrett MC. 2002. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytologist* 154: 275–304.
- Brundrett MC, Tedersoo L. 2018. Evolutionary history of mycorrhizal symbioses and global host plant diversity. *New Phytologist* 220: 1108–115.
- Brunet T, Arendt D. 2015. From damage response to action potentials: early evolution of neural and contractile modules in stem eukaryotes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 371: 20150043.
- Brunner I, Fischer M, Rüthi J, Stierli B, Frey B. 2018. Ability of fungi isolated from plastic debris floating in the shoreline of a lake to degrade plastics. *PLOS ONE* 13: e0202047.
- Bublitz DC, Chadwick GL, Magyar JS, Sandoz KM, Brooks DM, Mesnage S, Ladinsky MS, Garber AI, Bjorkman PJ, Orphan VJ, et al. 2019. Peptidoglycan Production by an Insect-Bacterial Mosaic. *Cell* 179: 1–10.
- Buddie AG, Bridge PD, Kelley J, Ryan MJ. 2011. *Candida keroseneae* sp. nov., a novel contaminant of aviation kerosene. *Letters in Applied Microbiology* 52: 70–75.
- Büdel B, Vivas M, Lange OL. 2013. Lichen species dominance and the resulting photosynthetic behavior of Sonoran Desert soil crust types (Baja California, Mexico). *Ecological Processes* 2: 6.
- Buhner SH. 1998. *Sacred Herbal and Healing Beers*. Boulder, CO: Siris Books.
- Buller, AHR. 1931. *Researches on Fungi*, vol. 4. London, UK: Longmans, Green, and Co.
- Büntgen U, Egli S, Schneider L, von Arx G, Rigling A, Camarero JJ, Sangüesa-Barreda G, Fischer CR, Oliach D, Bonet JA, et al. 2015. Long-term irrigation effects on Spanish holm oak growth and its black truffle symbiont. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 202: 148–59.
- Burford EP, Kierans M, Gadd GM. 2003. Geomycology: fungi in mineral substrata. *Mycologist* 17: 98–107.
- Burkett W. 1987. *Ancient Mystery Cults*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Burr C. 2012. *The Emperor of Scent*. New York, NY: Random House.
- Bushdid C, Magnasco M, Vosshall L, Keller A. 2014. Humans can discriminate more than 1 trillion olfactory stimuli. *Science* 343: 1370–372.
- Cai Q, Qiao L, Wang M, He B, Lin F-M, Palmquist J, Huang S-D, Jin H. 2018. Plants send small RNAs in extracellular vesicles to fungal pathogen to silence virulence genes. *Science* 360: 1126–129.
- Calvo Garzón P, Keijzer F. 2011. Plants: Adaptive behavior, root-brains, and minimal cognition. *Adaptive Behavior* 19: 155–71.
- Campbell B, Ionescu R, Favors Z, Ozkan CS, Ozkan M. 2015. Bio-derived, binderless, hierarchically porous carbon anodes for Li-ion batteries. *Scientific Reports* 5: 14575.
- Caporael L. 1976. Ergotism: the satan loosed in Salem? *Science* 192: 21–26.

- Carhart-Harris RL, Bolstridge M, Rucker J, Day CM, Erritzoe D, Kaelen M, Bloomfield M, Rickard JA, Forbes B, Feilding A, et al. 2016a. Psilocybin with psychological support for treatment-resistant depression: an open-label feasibility study. *The Lancet Psychiatry* 3: 619–27.
- Carhart-Harris RL, Erritzoe D, Williams T, Stone J, Reed LJ, Colasanti A, Tyacke RJ, Leech R, Malizia AL, Murphy K, et al. 2012. Neural correlates of the psychedelic state as determined by fMRI studies with psilocybin. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 2138–143.
- Carhart-Harris RL, Muthukumaraswamy S, Roseman L, Kaelen M, Droog W, Murphy K, Tagliazucchi E, Schenberg EE, Nest T, Orban C, et al. 2016b. Neural correlates of the LSD experience revealed by multimodal neuroimaging. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113: 4853–858.
- Carrigan MA, Uryasev O, Frye CB, Eckman BL, Myers CR, Hurley TD, Benner SA. 2015. Hominids adapted to metabolize ethanol long before human-directed fermentation. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: 458–63.
- Casadevall A. 2012. Fungi and the rise of mammals. *Pathogens* 8: e1002808.
- Casadevall A, Cordero RJ, Bryan R, Nosanchuk J, Dadachova E. 2017. Melanin, Radiation, and Energy Transduction in Fungi. *Microbiology Spectrum* 5: FUNK-0037-2016.
- Casadevall A, Kontoyiannis DP, Robert V. 2019. On the Emergence of *Candida auris*: Climate Change, Azoles, Swamps, and Birds. *mBio* 10: e01397-19.
- Ceccarelli N, Curadi M, Martelloni L, Sbrana C, Picciarelli P, Giovannetti M. 2010. Mycorrhizal colonization impacts on phenolic content and antioxidant properties of artichoke leaves and flower heads two years after field transplant. *Plant and Soil* 335: 311–23.
- Cepelewicz J. 2019. Bacterial Complexity Revises Ideas About “Which Came First?” *Quanta*: www.quantamagazine.org/bacterial-organelles-revises-ideas-about-which-came-first-20190612/ [accessed October 29, 2019].
- Cerdá-Olmedo E. 2001. *Phycomyces* and the biology of light and color. *FEMS Microbiology Reviews* 25: 503–12.
- Cernava T, Aschenbrenner I, Soh J, Sensen CW, Grube M, Berg G. 2019. Plasticity of a holobiont: desiccation induces fasting-like metabolism within the lichen microbiota. *The ISME Journal* 13: 547–56.
- Chen J, Blume H, Beyer L. 2000. Weathering of rocks induced by lichen colonization—a review. *Catena* 39: 121–46.
- Chen L, Swenson NG, Ji N, Mi X, Ren H, Guo L, Ma K. 2019. Differential soil fungus accumulation and density dependence of trees in a subtropical forest. *Science* 366: 124–28.
- Chen M, Arato M, Borghi L, Nouri E, Reinhardt D. 2018. Beneficial services of arbuscular mycorrhizal fungi—from ecology to application. *Frontiers in Plant Science* 9: 1270.
- Chialva M, di Fossalunga A, Daghino S, Ghignone S, Bagnaresi P, Chiapello M, Novero M, Spadaro D, Perotto S, Bonfante P. 2018. Native soils with their microbiotas elicit a state of alert in tomato plants. *New Phytologist* 220: 1296–308.
- Chrisafis A. 2010. French truffle farmer shoots man he feared was trying to steal “black diamonds.” *The Guardian*: www.theguardian.com/

- world/2010/dec/22/french-truffle-farmer-shoots-trespasser [accessed October 29, 2019].
- Christakis NA, Fowler JH. 2009. *Connected: The Surprising Power of Our Social Networks and How They Shape Our Lives*. London, UK: HarperPress.
- Chu C, Murdock MH, Jing D, Won TH, Chung H, Kressel AM, Tsaava T, Addorisio ME, Putzel GG, Zhou L, et al. 2019. The microbiota regulate neuronal function and fear extinction learning. *Nature* 574: 543–48.
- Chung T-Y, Sun P-F, Kuo J-I, Lee Y-I, Lin C-C, Chou J-Y. 2017. Zombie ant heads are oriented relative to solar cues. *Fungal Ecology* 25: 22–28.
- Cixous, H. 1991. *The Book of Prometheus*. Lincoln, NE: University of Nebraska Press.
- Claus R, Hoppen H, Karg H. 1981. The secret of truffles: A steroidal pheromone? *Experientia* 37: 1178–179.
- Clay K. 1988. Fungal Endophytes of Grasses: A Defensive Mutualism between Plants and Fungi. *Ecology* 69: 10–16.
- Clemmensen K, Bahr A, Ovaskainen O, Dahlberg A, Ekblad A, Wallander H, Stenlid J, Finlay R, Wardle D, Lindahl B. 2013. Roots and associated fungi drive long-term carbon sequestration in boreal forest. *Science* 339: 1615–618.
- Cockell CS. 2008. The interplanetary exchange of photosynthesis. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 38: 87–104.
- Cohen R, Jan Y, Matricon J, Delbrück M. 1975. Avoidance response, house response, and wind responses of the sporangiophore of *Phycomyces*. *The Journal of General Physiology* 66: 67–95.
- Collier FA, Bidartondo MI. 2009. Waiting for fungi: the ectomycorrhizal invasion of lowland heathlands. *Journal of Ecology* 97: 950–63.
- Collinge A, Trinci A. 1974. Hyphal tips of wild-type and spreading colonial mutants of *Neurospora crassa*. *Archive of Microbiology* 99: 353–68.
- Cooke M. 1875. *Fungi: Their Nature and Uses*. New York, NY: D. Appleton and Company.
- Cooley JR, Marshall DC, Hill KBR. 2018. A specialized fungal parasite (*Masospora cicadina*) hijacks the sexual signals of periodical cicadas (Hemiptera: Cicadidae: *Magicicada*). *Scientific Reports* 8: 1432.
- Copetta A, Bardi L, Bertolone E, Berta G. 2011. Fruit production and quality of tomato plants (*Solanum lycopersicum* L.) are affected by green compost and arbuscular mycorrhizal fungi. *Plant Biosystems* 145: 106–15.
- Copetta A, Lingua G, Berta G. 2006. Effects of three AM fungi on growth, distribution of glandular hairs, and essential oil production in *Ocimum basilicum* L. var. Genovese. *Mycorrhiza* 16: 485–94.
- Corbin A. 1986. *The Foul and the Fragrant: Odor and the French Social Imagination*. Leamington Spa, UK: Berg Publishers Ltd.
- Cordero RJ. 2017. Melanin for space travel radioprotection. *Environmental Microbiology* 19: 2529–532.
- Corrales A, Mangan SA, Turner BL, Dalling JW. 2016. An ectomycorrhizal nitrogen economy facilitates monodominance in a neotropical forest. *Ecology Letters* 19: 383–92.
- Corrochano LM, Galland P. 2016. “Photomorphogenesis and Gravitropism in Fungi.” In *Growth, Differentiation, and Sexuality*. Wendland J, ed. Springer International Publishing, pp. 235–66.

- Cosme M, Fernández I, van der Heijden MG, Pieterse C. 2018. Non-mycorrhizal Plants: The Exceptions that Prove the Rule. *Trends in Plant Science* 23: 577–87.
- Costello EK, Lauber CL, Hamady M, Fierer N, Gordon JJ, Knight R. 2009. Bacterial community variation in human body habitats across space and time. *Science* 326: 1694–697.
- Cottin H, Kotler J, Billi D, Cockell C, Demets R, Ehrenfreund P, Elsaesser A, d'Hendecourt L, van Loon JJ, Martins Z, et al. 2017. Space as a tool for astrobiology: review and recommendations for experimentations in earth orbit and beyond. *Space Science Reviews* 209: 83–181.
- Coyle MC, Elya CN, Bronski MJ, Eisen MB. 2018. Entomophthovirus: An insect-derived iflavivirus that infects a behavior manipulating fungal pathogen of dipterans. *bioRxiv*: 371526.
- Craig ME, Turner BL, Liang C, Clay K, Johnson DJ, Phillips RP. 2018. Tree mycorrhizal type predicts within-site variability in the storage and distribution of soil organic matter. *Global Change Biology* 24: 3317–330.
- Crowther T, Glick H, Covey K, Bettigole C, Maynard D, Thomas S, Smith J, Hintler G, Duguid M, Amatulli G, et al. 2015. Mapping tree density at a global scale. *Nature* 525: 201–68.
- Currie CR, Poulsen M, Mendenhall J, Boomsma JJ, Billen J. 2006. Coevolved crypts and exocrine glands support mutualistic bacteria in fungus-growing ants. *Science* 311: 81–83.
- Currie CR, Scott JA, Summerbell RC, Malloch D. 1999. Fungus-growing ants use antibiotic-producing bacteria to control garden parasites. *Nature* 398: 701–04.
- Dadachova E, Casadevall A. 2008. Ionizing radiation: how fungi cope, adapt, and exploit with the help of melanin. *Current Opinion in Microbiology* 11: 525–31.
- Dance A. 2018. Inner Workings: The mysterious parentage of the coveted black truffle. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: 10188–190.
- Darwin C, Darwin F. 1880. *The Power of Movement in Plants*. London, UK: John Murray.
- Davis J, Aguirre L, Barber N, Stevenson P, Adler L. 2019. From plant fungi to bee parasites: mycorrhizae and soil nutrients shape floral chemistry and bee pathogens. *Ecology* 100: e02801.
- Davis W. 1996. *One River: Explorations and Discoveries in the Amazon Rain Forest*. New York, NY: Simon and Schuster.
- Dawkins R. 1982. *The Extended Phenotype*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Dawkins R. 2004. Extended Phenotype—But Not Too Extended. A Reply to Laland, Turner and Jablonka. *Biology and Philosophy* 19: 377–96.
- de Bekker C, Quevillon LE, Smith PB, Fleming KR, Ghosh D, Patterson AD, Hughes DP. 2014. Species-specific ant brain manipulation by a specialized fungal parasite. *BMC Evolutionary Biology* 14: 166.
- de Gonzalo G, Colpa DI, Habib M, Fraaije MW. 2016. Bacterial enzymes involved in lignin degradation. *Journal of Biotechnology* 236: 110–19.

- de Jong E, Field JA, Spinnler HE, Wijnberg JB, de Bont JA. 1994. Significant biogenesis of chlorinated aromatics by fungi in natural environments. *Applied and Environmental Microbiology* 60: 264–70.
- de la Fuente-Nunez C, Meneguetti B, Franco O, Lu TK. 2017. Neuromicrobiology: how microbes influence the brain. *ACS Chemical Neuroscience* 9: 141–50.
- de la Torre R, Miller AZ, Cubero B, Martín-Cerezo LM, Raguse M, Meeßen J. 2017. The effect of high-dose ionizing radiation on the astrobiological model lichen *Circinaria gyrosa*. *Astrobiology* 17: 145–53.
- de la Torre Noetzel R, Miller AZ, de la Rosa JM, Pacelli C, Onofri S, Sancho L, Cubero B, Lorek A, Wolter D, de Vera JP. 2018. Cellular responses of the lichen *Circinaria gyrosa* in Mars-like conditions. *Frontiers in Microbiology* 9: 308.
- Delaux PM, Radhakrishnan GV, Jayaraman D, Cheema J, Malbreil M, Volkening JD, Sekimoto H, Nishiyama T, Melkonian M, Pokorny L, et al. 2015. Algal ancestor of land plants was preadapted for symbiosis. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: 13390–395.
- Delavaux CS, Smith-Ramesh L, Kuebbing SE. 2017. Beyond nutrients: a meta-analysis of the diverse effects of arbuscular mycorrhizal fungi on plants and soils. *Ecology* 98: 2111–119.
- Deleuze G, Guattari F. 2005. *A Thousand Plateaus: Capitalism and Schizophrenia*. Minneapolis, MN: University of Minnesota Press.
- de los Ríos A, Sancho L, Grube M, Wierzos J, Ascaso C. 2005. Endolithic growth of two *Lecidea* lichens in granite from continental Antarctica detected by molecular and microscopy techniques. *New Phytologist* 165: 181–90.
- Delwiche C, Cooper E. 2015. The evolutionary origin of a terrestrial flora. *Current Biology* 25: R899–R910.
- Deng Y, Qu Z, Naqvi NI. 2015. Twilight, a novel circadian-regulated gene, integrates phototropism with nutrient and redox homeostasis during fungal development. *PLOS Pathogens* 11: e1004972.
- Deveau A, Bonito G, Uehling J, Paoletti M, Becker M, Bindschedler S, Hacquard S, Hervé V, Labbé J, Lastovetsky O, et al. 2018. Bacterial-fungal interactions: ecology, mechanisms and challenges. *FEMS Microbiology Reviews* 42: 335–52.
- de Vera JP, Alawi M, Backhaus T, Baqué M, Billi D, Böttger U, Berger T, Bohmeier M, Cockell C, Demets R, et al. 2019. Limits of life and the habitability of Mars: The ESA Space Experiment BIOMEX on the ISS. *Astrobiology* 19: 145–57.
- de Vries FT, Thébault E, Liiri M, Birkhofer K, Tsiafouli MA, Bjørnlund L, Jørgensen H, Brady M, Christensen S, de Ruiter PC, et al. 2013. Soil food web properties explain ecosystem services across European land use systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: 14296–301.
- de Waal FBM. 1999. Anthropomorphism and Anthropodenial: Consistency in Our Thinking about Humans and Other Animals. *Philosophical Topics* 27: 255–80.
- Diamant L. 2004. *Chaining the Hudson: The Fight for the River in the American Revolution*. New York, NY: Fordham University Press.

- di Fossalunga A, Lipuma J, Venice F, Dupont L, Bonfante P. 2017. The endobacterium of an arbuscular mycorrhizal fungus modulates the expression of its toxin–antitoxin systems during the life cycle of its host. *The ISME Journal* 11: 2394–398.
- Ditengou FA, Müller A, Rosenkranz M, Felten J, Lasok H, van Doorn M, Legué V, Palme K, Schnitzler J-P, Polle A. 2015. Volatile signalling by sesquiterpenes from ectomycorrhizal fungi reprogrammes root architecture. *Nature Communications* 6: 6279.
- Dixon LS. 1984. Bosch's "St. Anthony Triptych"—An Apothecary's Apotheosis. *Art Journal* 44: 119–31.
- Donoghue PC, Antcliffe JB. 2010. Early life: origins of multicellularity. *Nature* 466: 41.
- Doolittle FW, Booth A. 2017. It's the song, not the singer: an exploration of holobiosis and evolutionary theory. *Biology & Philosophy* 32: 5–24.
- Dressaire E, Yamada L, Song B, Roper M. 2016. Mushrooms use convectively created airflows to disperse their spores. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113: 2833–838.
- Dudley R. 2014. *The Drunken Monkey: Why We Drink and Abuse Alcohol*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Dugan FM. 2011. *Conspectus of World Ethnomycology*. St. Paul, MN: American Phytopathological Society.
- Dugan FM. 2008. *Fungi in the Ancient World*. St. Paul, MN: American Phytopathological Society.
- Dunn R. 2012. A Sip for the Ancestors. *Scientific American*: blogs.scientificamerican.com/guest-blog/a-sip-for-the-ancestors-the-true-story-of-civilizations-stumbling-debt-to-beer-and-fungus/ [accessed October 29, 2019].
- Dupré J, Nicholson DJ. 2018. "A manifesto for a processual biology." In Dupré J, Nicholson DJ, eds. *Everything Flows: Towards a Processual Philosophy of Biology*. Oxford, UK: Oxford University Press, pp. 3–48.
- Dyke E. 2008. *Psychedelic Psychiatry: LSD from Clinic to Campus*. Baltimore, MD: The Johns Hopkins University Press.
- Eason W, Newman E, Chuba P. 1991. Specificity of interplant cycling of phosphorus: The role of mycorrhizas. *Plant and Soil* 137: 267–74.
- Elser J, Bennett E. 2011. A broken biogeochemical cycle. *Nature*: www.nature.com/articles/478029a [accessed October 29, 2019].
- Eltz T, Zimmermann Y, Haftmann J, Twele R, Francke W, Quezada-Euan JGG, Lunau K. 2007. Enflourage, lipid recycling and the origin of perfume collection in orchid bees. *Proceedings of the Royal Society B* 274: 2843–848.
- Eme L, Spang A, Lombard J, Stairs CW, Ettema TJG. 2017. Archaea and the origin of eukaryotes. *Nature Reviews Microbiology* 15: 711–23.
- Engelthaler DM, Casadevall A. 2019. On the Emergence of *Cryptococcus gattii* in the Pacific Northwest: ballast tanks, tsunamis, and black swans. *mBio* 10: e02193–19.
- Ensminger PA. 2001. *Life Under the Sun*. New Haven, CT: Yale Scholarship Online.
- Epstein S. 1995. The construction of lay expertise: AIDS activism and the forging of credibility in the reform of clinical trials. *Science, Technology, Human Values* 20: 408–37.

- Erens H, Boudin M, Mees F, Mujinya B, Baert G, Strydonck M, Boeckx P, Ranst E. 2015. The age of large termite mounds—radiocarbon dating of *Macrotermes falciger* mounds of the Miombo woodland of Katanga, DR Congo. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 435: 265–71.
- Espinosa-Valdemar R, Turpin-Marion S, Delfin-Alcalá I, Vázquez-Morillas A. 2011. Disposable diapers biodegradation by the fungus *Pleurotus ostreatus*. *Waste Management* 31: 1683–688.
- Fairhead J, Leach M. 2003. “Termites, Society and Ecology: Perspectives from West Africa.” In *Insects in Oral Literature and Traditions*. Motte-Florac E, Thomas J, eds. Leuven, Belgium: Peeters.
- Fairhead J, Scoones I. 2005. Local knowledge and the social shaping of soil investments: critical perspectives on the assessment of soil degradation in Africa. *Land Use Policy* 22: 33–41.
- Fairhead JR. 2016. Termites, mud daubers and their earths: a multispecies approach to fertility and power in West Africa. *Conservation and Society* 14: 359–67.
- Farahany NA, Greely HT, Hyman S, Koch C, Grady C, Paşca SP, Sestan N, Arlotta P, Bernat JL, Ting J, et al. 2018. The ethics of experimenting with human brain tissue. *Nature* 556: 429–32.
- Fellbaum CR, Mensah JA, Cloos AJ, Strahan GE, Pfeffer PE, Kiers TE, Bücking H. 2014. Fungal nutrient allocation in common mycorrhizal networks is regulated by the carbon source strength of individual host plants. *New Phytologist* 203: 646–56.
- Ferguson BA, Dreisbach T, Parks C, Filip G, Schmitt C. 2003. Coarse-scale population structure of pathogenic *Armillaria* species in a mixed-conifer forest in the Blue Mountains of northeast Oregon. *Canadian Journal of Forest Research* 33: 612–23.
- Fernandez CW, Nguyen NH, Stefanski A, Han Y, Hobbie SE, Montgomery RA, Reich PB, Kennedy PG. 2017. Ectomycorrhizal fungal response to warming is linked to poor host performance at the boreal-temperate ecotone. *Global Change Biology* 23: 1598–609.
- Ferreira, B., There’s growing evidence that the universe is connected by giant structures, *Vice* (2019), www.vice.com/en_us/article/zmj7pw/theres-growing-evidence-that-the-universe-is-connected-by-giant-structures [accessed 16 November 2019].
- Field KJ, Cameron DD, Leake JR, Tille S, Bidartondo MI, Beerling DJ. 2012. Contrasting arbuscular mycorrhizal responses of vascular and non-vascular plants to a simulated Palaeozoic CO₂ decline. *Nature Communications* 3: 835.
- Field KJ, Leake JR, Tille S, Allinson KE, Rimington WR, Bidartondo MI, Beerling DJ, Cameron DD. 2015. From mycoheterotrophy to mutualism: mycorrhizal specificity and functioning in *Ophioglossum vulgatum* sporophytes. *New Phytologist* 205: 1492–502.
- Fisher MC, Hawkins NJ, Sanglard D, Gurr SJ. 2018. Worldwide emergence of resistance to antifungal drugs challenges human health and food security. *Science* 360: 739–42.
- Fisher MC, Henk DA, Briggs CJ, Brownstein JS, Madoff LC, McCraw SL, Gurr SJ. 2012. Emerging fungal threats to animal, plant and ecosystem health. *Nature* 484: 186–94.

- Floudas D, Binder M, Riley R, Barry K, Blanchette RA, Henrissat B, Martínez AT, Otillar R, Spatafora JW, Yadav JS, et al. 2012. The Paleozoic origin of enzymatic lignin decomposition reconstructed from 31 fungal genomes. *Science* 336: 1715–719.
- Foley JA, DeFries R, Asner GP, Barford C, Bonan G, Carpenter SR, Chapin SF, Coe MT, Daily GC, Gibbs HK, et al. 2005. Global consequences of land use. *Science* 309: 570–74.
- Francis R, Read DJ. 1984. Direct transfer of carbon between plants connected by vesicular–arbuscular mycorrhizal mycelium. *Nature* 307: 53–56.
- Frank AB. 2005. On the nutritional dependence of certain trees on root symbiosis with belowground fungi (an English translation of A. B. Frank's classic paper of 1885). *Mycorrhiza* 15: 267–75.
- Fredericksen MA, Zhang Y, Hazen ML, Loreto RG, Mangold CA, Chen DZ, Hughes DP. 2017. Three-dimensional visualization and a deep-learning model reveal complex fungal parasite networks in behaviorally manipulated ants. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114: 12590–595.
- Fricker MD, Boddy L, Bebbler DP. 2007a. “Network Organisation of Mycelial Fungi.” In *Biology of the Fungal Cell*. Howard RJ, Gow NAR, eds. Springer International Publishing, pp. 309–30.
- Fricker MD, Heaton LL, Jones NS, Boddy L. 2017. The Mycelium as a Network. *Microbiology Spectrum* 5: FUNK-0033-2017.
- Fricker MD, Lee J, Bebbler D, Tlalka M, Hynes J, Darrah P, Watkinson S, Boddy L. 2008. Imaging complex nutrient dynamics in mycelial networks. *Journal of Microscopy* 231: 317–31.
- Fricker MD, Tlalka M, Bebbler D, Tagaki S, Watkinson SC, Darrah PR. 2007b. Fourier-based spatial mapping of oscillatory phenomena in fungi. *Fungal Genetics and Biology* 44: 1077–84.
- Fries N. 1943. Untersuchungen über Sporenkeimung und Mycelentwicklung bodenbewohnender Hymenomyceten. *Symbolae Botanicae Upsaliensis* 6: 633–664.
- Fritts R. 2019. A new pesticide is all the buzz. *Ars Technica*: arstechnica.com/science/2019/10/now-available-in-the-us-a-pesticide-delivered-by-bees/ [accessed October 29, 2019].
- Fröhlich-Nowoisky J, Pickersgill DA, Després VR, Pöschl U. 2009. High diversity of fungi in air particulate matter. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 106: 12814–819.
- Fukusawa Y, Savoury M, Boddy L. 2019. Ecological memory and relocation decisions in fungal mycelial networks: responses to quantity and location of new resources. *The ISME Journal* 10.1038/s41396-018-0189-7.
- Galland P. 2014. The sporangiophore of *Phycomyces blakesleeana*: a tool to investigate fungal gravireception and graviresponses. *Plant Biology* 16: 58–68.
- Gavito ME, Jakobsen I, Mikkelsen TN, Mora F. 2019. Direct evidence for modulation of photosynthesis by an arbuscular mycorrhiza-induced carbon sink strength. *New Phytologist* 223: 896–907.
- Geml J, Wagner MR. 2018. Out of sight, but no longer out of mind—towards an increased recognition of the role of soil microbes in plant speciation. *New Phytologist* 217: 965–67.

- Giaque H, Hawkes CV. 2013. Climate affects symbiotic fungal endophyte diversity and performance. *American Journal of Botany* 100: 1435–444.
- Gilbert CD, Sigman M. 2007. Brain states: top-down influences in sensory processing. *Neuron* 54: 677–96.
- Gilbert JA, Lynch SV. 2019. Community ecology as a framework for human microbiome research. *Nature Medicine* 25: 884–89.
- Gilbert SF, Sapp J, Tauber AI. 2012. A symbiotic view of life: we have never been individuals. *The Quarterly Review of Biology* 87: 325–41.
- Giovannetti M, Avio L, Fortuna P, Pellegrino E, Sbrana C, Strani P. 2006. At the Root of the Wood Wide Web. *Plant Signaling & Behavior* 1: 1–5.
- Giovannetti M, Avio L, Sbrana C. 2015. “Functional Significance of Anastomosis in Arbuscular Mycorrhizal Networks.” In *Mycorrhizal Networks*. Horton T, ed. Springer International Publishing, pp. 41–67.
- Giovannetti M, Sbrana C, Avio L, Strani P. 2004. Patterns of below-ground plant interconnections established by means of arbuscular mycorrhizal networks. *New Phytologist* 164: 175–81.
- Gluck-Thaler E, Slot JC. 2015. Dimensions of horizontal gene transfer in eukaryotic microbial pathogens. *PLOS Pathogens* 11: e1005156.
- Godfray CH, Beddington JR, Crute IR, Haddad L, Lawrence D, Muir JF, Pretty J, Robinson S, Thomas SM, Toulmin C. 2010. Food security: the challenge of feeding 9 billion people. *Science* 327: 812–18.
- Godfrey-Smith P. 2017. *Other Minds: The Octopus and the Evolution of Intelligent Life*. London, UK: William Collins.
- Goffeau A, Barrell B, Bussey H, Davis R, Dujon B, Feldmann H, Galibert F, Hoheisel J, Jacq C, Johnston M, et al. 1996. Life with 6000 Genes. *Science* 274: 546–67.
- Gogarten PJ, Townsend JP. 2005. Horizontal gene transfer, genome innovation and evolution. *Nature Reviews Microbiology* 3: 679–87.
- Gond SK, Kharwar RN, White JF. 2014. Will fungi be the new source of the blockbuster drug taxol? *Fungal Biology Reviews* 28: 77–84.
- Gontier N. 2015a. “Historical and Epistemological Perspectives on What Horizontal Gene Transfer Mechanisms Contribute to Our Understanding of Evolution.” In *Reticulate Evolution*. Gontier N, ed. Springer International Publishing.
- Gontier N. 2015b. “Reticulate Evolution Everywhere.” In *Reticulate Evolution*. Gontier N, ed. Springer International Publishing.
- Gordon J, Knowlton N, Relman DA, Rohwer F, Youle M. 2013. Superorganisms and holobionts. *Microbe* 8: 152–53.
- Goryachev AB, Lichius A, Wright GD, Read ND. 2012. Excitable behavior can explain the “ping-pong” mode of communication between cells using the same chemoattractant. *BioEssays* 34: 259–66.
- Gozelak MA, Asay AK, Pickles BJ, Simard SW. 2015. Inter-plant communication through mycorrhizal networks mediates complex adaptive behavior in plant communities. *AoB PLANTS* 7: plv050.
- Gott JR. 2016. *The Cosmic Web: Mysterious Architecture of the Universe*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Govoni F, Orrù E, Bonafede A, Iacobelli M, Paladino R, Vazza F, Murgia M, Vacca V, Giovannini G, Feretti L, et al. 2019. A radio ridge connecting two galaxy clusters in a filament of the cosmic web. *Science* 364: 981–84.

- Gow NAR, Morris BM. 2009. The electric fungus. *Botanical Journal of Scotland* 47: 263–77.
- Goward T. 1995. Here for a Long Time, Not a Good Time. *Nature Canada* 24: 9. www.waysofenlichenment.net/public/pdfs/Goward_1995_Here_for_a_good_time_not_a_long_time.pdf [accessed October 29, 2019].
- Goward T. 2009a. Twelve Readings on the Lichen Thallus IV—Re-emergence. *Evansia* 26: 1–6. www.waysofenlichenment.net/ways/readings/essay4 [accessed October 29, 2019].
- Goward T. 2009b. Twelve Readings on the Lichen Thallus V—Conversational. *Evansia* 26: 31–37. www.waysofenlichenment.net/ways/readings/essay5 [accessed October 29, 2019].
- Goward T. 2009c. Twelve Readings on the Lichen Thallus VII—Species. *Evansia* 26: 153–62. www.waysofenlichenment.net/ways/readings/essay7 [accessed October 29, 2019].
- Goward T. 2010. Twelve Readings on the Lichen Thallus VIII—Theoretical. *Evansia* 27: 2–10. www.waysofenlichenment.net/ways/readings/essay8 [accessed October 29, 2019].
- Gregory PH. 1982. Fairy rings; free and tethered. *Bulletin of the British Mycological Society* 16: 161–63.
- Griffiths D. 2015. Queer Theory for Lichens. *UnderCurrents* 19: 36–45.
- Griffiths R, Johnson M, Carducci M, Umbricht A, Richards W, Richards B, Cosimano M, Klinedinst M. 2016. Psilocybin produces substantial and sustained decreases in depression and anxiety in patients with life-threatening cancer: A randomized double-blind trial. *Journal of Psychopharmacology* 30: 1181–197.
- Griffiths R, Richards W, Johnson M, McCann U, Jesse R. 2008. Mystical-type experiences occasioned by psilocybin mediate the attribution of personal meaning and spiritual significance 14 months later. *Journal of Psychopharmacology* 22: 621–32.
- Grman E. 2012. Plant species differ in their ability to reduce allocation to non-beneficial arbuscular mycorrhizal fungi. *Ecology* 93: 711–18.
- Grube M, Cernava T, Soh J, Fuchs S, Aschenbrenner I, Lassek C, Wegner U, Becher D, Riedel K, Sensen CW, et al. 2015. Exploring functional contexts of symbiotic sustain within lichen-associated bacteria by comparative omics. *The ISME Journal* 9: 412–24.
- Gupta M., Prasad A, Ram M, Kumar S. 2002. Effect of the vesicular–arbuscular mycorrhizal (VAM) fungus *Glomus fasciculatum* on the essential oil yield related characters and nutrient acquisition in the crops of different cultivars of menthol mint (*Mentha arvensis*) under field conditions. *Bioresource Technology* 81: 77–79.
- Guzmán G, Allen JW, Gartz J. 1998. A worldwide geographical distribution of the neurotropic fungi, an analysis and discussion. *Annali del Museo Civico di Rovereto: Sezione Archeologia, Storia, Scienze Naturali*. 14: 189–280. www.museocivico.rovereto.tn.it/UploadDocs/104_art09-Guzman%20&%20C.pdf [accessed October 29, 2019].
- Hague T, Florini M, Andrews P. 2013. Preliminary in vitro functional evidence for reflex responses to noxious stimuli in the arms of *Octopus vulgaris*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology* 447: 100–5.

- Hall IR, Brown GT, Zambonelli A. 2007. *Taming the Truffle*. Portland, OR: Timber Press.
- Hamden E. 2019. Observing the cosmic web. *Science* 366: 31–32.
- Haneef M, Ceseracciu L, Canale C, Bayer IS, Heredia-Guerrero JA, Athanasiou A. 2017. Advanced materials from fungal mycelium: fabrication and tuning of physical properties. *Scientific Reports* 7: 41292.
- Hanson KL, Nicolau DV, Filippini L, Wang L, Lee AP, Nicolau DV. 2006. Fungi use efficient algorithms for the exploration of microfluidic networks. *Small* 2: 1212–220.
- Haraway DJ. 2004. *Crystals, Fabrics, and Fields*. Berkeley, CA: North Atlantic Books.
- Haraway DJ. 2016. *Staying with the Trouble: Making Kin in the Chthulucene*. Durham, NC: Duke University Press.
- Harms H, Schlosser D, Wick LY. 2011. Untapped potential: exploiting fungi in bioremediation of hazardous chemicals. *Nature Reviews Microbiology* 9: 177–92.
- Harold FM, Kropf DL, Caldwell JH. 1985. Why do fungi drive electric currents through themselves? *Experimental Mycology* 9: 183–86.
- Hart MM, Antunes PM, Chaudhary V, Abbott LK. 2018. Fungal inoculants in the field: Is the reward greater than the risk? *Functional Ecology* 32: 126–35.
- Hastings A, Abbott KC, Cuddington K, Francis T, Gellner G, Lai Y-C, Morozov A, Petrovskii S, Scranton K, Zeeman M. 2018. Transient phenomena in ecology. *Science* 361: eaat6412.
- Hawksworth D. 2001. The magnitude of fungal diversity: the 1.5 million species estimate revisited. *Mycological Research* 12: 1422–432.
- Hawksworth D. 2009. “Mycology: A Neglected Megascience.” In *Applied Mycology*. Rai M, Bridge PD, eds. Oxford, UK: CABI, pp. 1–16.
- Hawksworth DL, Lücking R. 2017. Fungal Diversity Revisited: 2.2 to 3.8 Million Species. *Microbiology Spectrum* 5: FUNK-00522016.
- Heads SW, Miller AN, Crane LJ, Thomas JM, Ruffatto DM, Methven AS, Raudabaugh DB, Wang Y. 2017. The oldest fossil mushroom. *PLOS ONE* 12: e0178327.
- Hedger J. 1990. Fungi in the tropical forest canopy. *Mycologist* 4: 200–2.
- Held M, Edwards C, Nicolau D. 2009. Fungal intelligence; Or on the behaviour of microorganisms in confined micro-environments. *Journal of Physics: Conference Series* 178: 012005.
- Held M, Edwards C, Nicolau DV. 2011. Probing the growth dynamics of *Neurospora crassa* with microfluidic structures. *Fungal Biology* 115: 493–505.
- Held M, Kašpar O, Edwards C, Nicolau DV. 2019. Intracellular mechanisms of fungal space searching in microenvironments. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116: 13543–552.
- Held M, Lee AP, Edwards C, Nicolau DV. 2010. Microfluidics structures for probing the dynamic behaviour of filamentous fungi. *Microelectronic Engineering* 87: 786–89.
- Helgason T, Daniell T, Husband R, Fitter A, Young J. 1998. Ploughing up the wood-wide web? *Nature* 394: 431–31.

- Hendricks PS. 2018. Awe: a putative mechanism underlying the effects of classic psychedelic-assisted psychotherapy. *International Review of Psychiatry* 30: 1–12.
- Hibbett D, Blanchette R, Kenrick P, Mills B. 2016. Climate, decay, and the death of the coal forests. *Current Biology* 26: R563–R567.
- Hibbett D, Gilbert L, Donoghue M. 2000. Evolutionary instability of ectomycorrhizal symbioses in basidiomycetes. *Nature* 407: 506–08.
- Hickey PC, Dou H, Foshe S, Roper M. 2016. Anti-jamming in a fungal transport network. arXiv:1601:06097v1 (physics.bio-ph).
- Hickey PC, Jacobson D, Read ND, Glass LN. 2002. Live-cell imaging of vegetative hyphal fusion in *Neurospora crassa*. *Fungal Genetics and Biology* 37: 109–19.
- Hillman B. 2018. *Extra Hidden Life, Among the Days*. Middletown, CT: Wesleyan University Press.
- Hiruma K, Kobae Y, Toju H. 2018. Beneficial associations between Brassicaceae plants and fungal endophytes under nutrient-limiting conditions: evolutionary origins and host-symbiont molecular mechanisms. *Current Opinion in Plant Biology* 44: 145–54.
- Hittinger C. 2012. Endless rots most beautiful. *Science* 336: 1649–650.
- Hoch HC, Staples RC, Whitehead B, Comeau J, Wolf ED. 1987. Signaling for growth orientation and cell differentiation by surface topography in *Uromyces*. *Science* 235: 1659–662.
- Hoeksema J. 2015. “Experimentally Testing Effects of Mycorrhizal Networks on Plant-Plant Interactions and Distinguishing Among Mechanisms.” In *Mycorrhizal Networks*. Horton T, ed. Springer International Publishing, pp. 255–77.
- Hoeksema JD, Chaudhary VB, Gehring CA, Johnson NC, Karst J, Koide RT, Pringle A, Zabinski C, Bever JD, Moore JC, et al. 2010. A meta-analysis of context-dependency in plant response to inoculation with mycorrhizal fungi. *Ecology Letters* 13: 394–407.
- Hom EF, Murray AW. 2014. Niche engineering demonstrates a latent capacity for fungal-algal mutualism. *Science* 345: 94–98.
- Honegger R. 2000. Simon Schwendener (1829–1919) and the dual hypothesis of lichens. *The Bryologist* 103: 307–13.
- Honegger R, Edwards D, Axe L. 2012. The earliest records of internally stratified cyanobacterial and algal lichens from the Lower Devonian of the Welsh Borderland. *New Phytologist* 197: 264–75.
- Honegger R, Edwards D, Axe L, Strullu-Derrien C. 2018. Fertile *Prototaxites taiiti*: a basal ascomycete with inoperculate, polysporous asci lacking croziers. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373: 20170146.
- Hooks KB, Kongsman J, O'Malley MA. 2018. Microbiota-gut-brain research: a critical analysis. *Behavioral and Brain Sciences* 42: e60.
- Horie M, Honda T, Suzuki Y, Kobayashi Y, Daito T, Oshida T, Ikuta K, Jern P, Gojobori T, Coffin JM, et al. 2010. Endogenous non-retroviral RNA virus elements in mammalian genomes. *Nature* 463: 84–87.
- Hortal S, Plett K, Plett J, Cresswell T, Johansen M, Pendall E, Anderson I. 2017. Role of plant–fungal nutrient trading and host control in determining the competitive success of ectomycorrhizal fungi. *The ISME Journal* 11: 2666–676.

- Howard A. 1940. *An Agricultural Testament*. Oxford, UK: Oxford University Press. www.journeytoforever.org/farm_library/howardAT/ATtoc.html#-contents [accessed October 29, 2019].
- Howard A. 1945. *Farming and Gardening for Health and Disease*. London, UK: Faber and Faber. journeytoforever.org/farm_library/howardSH/SHtoc.html [accessed October 29, 2019].
- Howard R, Ferrari M, Roach D, Money N. 1991. Penetration of hard substrates by a fungus employing enormous turgor pressures. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 88: 11281–284.
- Hoysted GA, Kowal J, Jacob A, Rimington WR, Duckett JG, Pressel S, Orchard S, Ryan MH, Field KJ, Bidartondo MI. 2018. A mycorrhizal revolution. *Current Opinion in Plant Biology* 44: 1–6.
- Hsueh Y-P, Mahanti P, Schroeder FC, Sternberg PW. 2013. Nematode-Trapping Fungi Eavesdrop on Nematode Pheromones. *Current Biology* 23: 83–86.
- Huffnagle GB, Noverr MC. 2013. The emerging world of the fungal microbiome. *Trends in Microbiology* 21: 334–41.
- Hughes DP. 2013. Pathways to understanding the extended phenotype of parasites in their hosts. *Journal of Experimental Biology* 216: 142–47.
- Hughes DP, Araújo J, Loreto R, Quevillon L, de Bekker C, Evans H. 2016. From so simple a beginning: the evolution of behavioural manipulation by fungi. *Advances in Genetics* 94: 437–69.
- Hughes DP. 2014. On the Origins of Parasite-Extended Phenotypes. *Integrative and Comparative Biology* 54: 210–17.
- Hughes DP, Wappler T, Labandeira CC. 2011. Ancient death-grip leaf scars reveal ant–fungal parasitism. *Biology Letters* 7: 67–70.
- Humboldt A von. 1849. *Cosmos: A Sketch of Physical Description of the Universe*. London, UK: Henry G. Bohn.
- Humboldt A von. 1845. *Kosmos: Entwurf einer physischen Weltbeschreibung*. Stuttgart and Tübingen, GER: J.G. Cotta'schen Buchhandlungen. archive.org/details/b29329693_0001 [accessed October 29, 2019].
- Humphrey N. 1976. “The Social Function of Intellect.” In *Growing Points in Ethology*. Bateson P, Hindle RA, eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 303–17.
- Hustak C, Myers N. 2012. Evolutionary momentum: affective ecologies and the sciences of plant/insect encounters. *Differences* 23: 74–118.
- Hyde K, Jones E, Leano E, Pointing S, Poonyth A, Vrijmoed L. 1998. Role of fungi in marine ecosystems. *Biodiversity and Conservation* 7: 1147–161.
- Ingold T. 2003. “Two Reflections on Ecological Knowledge.” In *Nature Knowledge: Ethnoscience, Cognition, and Utility*. Sanga G, Ortalli G, eds. Oxford, UK: Berghahn Books, pp. 301–11.
- Islam F, Ohga S. 2012. The response of fruit body formation on *Tricholoma matsutake* in situ condition by applying electric pulse stimulator. *ISRN Agronomy* 2012: 1–6.
- Jackson S, Heath I. 1992. UV microirradiations elicit Ca²⁺-dependent apex-directed cytoplasmic contractions in hyphae. *Protoplasma* 170: 46–52.
- Jacobs LF, Arter J, Cook A, Sulloway FJ. 2015. Olfactory orientation and navigation in humans. *PLOS ONE* 10: e0129387.
- Jacobs R. 2019. *The Truffle Underground*. New York, NY: Clarkson Potter.

- Jakobsen I, Hammer E. 2015. "Nutrient Dynamics in Arbuscular Mycorrhizal Networks." In *Mycorrhizal Networks*. Horton T, ed. Springer International Publishing, pp. 91–131.
- James W. 2002. *The Varieties of Religious Experience: A Study in Human Nature (Centenary Edition)*. London, UK: Routledge.
- Jedd G, Pieuchot L. 2012. Multiple modes for gatekeeping at fungal cell-to-cell channels. *Molecular Microbiology* 86: 1291–294.
- Jenkins B, Richards TA. 2019. Symbiosis: wolf lichens harbour a choir of fungi. *Current Biology* 29: R88–R90.
- Ji B, Bever JD. 2016. Plant preferential allocation and fungal reward decline with soil phosphorus: implications for mycorrhizal mutualism. *Ecosphere* 7: e01256.
- Johnson D, Gamow R. 1971. The avoidance response in *Phycomyces*. *The Journal of General Physiology* 57: 41–49.
- Johnson MW, Garcia-Romeu A, Cosimano MP, Griffiths RR. 2014. Pilot study of the 5-HT 2AR agonist psilocybin in the treatment of tobacco addiction. *Journal of Psychopharmacology* 28: 983–92.
- Johnson MW, Garcia-Romeu A, Griffiths RR. 2015. Long-term follow-up of psilocybin-facilitated smoking cessation. *The American Journal of Drug and Alcohol Abuse* 43: 55–60.
- Johnson MW, Garcia-Romeu A, Johnson PS, Griffiths RR. 2017. An online survey of tobacco smoking cessation associated with naturalistic psychedelic use. *Journal of Psychopharmacology* 31: 841–50.
- Johnson NC, Angelard C, Sanders IR, Kiers TE. 2013. Predicting community and ecosystem outcomes of mycorrhizal responses to global change. *Ecology Letters* 16: 140–53.
- Jolivet E, L'Haridon S, Corre E, Forterre P, Prieur D. 2003. *Thermococcus gammatolerans* sp. nov., a hyperthermophilic archaeon from a deep-sea hydrothermal vent that resists ionizing radiation. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* 53: 847–51.
- Jones MP, Lawrie AC, Huynh TT, Morrison PD, Mautner A, Bismarck A, John S. 2019. Agricultural by-product suitability for the production of chitinous composites and nanofibers. *Process Biochemistry* 80: 95–102.
- Jönsson KI, Rabbow E, Schill RO, Harms-Ringdahl M, Rettberg P. 2008. Tardigrades survive exposure to space in low Earth orbit. *Current Biology* 18: R729–R731.
- Jönsson KI, Wojcik A. 2017. Tolerance to X-rays and heavy ions (Fe, He) in the tardigrade *Richtersius coronifer* and the bdelloid rotifer *Mniobia russeola*. *Astrobiology* 17: 163–67.
- Kaminsky LM, Trexler RV, Malik RJ, Hockett KL, Bell TH. 2018. The inherent conflicts in developing soil microbial inoculants. *Trends in Biotechnology* 37: 140–51.
- Kammerer L, Hiersche L, Wirth E. 1994. Uptake of radiocaesium by different species of mushrooms. *Journal of Environmental Radioactivity* 23: 135–50.
- Karst J, Erbilgin N, Pec GJ, Cigan PW, Najar A, Simard SW, Cahill JF. 2015. Ectomycorrhizal fungi mediate indirect effects of a bark beetle outbreak on secondary chemistry and establishment of pine seedlings. *New Phytologist* 208: 904–14.

- Katz SE. 2003. *Wild Fermentation*. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing Company.
- Kavaler L. 1967. *Mushrooms, Moulds and Miracles: The Strange Realm of Fungi*. London, UK: George G. Harrap & Co.
- Keijzer FA. 2017. Evolutionary convergence and biologically embodied cognition. *Journal of the Royal Society Interface Focus* 7: 20160123.
- Keller EF. 1984. *A Feeling for the Organism*. New York, NY: Times Books.
- Kelly JR, Borre Y, O'Brien C, Patterson E, Aidy El S, Deane J, Kennedy PJ, Beers S, Scott K, Moloney G, et al. 2016. Transferring the blues: Depression-associated gut microbiota induces neurobehavioural changes in the rat. *Journal of Psychiatric Research* 82: 109–18.
- Kelty C. 2010. Outlaw, hackers, victorian amateurs: diagnosing public participation in the life sciences today. *Journal of Science Communication* 9.
- Kendi IX. 2017. *Stamped from the Beginning*. New York, NY: Nation Books.
- Kennedy PG, Walker JKM, Bogar LM. 2015. “Interspecific Mycorrhizal Networks and Non-networking Hosts: Exploring the Ecology of the Host Genus *Alnus*.” In *Mycorrhizal Networks*. Horton T, ed. Springer International Publishing, pp. 227–54.
- Kerényi C. 1976. *Dionysus: Archetypal Image of Indestructible Life*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Kern VD. 1999. Gravitropism of basidiomycetous fungi—On Earth and in microgravity. *Advances in Space Research* 24: 697–706.
- Khan S, Nadir S, Shah Z, Shah A, Karunarathna SC, Xu J, Khan A, Munir S, Hasan F. 2017. Biodegradation of polyester polyurethane by *Aspergillus tubingensis*. *Environmental Pollution* 225: 469–80.
- Kiers ET, Denison RF. 2014. Inclusive fitness in agriculture. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 369: 20130367.
- Kiers TE, Duhamel M, Beesetty Y, Mensah JA, Franken O, Verbruggen E, Fellbaum C, Fellbaum CR, Kowalchuk GA, et al. 2011. Reciprocal rewards stabilize cooperation in the mycorrhizal symbiosis. *Science* 333: 880–82.
- Kiers TE, West SA, Wyatt GA, Gardner A, Bücking H, Werner GD. 2016. Misconceptions on the application of biological market theory to the mycorrhizal symbiosis. *Nature Plants* 2: 16063.
- Kim G, LeBlanc ML, Wafula EK, dePamphilis CW, Westwood JH. 2014. Genomic-scale exchange of mRNA between a parasitic plant and its hosts. *Science* 345: 808–11.
- Kimmerer RW. 2013. *Braiding Sweetgrass*. Minneapolis, MN: Milkweed Editions.
- King A. 2017. Technology: The Future of Agriculture. *Nature* 544: S21–S23.
- King FH. 1911. *Farmers of Forty Centuries*. Emmaus, PA: Organic Gardening Press. soilandhealth.org/wp-content/uploads/01aglibrary/010122king/ffc.html [accessed October 29, 2019].
- Kivlin SN, Emery SM, Rudgers JA. 2013. Fungal symbionts alter plant responses to global change. *American Journal of Botany* 100: 1445–457.
- Klein A-M, Vaissière BE, Cane JH, Steffan-Dewenter I, Cunningham SA, Kremen C, Tscharntke T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *Proceedings of the Royal Society B* 274: 303–13.
- Klein T, Siegwolf RT, Körner C. 2016. Belowground carbon trade among tall trees in a temperate forest. *Science* 352: 342–44.

- Kozo-Polyanksy BM. 2010. *Symbiogenesis: A New Principle of Evolution*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Krebs TS, Johansen P-Ø. 2012. Lysergic acid diethylamide (LSD) for alcoholism: meta-analysis of randomized controlled trials. *Journal of Psychopharmacology* 26: 994–1002.
- Kroken S. 2007. “Miss Potter’s First Love”—A Rejoinder. *Inoculum* 58: 14.
- Kusari S, Singh S, Jayabaskaran C. 2014. Biotechnological potential of plant-associated endophytic fungi: hope versus hype. *Trends in Biotechnology* 32: 297–303.
- Ladinsky D. 2002. *Love Poems from God*. New York, NY: Penguin.
- Ladinsky D. 2010. *A Year with Hafiz: Daily Contemplations*. New York, NY: Penguin.
- Lai J, Koh C, Tjota M, Pieuchot L, Raman V, Chandrababu K, Yang D, Wong L, Jedd G. 2012. Intrinsically disordered proteins aggregate at fungal cell-to-cell channels and regulate intercellular connectivity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 15781–786.
- Lalley J, Viles H. 2005. Terricolous lichens in the northern Namib Desert of Namibia: distribution and community composition. *The Lichenologist* 37: 77–91.
- Lanfranco L, Fiorilli V, Gutjahr C. 2018. Partner communication and role of nutrients in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *New Phytologist* 220: 1031–46.
- Latty T, Beekman M. 2011. Irrational decision-making in an amoeboid organism: transitivity and context-dependent preferences. *Proceedings of the Royal Society B* 278: 307–12.
- Leake J, Johnson D, Donnelly D, Muckle G, Boddy L, Read D. 2004. Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystem functioning. *Canadian Journal of Botany* 82: 1016–45.
- Leake J, Read D. 2017. “Mycorrhizal Symbioses and Pedogenesis Throughout Earth’s History.” In *Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage*. Johnson N, Gehring C, Jansa J, eds. Oxford, UK: Elsevier, pp. 9–33.
- Leary T. 2005. “The Initiation of the ‘High Priest’.” In *Sacred Mushroom of Visions: Teonanacatl*. Metzner R, ed. Rochester, VT: Park Street Press, 160–78.
- Lederberg J. 1952. Cell genetics and hereditary symbiosis. *Physiological Reviews* 32: 403–30.
- Lederberg J, Cowie D. 1958. Moondust; the study of this covering layer by space vehicles may offer clues to the biochemical origin of life. *Science* 127: 1473–475.
- Ledford H. 2019. Billion-year-old fossils set back evolution of earliest fungi. *Nature*: www.nature.com/articles/d41586-019-01629-1 [accessed October 29, 2019].
- Lee NN, Friz J, Fries MD, Gil JF, Beck A, Pellinen-Wannberg A, Schmitz B, Steele A, Hofmann BA. 2017. “The Extreme Biology of Meteorites: Their Role in Understanding the Origin and Distribution of Life on Earth and in the Universe.” In *Adaptation of Microbial Life to Environmental Ex-*

- tremes*. Stan-Lotter H, Fendrihan S, eds. Springer International Publishing, pp. 283–325.
- Lee Y, Mazmanian SK. 2010. Has the microbiota played a critical role in the evolution of the adaptive immune system? *Science* 330: 1768–773.
- Legras J, Merdinoglu D, Couet J, Karst F. 2007. Bread, beer and wine: *Saccharomyces cerevisiae* diversity reflects human history. *Molecular Ecology* 16: 2091–102.
- Le Guin U. 2017. “Deep in Admiration.” In *Arts of Living on a Damaged Planet: Ghosts of the Anthropocene*. Tsing A, Swanson H, Gan E, Bubandt N, eds. Minneapolis, MN: University of Minnesota Press, pp. M15–M21.
- Lehmann A, Leifheit EF, Rillig MC. 2017. “Mycorrhizas and Soil Aggregation.” In *Mycorrhizal Mediation of Soil: Fertility, Structure, and Carbon Storage*. Johnson N, Gehring C, Jansa J, eds. Oxford, UK: Elsevier, pp. 241–62.
- Leifheit EF, Veresoglou SD, Lehmann A, Morris KE, Rillig MC. 2014. Multiple factors influence the role of arbuscular mycorrhizal fungi in soil aggregation—a meta-analysis. *Plant and Soil* 374: 523–37.
- Lekberg Y, Helgason T. 2018. *In situ* mycorrhizal function—knowledge gaps and future directions. *New Phytologist* 220: 957–62.
- Leonhardt Y, Kakoschke S, Wagener J, Ebel F. 2017. Lah is a transmembrane protein and requires Spa10 for stable positioning of Woronin bodies at the septal pore of *Aspergillus fumigatus*. *Scientific Reports* 7: 44179.
- Letcher A. 2006. *Shroom: A Cultural History of the Magic Mushroom*. London, UK: Faber and Faber.
- Levin M. 2012. Morphogenetic fields in embryogenesis, regeneration, and cancer: non-local control of complex patterning. *Biosystems* 109: 243–61.
- Levin M. 2011. The wisdom of the body: future techniques and approaches to morphogenetic fields in regenerative medicine, developmental biology and cancer. *Regenerative Medicine* 6: 667–73.
- Levin SA. 2005. Self-organization and the emergence of complexity in ecological systems. *BioScience* 55: 1075–79.
- Lévi-Strauss C. 1973. *From Honey to Ashes: Introduction to a Science of Mythology, 2*. New York, NY: Harper & Row.
- Lewontin R. 2001. *It Ain't Necessarily So: The Dream of the Human Genome and Other Illusions*. New York, NY: New York Review of Books.
- Lewontin R. 2000. *The Triple Helix: Gene, Organism, and Environment*. Cambridge, MA: Harvard University Press.
- Li N, Alfiky A, Vaughan MM, Kang S. 2016. Stop and smell the fungi: fungal volatile metabolites are overlooked signals involved in fungal interaction with plants. *Fungal Biology Reviews* 30: 134–44.
- Li Q, Yan L, Ye L, Zhou J, Zhang B, Peng W, Zhang X, Li X. 2018. Chinese black truffle (*Tuber indicum*) alters the ectomycorrhizosphere and endoectomycosphere microbiome and metabolic profiles of the host tree *Quercus aliena*. *Frontiers in Microbiology* 9: 2202.
- Lindahl B, Finlay R, Olsson S. 2001. Simultaneous, bidirectional translocation of 32P and 33P between wood blocks connected by mycelial cords of *Hypholoma fasciculare*. *New Phytologist* 150: 189–94.

- Linnakoski R, Reshamwala D, Veteli P, Cortina-Escribano M, Vanhanen H, Marjomäki V. 2018. Antiviral agents from fungi: diversity, mechanisms and potential applications. *Frontiers in Microbiology* 9: 2325.
- Lintott C. 2019. *The Crowd and the Cosmos: Adventures in the Zooniverse*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Lipnicki LI. 2015. The role of symbiosis in the transition of some eukaryotes from aquatic to terrestrial environments. *Symbiosis* 65: 39–53.
- Liu J, Martinez-Corral R, Prindle A, Lee D-YD, Larkin J, Gabalda-Sagarra M, Garcia-Ojalvo J, Süel GM. 2017. Coupling between distant biofilms and emergence of nutrient time-sharing. *Science* 356: 638–42.
- Lohberger A, Spangenberg JE, Ventura Y, Bindschedler S, Verrecchia EP, Bshary R, Junier P. 2019. Effect of organic carbon and nitrogen on the interactions of *Morchella* spp. and bacteria dispersing on their mycelium. *Frontiers in Microbiology* 10: 124.
- López-Franco R, Bracker CE. 1996. Diversity and dynamics of the Spitzenkörper in growing hyphal tips of higher fungi. *Protoplasma* 195: 90–111.
- Loron CC, François C, Rainbird RH, Turner EC, Borensztajn S, Javaux EJ. 2019. Early fungi from the Proterozoic era in Arctic Canada. *Nature* 570: 232–35.
- Lovett B, Bilgo E, Millogo S, Ouattara A, Sare I, Gnambani E, Dabire RK, Diabate A, Leger RJ. 2019. Transgenic *Metarhizium* rapidly kills mosquitoes in a malaria-endemic region of Burkina Faso. *Science* 364: 894–97.
- Lu C, Yu Z, Tian H, Hennessy DA, Feng H, Al-Kaisi M, Zhou Y, Sauer T, Arritt R. 2018. Increasing carbon footprint of grain crop production in the US Western Corn Belt. *Environmental Research Letters* 13: 124007.
- Luo J, Chen X, Crump J, Zhou H, Davies DG, Zhou G, Zhang N, Jin C. 2018. Interactions of fungi with concrete: Significant importance for bio-based self-healing concrete. *Construction and Building Materials* 164: 275–85.
- Lutzoni F, Nowak MD, Alfaro ME, Reeb V, Miadlikowska J, Krug M, Arnold EA, Lewis LA, Swofford DL, Hibbett D, et al. 2018. Contemporaneous radiations of fungi and plants linked to symbiosis. *Nature Communications* 9: 5451.
- Lutzoni F, Pagel M, Reeb V. 2001. Major fungal lineages are derived from lichen symbiotic ancestors. *Nature* 411: 937–40.
- Ly C, Greb AC, Cameron LP, Wong JM, Barragan EV, Wilson PC, Burbach KF, Zarandi S, Sood A, Paddy MR, et al. 2018. Psychedelics promote structural and functional neural plasticity. *Cell Reports* 23: 3170–182.
- Lyons T, Carhart-Harris RL. 2018. Increased nature relatedness and decreased authoritarian political views after psilocybin for treatment-resistant depression. *Journal of Psychopharmacology* 32: 811–19.
- Ma Z, Guo D, Xu X, Lu M, Bardgett RD, Eissenstat DM, McCormack LM, Hedin LO. 2018. Evolutionary history resolves global organization of root functional traits. *Nature* 555: 94–97.
- MacLean KA, Johnson MW, Griffiths RR. 2011. Mystical experiences occasioned by the hallucinogen psilocybin lead to increases in the personality domain of openness. *Journal of Psychopharmacology* 25: 1453–461.
- Mangold CA, Ishler MJ, Loreto RG, Hazen ML, Hughes DP. 2019. Zombie ant death grip due to hypercontracted mandibular muscles. *Journal of Experimental Biology* 222: jeb200683.

- Manicka S, Levin M. 2019. The Cognitive Lens: a primer on conceptual tools for analysing information processing in developmental and regenerative morphogenesis. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 374: 20180369.
- Manoharan L, Rosenstock NP, Williams A, Hedlund K. 2017. Agricultural management practices influence AMF diversity and community composition with cascading effects on plant productivity. *Applied Soil Ecology* 115: 53–59.
- Mardhiah U, Caruso T, Gurnell A, Rillig MC. 2016. Arbuscular mycorrhizal fungal hyphae reduce soil erosion by surface water flow in a greenhouse experiment. *Applied Soil Ecology* 99: 137–40.
- Margonelli L. 2018. *Underbug: An Obsessive Tale of Termites and Technology*. New York, NY: Farrar, Straus and Giroux.
- Margulis L. 1996. “Gaia Is a Tough Bitch.” In *The Third Culture: Beyond the Scientific Revolution*. John Brockman, ed. New York, NY: Touchstone.
- Margulis L. 1981. *Symbiosis in Cell Evolution: Life and Its Environment on the Early Earth*. San Francisco, CA: W. H. Freeman and Company.
- Margulis L. 1999. *The Symbiotic Planet: A New Look at Evolution*. London, UK: Phoenix.
- Markram H, Muller E, Ramaswamy S, Reimann MW, Abdellah M, Sanchez C, Ailamaki A, Alonso-Nanclares L, Antille N, Arsever S, et al. 2015. Reconstruction and simulation of neocortical microcircuitry. *Cell* 163: 456–92.
- Marley G. 2010. *Chanterelle Dreams, Amanita Nightmares: The Love, Lore, and Mystique of Mushrooms*. White River Junction, VT: Chelsea Green Publishing Company.
- Márquez LM, Redman RS, Rodriguez RJ, Roossinck MJ. 2007. A virus in a fungus in a plant: three-way symbiosis required for thermal tolerance. *Science* 315: 513–15.
- Martin FM, Uroz S, Barker DG. 2017. Ancestral alliances: Plant mutualistic symbioses with fungi and bacteria. *Science* 356: eaad4501.
- Martínez-Corral R, Liu J, Prindle A, Süel GM, García-Ojalvo J. 2019. Metabolic basis of brain-like electrical signalling in bacterial communities. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 374: 20180382.
- Martínez-García LB, De Deyn GB, Pugnaire FI, Kothamasi D, van der Heijden MG. 2017. Symbiotic soil fungi enhance ecosystem resilience to climate change. *Global Change Biology* 23: 5228–236.
- Masiulionis VE, Weber RW, Pagnocca FC. 2013. Foraging of *Psilocybe* basidiocarps by the leaf-cutting ant *Acromyrmex lobicornis* in Santa Fé, Argentina. *SpringerPlus* 2: 254.
- Mateus ID, Masclaux FG, Aletti C, Rojas EC, Savary R, Dupuis C, Sanders IR. 2019. Dual RNA-seq reveals large-scale non-conserved genotype × genotype-specific genetic reprogramming and molecular crosstalk in the mycorrhizal symbiosis. *The ISME Journal* 13: 1226–238.
- Matossian MK. 1982. Ergot and the Salem Witchcraft Affair: An outbreak of a type of food poisoning known as convulsive ergotism may have led to the 1692 accusations of witchcraft. *American Scientist* 70: 355–57.
- Matsuura K, Yashiro T, Shimizu K, Tatsumi S, Tamura T. 2009. Cuckoo fungus mimics termite eggs by producing the cellulose-digesting enzyme β-Glucosidase. *Current Biology* 19: 30–36.

- Matsuura Y, Moriyama M, Łukasik P, Vanderpool D, Tanahashi M, Meng X-Y, McCutcheon JP, Fukatsu T. 2018. Recurrent symbiont recruitment from fungal parasites in cicadas. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: E5970–E5979.
- Maugh TH. 1982. The scent makes sense. *Science* 215: 1224.
- Maxman A. 2019. CRISPR might be the banana's only hope against a deadly fungus. *Nature*: www.nature.com/articles/d41586-019-02770-7 [accessed October 29, 2019].
- Mazur S. 2009. Lynn Margulis: Intimacy of Strangers & Natural Selection. *Scoop*: www.scoop.co.nz/stories/HL0903/S00194/lynn-margulis-intimacy-of-strangers-natural-selection.htm [accessed October 29, 2019].
- Mazzucato L, Camera LG, Fontanini A. 2019. Expectation-induced modulation of metastable activity underlies faster coding of sensory stimuli. *Nature Neuroscience* 22: 787–796.
- McCoy P. 2016. *Radical Mycology: A Treatise on Working and Seeing with Fungi*. Portland, OR: Chthaeus Press.
- McFall-Ngai M. 2007. Adaptive Immunity: Care for the community. *Nature* 445: 153.
- McGann JP. 2017. Poor human olfaction is a 19th-century myth. *Science* 356: eaam7263.
- McGuire KL. 2007. Common ectomycorrhizal networks may maintain monodominance in a tropical rain forest. *Ecology* 88: 567–74.
- McKenna D. 2012. *Brotherhood of the Screaming Abyss*. Clearwater, MN: North Star Press of St. Cloud Inc.
- McKenna T. 1992. *Food of the Gods: The Search for the Original Tree of Knowledge*. New York, NY: Bantam Books.
- McKenna T, McKenna D (Oss OT, Oeric ON). 1976. *Psilocybin: Magic Mushroom Grower's Guide*. Berkeley, CA: AND/OR Press.
- McKenzie RN, Horton BK, Loomis SE, Stockli DF, Planavsky NJ, Lee C-TA. 2016. Continental arc volcanism as the principal driver of icehouse-greenhouse variability. *Science* 352: 444–47.
- McKerracher L, Heath I. 1986a. Fungal nuclear behavior analysed by ultraviolet microbeam irradiation. *Cell Motility and the Cytoskeleton* 6: 35–47.
- McKerracher L, Heath I. 1986b. Polarized cytoplasmic movement and inhibition of saltations induced by calcium-mediated effects of microbeams in fungal hyphae. *Cell Motility and the Cytoskeleton* 6: 136–45.
- Meeßen J, Backhaus T, Brandt A, Raguse M, Böttger U, de Vera JP, de la Torre R. 2017. The effect of high-dose ionizing radiation on the isolated photobiont of the astrobiological model lichen *Circinaria gyrosa*. *Astrobiology* 17: 154–62.
- Mejía LC, Herre EA, Sparks JP, Winter K, García MN, Bael SA, Stitt J, Shi Z, Zhang Y, Guiltinan MJ, et al. 2014. Pervasive effects of a dominant foliar endophytic fungus on host genetic and phenotypic expression in a tropical tree. *Frontiers in Microbiology* 5: 479.
- Merckx V. 2013. "Mycoheterotrophy: An Introduction." In *Mycoheterotrophy—The Biology of Plants Living on Fungi*. Merckx V, ed. Springer International Publishing, pp. 1–18.
- Merleau-Ponty M. 2002. *Phenomenology of Perception*. London, UK: Routledge Classics.

- Meskkauskas A, McNulty LJ, Moore D. 2004. Concerted regulation of all hyphal tips generates fungal fruit body structures: experiments with computer visualizations produced by a new mathematical model of hyphal growth. *Mycological Research* 108: 341–53.
- Metzner R. 2005. “Introduction: Visionary Mushrooms of the Americas.” In *Sacred Mushroom of Visions: Teonanacatl*. Metzner R, ed. Rochester, VT: Park Street Press, pp. 1–48.
- Miller MJ, Albarracin-Jordan J, Moore C, Capriles JM. 2019. Chemical evidence for the use of multiple psychotropic plants in a 1,000-year-old ritual bundle from South America. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116: 11207–212.
- Mills BJ, Batterman SA, Field KJ. 2017. Nutrient acquisition by symbiotic fungi governs Palaeozoic climate transition. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 373: 20160503.
- Milner DS, Attah V, Cook E, Maguire F, Savory FR, Morrison M, Müller CA, Foster PG, Talbot NJ, Leonard G, et al. 2019. Environment-dependent fitness gains can be driven by horizontal gene transfer of transporter-encoding genes. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116: 201815994.
- Moeller HV, Neubert MG. 2016. Multiple friends with benefits: an optimal mutualist management strategy? *The American Naturalist* 187: E1–E12.
- Mohajeri HM, Brummer RJ, Rastall RA, Weersma RK, Harmsen HJ, Faas M, Eggensdorfer M. 2018. The role of the microbiome for human health: from basic science to clinical applications. *European Journal of Nutrition* 57: 1–14.
- Mohan JE, Cowden CC, Baas P, Dawadi A, Frankson PT, Helmick K, Hughes E, Khan S, Lang A, Machmuller M, et al. 2014. Mycorrhizal fungi mediation of terrestrial ecosystem responses to global change: mini-review. *Fungal Ecology* 10: 3–19.
- Moisan K, Cordovez V, van de Zande EM, Raaijmakers JM, Dicke M, Lucas-Barbosa D. 2019. Volatiles of pathogenic and non-pathogenic soil-borne fungi affect plant development and resistance to insects. *Oecologia* 190: 589–604.
- Monaco E. 2017. The Secret History of Paris’s Catacomb Mushrooms. *Atlas Obscura*: www.atlasobscura.com/articles/paris-catacomb-mushrooms [accessed October 29, 2019].
- Mondo SJ, Lastovetsky OA, Gaspar ML, Schwardt NH, Barber CC, Riley R, Sun H, Grigoriev IV, Pawlowska TE. 2017. Bacterial endosymbionts influence host sexuality and reveal reproductive genes of early divergent fungi. *Nature Communications* 8: 1843.
- Money NP. 2013. Against the naming of fungi. *Fungal Biology* 117: 463–65.
- Money NP. 2004a. The fungal dining habit: a biomechanical perspective. *Mycologist* 18: 71–76.
- Money NP. 2016. *Fungi: A Very Short Introduction*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Money NP. 1999. Fungus punches its way in. *Nature* 401: 332–33.
- Money NP. 1998. More g’s than the Space Shuttle: ballistospore discharge. *Mycologia* 90: 547.
- Money NP. 2018. *The Rise of Yeast*. Oxford, UK: Oxford University Press.

- Money NP. 2004b. Theoretical biology: mushrooms in cyberspace. *Nature* 431: 32.
- Money NP. 2007. *Triumph of the Fungi: A Rotten History*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Montañez I. 2016. A Late Paleozoic climate window of opportunity. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113: 2334–336.
- Montiel-Castro AJ, González-Cervantes RM, Bravo-Ruiseco G, Pacheco-López G. 2013. The microbiota-gut-brain axis: neurobehavioral correlates, health and sociality. *Frontiers in Integrative Neuroscience* 7: 70.
- Moore D. 2013a. *Fungal Biology in the Origin and Emergence of Life*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Moore D. 1996. Graviresponses in fungi. *Advances in Space Research* 17: 73–82.
- Moore D. 2005. Principles of mushroom developmental biology. *International Journal of Medicinal Mushrooms* 7: 79–101.
- Moore, D. 2013b. *Slayers, Saviors, Servants, and Sex: An Exposé of Kingdom Fungi*. Springer International Publishing.
- Moore D, Hock B, Greening JP, Kern VD, Frazer L, Monzer J. 1996. Gravimorphogenesis in agarics. *Mycological Research* 100: 257–73.
- Moore D, Robson GD, Trinci APJ. 2011. *21st Century Guidebook to Fungi*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Mousavi SA, Chauvin A, Pascaud F, Kellenberger S, Farmer EE. 2013. GLUTAMATE RECEPTOR-LIKE genes mediate leaf-to-leaf wound signalling. *Nature* 500: 422–26.
- Muday GK, Brown-Harding H. 2018. Nervous system-like signaling in plant defense. *Science* 361: 1068–69.
- Mueller RC, Scudder CM, Whitham TG, Gehring CA. 2019. Legacy effects of tree mortality mediated by ectomycorrhizal fungal communities. *New Phytologist* 224: 155–65.
- Muir J. 1912. *The Yosemite*. New York, NY: The Century Company. vault.sieraclub.org/john_muir_exhibit/writings/the_yosemite/ [accessed October 29, 2019].
- Myers N. 2014. Conversations on plant sensing: notes from the field. *NatureCulture* 3: 35–66.
- Naef R. 2011. The volatile and semi-volatile constituents of agarwood, the infected heartwood of *Aquilaria* species: a review. *Flavour and Fragrance Journal* 26: 73–87.
- Nakagaki T, Yamada H, Tóth A. 2000. Maze-solving by an amoeboid organism. *Nature* 407: 470.
- Nelson ML, Dinardo A, Hochberg J, Armelagos GJ. 2010. Mass spectroscopic characterization of tetracycline in the skeletal remains of an ancient population from Sudanese Nubia 350–550 CE. *American Journal of Physical Anthropology* 143: 151–54.
- Nelsen MP, DiMichele WA, Peters SE, Boyce KC. 2016. Delayed fungal evolution did not cause the Paleozoic peak in coal production. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 113: 2442–447.
- Newman EI. 1988. Mycorrhizal links between plants: their functioning and ecological significance. *Advances in Ecological Research* 18: 243–70.

- Nikolova I, Johanson KJ, Dahlberg A. 1997. Radiocaesium in fruitbodies and mycorrhizae in ectomycorrhizal fungi. *Journal of Environmental Radioactivity* 37: 115–25.
- Niksic M, Hadzic I, Glisic M. 2004. Is *Phallus impudicus* a mycological giant? *Mycologist* 18: 21–22.
- Noë R, Hammerstein P. 1995. Biological markets. *Trends in Ecology & Evolution* 10: 336–39.
- Noë R, Kiers TE. 2018. Mycorrhizal Markets, Firms, and Co-ops. *Trends in Ecology & Evolution* 33: 777–89.
- Nordbring-Hertz B. 2004. Morphogenesis in the nematode-trapping fungus *Arthrobotrys oligospora*—an extensive plasticity of infection structures. *Mycologist* 18: 125–33.
- Nordbring-Hertz B, Jansson H, Tunlid A. 2011. “Nematophagous Fungi.” In *Encyclopedia of Life Sciences*. Chichester, UK: John Wiley & Sons Ltd.
- Novikova N, Boever P, Poddubko S, Deshevaya E, Polikarpov N, Rakova N, Coninx I, Mergeay M. 2006. Survey of environmental biocontamination on board the International Space Station. *Research in Microbiology* 157: 5–12.
- Oettmeier C, Brix K, Döbereiner H-G. 2017. *Physarum polycephalum*—a new take on a classic model system. *Journal of Physics D: Applied Physics* 50: 41.
- Oliveira AG, Stevani CV, Waldenmaier HE, Viviani V, Emerson JM, Loros JJ, Dunlap JC. 2015. Circadian control sheds light on fungal bioluminescence. *Current Biology* 25: 964–68.
- Olsson S. 2009. “Nutrient Translocation and Electrical Signalling in Mycelia.” In *The Fungal Colony*. Gow NAR, Robson GD, Gadd GM, eds. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 25–48.
- Olsson S, Hansson B. 1995. Action potential-like activity found in fungal mycelia is sensitive to stimulation. *Naturwissenschaften* 82: 30–31.
- O'Malley MA. 2015. Endosymbiosis and its implications for evolutionary theory. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 112: 10270–277.
- Oolbekkink GT, Kuyper TW. 1989. Radioactive caesium from Chernobyl in fungi. *Mycologist* 3: 3–6.
- O'Regan HJ, Lamb AL, Wilkinson DM. 2016. The missing mushrooms: Searching for fungi in ancient human dietary analysis. *Journal of Archaeological Science* 75: 139–43.
- Orrell P. 2018. *Linking Above and Below-Ground Interactions in Agro-Ecosystems: An Ecological Network Approach*. PhD thesis, University of Newcastle, Newcastle, UK. theses.ncl.ac.uk/jspui/handle/10443/4102 [accessed October 29, 2019].
- Osborne OG, De-Kayne R, Bidartondo MI, Hutton I, Baker WJ, Turnbull CG, Savolainen V. 2018. Arbuscular mycorrhizal fungi promote coexistence and niche divergence of sympatric palm species on a remote oceanic island. *New Phytologist* 217: 1254–266.
- Ott J. 2002. Pharmaka, philtres, and pheromones. Getting high and getting off. *MAPS* XII: 26–32.
- Otto S, Bruni EP, Harms H, Wick LY. 2017. Catch me if you can: dispersal and foraging of *Bdellovibrio bacteriovorus* 109J along mycelia. *The ISME Journal* 11: 386–93.

- Ouellette NT. 2019. Flowing crowds. *Science* 363: 27–28.
- Oukarroum A, Gharous M, Strasser RJ. 2017. Does *Parmelina tiliacea* lichen photosystem II survive at liquid nitrogen temperatures? *Cryobiology* 74: 160–62.
- Ovid. 1958. *Ovid: The Metamorphoses*. Gregory H., trans. New York, NY: Viking Press.
- Pagán OR. 2019. The brain: a concept in flux. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 374: 20180383.
- Paglia C. 2001. *Sexual Personae: Art and Decadence from Nefertiti to Emily Dickinson*. New Haven, CT: Yale University Press.
- Pan X, Pike A, Joshi D, Bian G, McFadden MJ, Lu P, Liang X, Zhang F, Raikhel AS, Xi Z. 2017. The bacterium *Wolbachia* exploits host innate immunity to establish a symbiotic relationship with the dengue vector mosquito *Aedes aegypti*. *The ISME Journal* 12: 277–88.
- Patra S, Banerjee S, Terejanu G, Chanda A. 2015. Subsurface pressure profiling: a novel mathematical paradigm for computing colony pressures on substrate during fungal infections. *Scientific Reports* 5: 12928.
- Peay KG. 2016. The mutualistic niche: mycorrhizal symbiosis and community dynamics. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics* 47: 1–22.
- Peay KG, Kennedy PG, Talbot JM. 2016. Dimensions of biodiversity in the Earth mycobiome. *Nature Reviews Microbiology* 14: 434–47.
- Peintner U, Poder R, Pempel T. 1998. The iceman's fungi. *Mycological Research* 102: 1153–162.
- Pennazza G, Fanali C, Santonico M, Dugo L, Cucchiarini L, Dachà M, D'Amico A, Costa R, Dugo P, Mondello L. 2013. Electronic nose and GC–MS analysis of volatile compounds in *Tuber magnatum* Pico: Evaluation of different storage conditions. *Food Chemistry* 136: 668–74.
- Pennisi E. 2019a. Algae suggest eukaryotes get many gifts of bacteria DNA. *Science* 363: 439–40.
- Pennisi E. 2019b. Chemicals released by bacteria may help gut control the brain, mouse study suggests. *Science*: www.sciencemag.org/news/2019/10/chemicals-released-bacteria-may-help-gut-control-brain-mouse-study-suggests [accessed October 29, 2019].
- Peris JE, Rodríguez A, Peña L, Fedriani J. 2017. Fungal infestation boosts fruit aroma and fruit removal by mammals and birds. *Scientific Reports* 7: 5646.
- Perrottet T. 2006. Mt. Rushmore. *Smithsonian Magazine*: www.smithsonian-mag.com/travel/mt-rushmore-116396890/ [accessed October 29, 2019].
- Petri G, Expert P, Turkheimer F, Carhart-Harris R, Nutt D, Hellyer P, Vaccarino F. 2014. Homological scaffolds of brain functional networks. *Journal of The Royal Society Interface* 11: 20140873.
- Pfeffer C, Larsen S, Song J, Dong M, Besenbacher F, Meyer R, Kjeldsen K, Schreiber L, Gorby YA, El-Naggar MY, et al. 2012. Filamentous bacteria transport electrons over centimetre distances. *Nature* 491: 218–21.
- Phillips RP, Brzostek E, Midgley MG. 2013. The mycorrhizal-associated nutrient economy: a new framework for predicting carbon–nutrient couplings in temperate forests. *New Phytologist* 199: 41–51.
- Pickles B, Egger K, Massicotte H, Green D. 2012. Ectomycorrhizas and climate change. *Fungal Ecology* 5: 73–84.

- Pickles BJ, Wilhelm R, Asay AK, Hahn AS, Simard SW, Mohn WW. 2017. Transfer of ^{13}C between paired Douglas-fir seedlings reveals plant kinship effects and uptake of exudates by ectomycorrhizas. *New Phytologist* 214: 400–11.
- Pion M, Spangenberg J, Simon A, Bindschedler S, Flury C, Chatelain A, Bshary R, Job D, Junier P. 2013. Bacterial farming by the fungus *Morchella crassipes*. *Proceedings of the Royal Society B* 280: 20132242.
- Pirozynski KA, Malloch DW. 1975. The origin of land plants: A matter of mycotrophism. *Biosystems* 6: 153–64.
- Pither J, Pickles BJ, Simard SW, Ordóñez A, Williams JW. 2018. Below-ground biotic interactions moderated the postglacial range dynamics of trees. *New Phytologist* 220: 1148–160.
- Policha T, Davis A, Barnadas M, Dentinger BT, Raguso RA, Roy BA. 2016. Disentangling visual and olfactory signals in mushroom-mimicking *Dracula* orchids using realistic three-dimensional printed flowers. *New Phytologist* 210: 1058–71.
- Pollan M. 2018. *How to Change Your Mind: The New Science of Psychedelics*. London, UK: Penguin.
- Pollan M. 2013. The Intelligent Plant. *The New Yorker*: michaelpollan.com/articles-archive/the-intelligent-plant/ [accessed October 29, 2019].
- Popkin G. 2017. Bacteria Use Brainlike Bursts of Electricity to Communicate. *Quanta*: www.quantamagazine.org/bacteria-use-brainlike-bursts-of-electricity-to-communicate-20170905/ [accessed October 29, 2019].
- Porada P, Weber B, Elbert W, Pöschl U, Kleidon A. 2014. Estimating impacts of lichens and bryophytes on global biogeochemical cycles. *Global Biogeochemical Cycles* 28: 71–85.
- Potts SG, Biesmeijer JC, Kremen C, Neumann P, Schweiger O, Kunin WE. 2010. Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology & Evolution* 25: 345–53.
- Poulsen M, Hu H, Li C, Chen Z, Xu L, Otani S, Nygaard S, Nobre T, Klauaubauf S, Schindler PM, et al. 2014. Complementary symbiont contributions to plant decomposition in a fungus-farming termite. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 14500–505.
- Powell JR, Rillig MC. 2018. Biodiversity of arbuscular mycorrhizal fungi and ecosystem function. *New Phytologist* 220: 1059–75.
- Powell M. 2014. *Medicinal Mushrooms: A Clinical Guide*. Bath, UK: Mycology Press.
- Pozo MJ, López-Ráez JA, Azcón-Aguilar C, García-Garrido JM. 2015. Phytohormones as integrators of environmental signals in the regulation of mycorrhizal symbioses. *New Phytologist* 205: 1431–436.
- Prasad S. 2018. An ingenious way to combat India's suffocating pollution. *The Washington Post*: www.washingtonpost.com/news/theworldpost/wp/2018/08/01/india-pollution/ [accessed October 29, 2019].
- Pressel S, Bidartondo MI, Ligrone R, Duckett JG. 2010. Fungal symbioses in bryophytes: New insights in the Twenty First Century. *Phytotaxa* 9: 238–53.
- Prigogine I, Stengers I. 1984. *Order Out of Chaos: Man's New Dialogue with Nature*. New York, NY: Bantam Books.
- Prindle A, Liu J, Asally M, Ly S, Garcia-Ojalvo J, Süel GM. 2015. Ion channels enable electrical communication in bacterial communities. *Nature* 527: 59–63.

- Purschwitz J, Müller S, Kastner C, Fischer R. 2006. Seeing the rainbow: light sensing in fungi. *Current Opinion in Microbiology* 9: 566–71.
- Quéré C, Andrew RM, Friedlingstein P, Sitch S, Hauck J, Pongratz J, Pickers P, Korsbakken J, Peters GP, Canadell JG, et al. 2018. Global Carbon Budget 2018. *Earth System Science Data Discussions*: <https://doi.org/10.5194/essd-2018-120> [accessed October 29, 2019].
- Quintana-Rodriguez E, Rivera-Macias LE, Adame-Alvarez RM, Torres J, Heil M. 2018. Shared weapons in fungus-fungus and fungus-plant interactions? Volatile organic compounds of plant or fungal origin exert direct antifungal activity *in vitro*. *Fungal Ecology* 33: 115–21.
- Quirk J, Andrews M, Leake J, Banwart S, Beerling D. 2014. Ectomycorrhizal fungi and past high CO₂ atmospheres enhance mineral weathering through increased below-ground carbon-energy fluxes. *Biology Letters* 10: 20140375.
- Rabbow E, Horneck G, Rettberg P, Schott J-U, Panitz C, L’Afflito A, Heise-Rotenburg von R, Willnecker R, Baglioni P, Hatton J, et al. 2009. EXPOSE, an astrobiological exposure facility on the International Space Station—from proposal to flight. *Origins of Life and Evolution of Biospheres* 39: 581–98.
- Raes J. 2017. Crowdsourcing Earth’s microbes. *Nature* 551: 446–47.
- Rambold G, Stadler M, Begerow D. 2013. Mycology should be recognized as a field in biology at eye level with other major disciplines—a memorandum. *Mycological Progress* 12: 455–63.
- Ramsbottom J. 1953. *Mushrooms and Toadstools*. London, UK: Collins.
- Raverat G. 1952. *Period Piece: A Cambridge Childhood*. London, UK: Faber.
- Rayner A. 1997. *Degrees of Freedom*. London, UK: World Scientific.
- Rayner A, Griffiths GS, Ainsworth AM. 1995. Mycelial Interconnectedness. In *The Growing Fungus*. Gow NAR, Gadd GM, eds. London, UK: Chapman & Hall, pp. 21–40.
- Rayner M. 1945. *Trees and Toadstools*. London, UK: Faber and Faber.
- Read D. 1997. Mycorrhizal fungi: The ties that bind. *Nature* 388: 517–18.
- Read N. 2018. “Fungal cell structure and organization.” In *Oxford Textbook of Medical Mycology*. Kibbler CC, Barton R, Gow NAR, Howell S, MacCallum DM, Manuel RJ, eds. Oxford, UK: Oxford University Press, pp. 23–34.
- Read ND, Lichius A, Shoji J, Goryachev AB. 2009. Self-signalling and self-fusion in filamentous fungi. *Current Opinion in Microbiology* 12: 608–15.
- Redman RS, Rodriguez RJ. 2017. “The Symbiotic Tango: Achieving Climate-Resilient Crops Via Mutualistic Plant-Fungus Relationships.” In *Functional Importance of the Plant Microbiome, Implications for Agriculture, Forestry and Bioenergy*. Doty S, ed. Springer International Publishing, pp. 71–87.
- Rees B, Shepherd VA, Ashford AE. 1994. Presence of a motile tubular vacuole system in different phyla of fungi. *Mycological Research* 98: 985–92.
- Reid CR, Latty T, Dussutour A, Beekman M. 2012. Slime mold uses an externalized spatial “memory” to navigate in complex environments. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 109: 17490–494.
- Relman DA. 2008. “Til death do us part”: coming to terms with symbiotic relationships. Forward. *Nature Reviews Microbiology* 6: 721–24.

- Reynaga-Peña CG, Bartnicki-García S. 2005. Cytoplasmic contractions in growing fungal hyphae and their morphogenetic consequences. *Archives of Microbiology* 183: 292–300.
- Reynolds HT, Vijayakumar V, Gluck-Thaler E, Korotkin H, Matheny P, Slot JC. 2018. Horizontal gene cluster transfer increased hallucinogenic mushroom diversity. *Evolution Letters* 2: 88–101.
- Rich A. 1994. “Notes Toward a Politics of Location.” In *Blood, Bread, and Poetry: Selected Prose, 1979–1985*. New York, NY: W. W. Norton.
- Richards TA, Leonard G, Soanes DM, Talbot NJ. 2011. Gene transfer into the fungi. *Fungal Biology Reviews* 25: 98–110.
- Rillig MC, Aguilar-Trigueros CA, Camenzind T, Cavagnaro TR, Degrune F, Hohmann P, Lammel DR, Mansour I, Roy J, van der Heijden MG, et al. 2019. Why farmers should manage the arbuscular mycorrhizal symbiosis: A response to Ryan & Graham (2018) “Little evidence that farmers should consider abundance or diversity of arbuscular mycorrhizal fungi when managing crops.” *New Phytologist* 222: 1171–1175.
- Rillig MC, Lehmann A, Lehmann J, Camenzind T, Rauh C. 2018. Soil Biodiversity Effects from Field to Fork. *Trends in Plant Science* 23: 17–24.
- Riquelme M. 2012. Tip growth in filamentous fungi: a road trip to the apex. *Microbiology* 67: 587–609.
- Ritz K, Young I. 2004. Interactions between soil structure and fungi. *Mycologist* 18: 52–59.
- Robinson JM. 1990. Lignin, land plants, and fungi: Biological evolution affecting Phanerozoic oxygen balance. *Geology* 18: 607–10.
- Rodriguez R, White JF, Arnold A, Redman R. 2009. Fungal endophytes: diversity and functional roles. *New Phytologist* 182: 314–30.
- Rodriguez-Romero J, Hedtke M, Kastner C, Müller S, Fischer R. 2010. Fungi, hidden in soil or up in the air: light makes a difference. *Microbiology* 64: 585–610.
- Rogers R. 2012. *The Fungal Pharmacy*. Berkeley, CA: North Atlantic Books.
- Roper M, Dressaire E. 2019. Fungal biology: bidirectional communication across fungal networks. *Current Biology* 29: R130–R132.
- Roper M, Lee C, Hickey PC, Gladfelter AS. 2015. Life as a moving fluid: fate of cytoplasmic macromolecules in dynamic fungal syncytia. *Current Opinion in Microbiology* 26: 116–22.
- Roper M, Seminara A. 2017. Mycofluidics: the fluid mechanics of fungal adaptation. *Annual Review of Fluid Mechanics* 51: 1–28.
- Roper M, Seminara A, Bandi M, Cobb A, Dillard HR, Pringle A. 2010. Dispersal of fungal spores on a cooperatively generated wind. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 107: 17474–479.
- Roper M, Simonin A, Hickey PC, Leeder A, Glass LN. 2013. Nuclear dynamics in a fungal chimera. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: 12875–880.
- Ross AA, Müller KM, Weese JS, Neufeld JD. 2018. Comprehensive skin microbiome analysis reveals the uniqueness of human skin and evidence for phyllosymbiosis within the class Mammalia. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: E5786–E5795.
- Ross S, Bossis A, Guss J, Agin-Liebes G, Malone T, Cohen B, Mennenga S, Belser A, Kalliontzi K, Babb J, et al. 2016. Rapid and sustained symptom

- reduction following psilocybin treatment for anxiety and depression in patients with life-threatening cancer: a randomized controlled trial. *Journal of Psychopharmacology* 30: 1165–180.
- Roughgarden J. 2013. *Evolution's Rainbow*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Rouphael Y, Franken P, Schneider C, Schwarz D, Giovannetti M, Agnolucci M, Pascale S, Bonini P, Colla G. 2015. Arbuscular mycorrhizal fungi act as biostimulants in horticultural crops. *Scientia Horticulturae* 196: 91–108.
- Rubini A, Riccioni C, Arcioni S, Paolocci F. 2007. Troubles with truffles: unveiling more of their biology. *New Phytologist* 174: 256–59.
- Russell B. 1956. *Portraits from Memory and Other Essays*. New York, NY: Simon and Schuster.
- Ryan MH, Graham JH. 2018. Little evidence that farmers should consider abundance or diversity of arbuscular mycorrhizal fungi when managing crops. *New Phytologist* 220: 1092–107.
- Sagan L. 1967. On the origin of mitosing cells. *Journal of Theoretical Biology* 14: 225–74.
- Salvador-Recatalà V, Tjallingii FW, Farmer EE. 2014. Real-time, in vivo intracellular recordings of caterpillar-induced depolarization waves in sieve elements using aphid electrodes. *New Phytologist* 203: 674–84.
- Saple I. 2018. Magma shift may have caused mysterious seismic wave event. *The Guardian*: www.theguardian.com/science/2018/nov/30/magma-shift-mysterious-seismic-wave-event-mayotte [accessed October 29, 2019].
- Samorini G. 2002. *Animals and Psychedelics: The Natural World and the Instinct to Alter Consciousness*. Rochester, VT: Park Street Press.
- Sancho LG, de la Torre R, Pintado A. 2008. Lichens, new and promising material from experiments in astrobiology. *Fungal Biology Reviews* 22: 103–9.
- Sapp J. 2004. The dynamics of symbiosis: an historical overview. *Canadian Journal of Botany* 82: 1046–56.
- Sapp J. 1994. *Evolution by Association*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Sapp J. 2009. *The New Foundations of Evolution*. Oxford, UK: Oxford University Press.
- Sapp J. 2016. The Symbiotic Self. *Evolutionary Biology* 43: 596–603.
- Sapsford SJ, Paap T, Hardy GE, Burgess TI. 2017. The “chicken or the egg”: which comes first, forest tree decline or loss of mycorrhizae? *Plant Ecology* 218: 1093–106.
- Sarrafchi A, Odhammer AM, Salazar L, Laska M. 2013. Olfactory sensitivity for six predator odorants in cd-1 mice, human subjects, and spider monkeys. *PLOS ONE* 8: e80621.
- Saupe S. 2000. Molecular genetics of heterokaryon incompatibility in filamentous ascomycetes. *Microbiology and Molecular Biology Reviews* 64: 489–502.
- Scharf C. 2016. How the Cold War Created Astrobiology. *Nautilus*: nautilus.us/issue/32/space/how-the-cold-war-created-astrobiology-rp [accessed October 29, 2019].

- Scharlemann JP, Tanner EV, Hiederer R, Kapos V. 2014. Global soil carbon: understanding and managing the largest terrestrial carbon pool. *Carbon Management* 5: 81–91.
- Schenkel D, Maciá-Vicente JG, Bissell A, Splivallo R. 2018. Fungi indirectly affect plant root architecture by modulating soil volatile organic compounds. *Frontiers in Microbiology* 9: 1847.
- Schmieder SS, Stanley CE, Rzepiela A, van Swaay D, Saboti J, Nørrelykke SF, deMello AJ, Aebi M, Künzler M. 2019. Bidirectional propagation of signals and nutrients in fungal networks via specialized hyphae. *Current Biology* 29: 217–28.
- Schmull M, Dal-Forno M, Lücking R, Cao S, Clardy J, Lawrey JD. 2014. *Diclytonema huaorani* (Agaricales: Hygrophoraceae), a new lichenized basidiomycete from Amazonian Ecuador with presumed hallucinogenic properties. *The Bryologist* 117: 386–94.
- Schultes RE. 1940. Teonanacatl: The Narcotic Mushroom of the Aztecs. *American Anthropologist* 42: 429–43.
- Schultes RE, Hofmann A, Rätsch C. 2001. *Plants of the Gods: Their Sacred, Healing, and Hallucinogenic Powers*. Rochester, VT: Healing Arts Press, 2nd edition.
- Seaward M. 2008. “Environmental role of lichens.” In *Lichen Biology*. Nash TH, ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, pp. 274–98.
- Selosse M-A. 2002. *Prototaxites*: a 400 Myr old giant fossil, a saprophytic holobasidiomycete, or a lichen? *Mycological Research* 106: 641–44.
- Selosse M-A, Schneider-Maunoury L, Martos F. 2018. Time to re-think fungal ecology? Fungal ecological niches are often prejudged. *New Phytologist* 217: 968–72.
- Selosse M-A, Schneider-Maunoury L, Taschen E, Rousset F, Richard F. 2017. Black truffle, a hermaphrodite with forced unisexual behaviour. *Trends in Microbiology* 25: 784–87.
- Selosse M-A, Strullu-Derrien C, Martin FM, Kamoun S, Kenrick P. 2015. Plants, fungi and oomycetes: a 400-million year affair that shapes the biosphere. *New Phytologist* 206: 501–6.
- Selosse M-A, Tacon LF. 1998. The land flora: a phototroph-fungus partnership? *Trends in Ecology & Evolution* 13: 15–20.
- Sergeeva NG, Kopytina NI. 2014. The first marine filamentous fungi discovered in the bottom sediments of the oxic/anoxic interface and in the bathyal zone of the black sea. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 14: 497–505.
- Sheldrake M, Rosenstock NP, Revillini D, Olsson PA, Wright SJ, Turner BL. 2017. A phosphorus threshold for mycoheterotrophic plants in tropical forests. *Proceedings of the Royal Society B* 284: 20162093.
- Shepherd V, Orlovich D, Ashford A. 1993. Cell-to-cell transport via motile tubules in growing hyphae of a fungus. *Journal of Cell Science* 105: 1173–178.
- Shomrat T, Levin M. 2013. An automated training paradigm reveals long-term memory in planarians and its persistence through head regeneration. *Journal of Experimental Biology* 216: 3799–810.
- Shukla V, Joshi GP, Rawat MSM. 2010. Lichens as a potential natural source of bioactive compounds: a review. *Phytochemical Reviews* 9: 303–14.

- Siegel RK. 2005. *Intoxication: The Universal Drive for Mind-Altering Substances*. Rochester, VT: Park Street Press.
- Silvertown J. 2009. A new dawn for citizen science. *Trends in Ecology & Evolution* 24: 467–71.
- Simard S. 2018. “Mycorrhizal Networks Facilitate Tree Communication, Learning, and Memory.” In *Memory and Learning in Plants*. Baluska F, Gagliano M, Witzany G, eds. Springer International Publishing, pp. 191–213.
- Simard S, Asay A, Beiler K, Bingham M, Deslippe J, He X, Phillip L, Song Y, Teste F. 2015. “Resource Transfer Between Plants Through Ectomycorrhizal Fungal Networks.” In *Mycorrhizal Networks*. Horton T, ed. Springer International Publishing, pp. 133–76.
- Simard S, Perry DA, Jones MD, Myrold DD, Durall DM, Molina R. 1997. Net transfer of carbon between ectomycorrhizal tree species in the field. *Nature* 388: 579–82.
- Simard SW, Beiler KJ, Bingham MA, Deslippe JR, Philip LJ, Teste FP. 2012. Mycorrhizal networks: Mechanisms, ecology and modelling. *Fungal Biology Reviews* 26: 39–60.
- Singh H. 2006. *Mycoremediation*. New York, NY: John Wiley & Sons.
- Slayman C, Long W, Gradmann D. 1976. “Action potentials” in *Neurospora crassa*, a mycelial fungus. *Biochimica et Biophysica Acta* 426: 732–44.
- Smith SE, Read DJ. 2008. *Mycorrhizal Symbiosis*. London, UK: Academic Press.
- Solé R, Moses M, Forrest S. 2019. Liquid brains, solid brains. *Philosophical Transactions of the Royal Society B* 374: 20190040.
- Soliman S, Greenwood JS, Bombarely A, Mueller LA, Tsao R, Mosser DD, Raizada MN. 2015. An endophyte constructs fungicide-containing extracellular barriers for its host plant. *Current Biology* 25: 2570–576.
- Song Y, Simard SW, Carroll A, Mohn WW, Zeng R. 2015a. Defoliation of interior Douglas-fir elicits carbon transfer and stress signalling to ponderosa pine neighbors through ectomycorrhizal networks. *Scientific Reports* 5: 8495.
- Song Y, Ye M, Li C, He X, Zhu-Salzman K, Wang R, Su Y, Luo S, Zeng R. 2015b. Hijacking common mycorrhizal networks for herbivore-induced defence signal transfer between tomato plants. *Scientific Reports* 4: 3915.
- Song Y, Zeng R. 2010. Interplant communication of tomato plants through underground common mycorrhizal networks. *PLOS ONE* 5: e11324.
- Southworth D, He X-H, Swenson W, Bledsoe C, Horwath W. 2005. Application of network theory to potential mycorrhizal networks. *Mycorrhiza* 15: 589–95.
- Spanos NP, Gottleib J. 1976. Ergotism and the Salem village witch trials. *Science* 194: 1390–4.
- Spilivallo R, Fischer U, Göbel C, Feussner I, Karlovsky P. 2009. Truffles regulate plant root morphogenesis via the production of auxin and ethylene. *Plant Physiology* 150: 2018–29.
- Spilivallo R, Novero M, Berteaux CM, Bossi S, Bonfante P. 2007. Truffle volatiles inhibit growth and induce an oxidative burst in *Arabidopsis thaliana*. *New Phytologist* 175: 417–24.

- Splivallo R, Ottonello S, Mello A, Karlovsky P. 2011. Truffle volatiles: from chemical ecology to aroma biosynthesis. *New Phytologist* 189: 688–99.
- Spribille T. 2018. Relative symbiont input and the lichen symbiotic outcome. *Current Opinion in Plant Biology* 44: 57–63.
- Spribille T, Tuovinen V, Resl P, Vanderpool D, Wolinski H, Aime CM, Schneider K, Stabentheiner E, Toome-Heller M, Thor G, et al. 2016. Basidiomycete yeasts in the cortex of ascomycete macrolichens. *Science* 353: 488–92.
- Stamets P. 2005. “Global Ecologies, World Distribution, and Relative Potency of Psilocybin Mushrooms.” In *Sacred Mushroom of Visions: Teonanacatl*. Metzner R, ed. Rochester, VT: Park Street Press, pp. 69–75.
- Stamets P. 2011. *Mycelium Running*. Berkeley, CA: Ten Speed Press.
- Stamets P. 1996. *Psilocybin Mushrooms of the World*. Berkeley, CA: Ten Speed Press.
- Stamets PE, Naeger NL, Evans JD, Han JO, Hopkins BK, Lopez D, Moershel HM, Nally R, Sumerlin D, Taylor AW, et al. 2018. Extracts of polypore mushroom mycelia reduce viruses in honey bees. *Scientific Reports* 8: 13936.
- State of the World’s Fungi. 2018. Royal Botanic Gardens, Kew, UK. stateoftheworldfungi.org [accessed October 29, 2019].
- Steele EJ, Al-Mufti S, Augustyn KA, Chandrajith R, Coghlan JP, Coulson SG, Ghosh S, Gillman M, Gorczynski RM, Klyce B, et al. 2018. Cause of Cambrian Explosion—Terrestrial or cosmic? *Progress in Biophysics and Molecular Biology* 136: 3–23.
- Steidinger B, Crowther T, Liang J, Nuland VM, Werner G, Reich P, Nabuurs G, de-Miguel S, Zhou M, Picard N, et al. 2019. Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses. *Nature* 569: 404–8.
- Steinberg G. 2007. Hyphal growth: a tale of motors, lipids, and the spitzenkörper. *Eukaryotic Cell* 6: 351–60.
- Steinhardt JB. 2018. *Mycelium is the Message: open science, ecological values, and alternative futures with do-it-yourself mycologists*. PhD thesis, University of California, Santa Barbara, CA.
- Stierle A, Strobel G, Stierle D. 1993. Taxol and taxane production by *Taxomyces andreanae*, an endophytic fungus of Pacific yew. *Science* 260: 214–16.
- Stough JM, Yutin N, Chaban YV, Moniruzzaman M, Gann ER, Pound HL, Steffen MM, Black JN, Koonin EV, Wilhelm SW, et al. 2019. Genome and environmental activity of a chrysochromulina parva virus and its virophages. *Frontiers in Microbiology* 10: 703.
- Strullu-Derrien C, Selosse M-A, Kenrick P, Martin FM. 2018. The origin and evolution of mycorrhizal symbioses: from palaeomycology to phylogenomics. *New Phytologist* 220: 1012–30.
- Studerus E, Kometer M, Hasler F, Vollenweider FX. 2011. Acute, subacute and long-term subjective effects of psilocybin in healthy humans: a pooled analysis of experimental studies. *Journal of Psychopharmacology* 25: 1434–452.
- Stukeley W. 1752. *Memoirs of Sir Isaac Newton’s Life*. Unpublished, available from website of the Royal Society: <http://www.royalsociety.org/About-us/Pages/Reference-works/Newton.aspx> [accessed October 29, 2019].

- Suarato G, Bertorelli R, Athanassiou A. 2018. Borrowing from nature: biopolymers and biocomposites as smart wound care materials. *Frontiers in Bioengineering and Biotechnology* 6: 137.
- Sudbery P, Gow N, Berman J. 2004. The distinct morphogenic states of *Candida albicans*. *Trends in Microbiology* 12: 317–24.
- Swift RS. 2001. Sequestration of carbon by soil. *Soil Science* 166: 858–71.
- Taiz L, Alkon D, Draguhn A, Murphy A, Blatt M, Hawes C, Thiel G, Robinson DG. 2019. Plants neither possess nor require consciousness. *Trends in Plant Science* 24: 677–87.
- Takaki K, Yoshida K, Saito T, Kusaka T, Yamaguchi R, Takahashi K, Sakamoto Y. 2014. Effect of electrical stimulation on fruit body formation in cultivating mushrooms. *Microorganisms* 2: 58–72.
- Talou T, Gaset A, Delmas M, Kulifaj M, Montant C. 1990. Dimethyl sulphide: the secret for black truffle hunting by animals? *Mycological Research* 94: 277–78.
- Tanney JB, Visagie CM, Yilmaz N, Seifert KA. 2017. *Aspergillus* subgenus *Polypaecilum* from the built environment. *Studies in Mycology* 88: 237–67.
- Taschen E, Rousset F, Sauve M, Benoit L, Dubois M-P, Richard F, Selosse M-A. 2016. How the truffle got its mate: insights from genetic structure in spontaneous and planted Mediterranean populations of *Tuber melanosporum*. *Molecular Ecology* 25: 5611–627.
- Taylor A, Flatt A, Beutel M, Wolff M, Brownson K, Stamets P. 2015. Removal of *Escherichia coli* from synthetic stormwater using mycofiltration. *Ecological Engineering* 78: 79–86.
- Taylor L, Leake J, Quirk J, Hardy K, Banwart S, Beerling D. 2009. Biological weathering and the long-term carbon cycle: integrating mycorrhizal evolution and function into the current paradigm. *Geobiology* 7: 171–91.
- Taylor T, Klavins S, Krings M, Taylor E, Kerp H, Hass H. 2007. Fungi from the Rhynie chert: a view from the dark side. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh: Earth Sciences* 94: 457–73.
- Temple R. 2007. The prehistory of panspermia: astrophysical or metaphysical? *International Journal of Astrobiology* 6: 169–80.
- Tero A, Takagi S, Saigusa T, Ito K, Bebbler DP, Flicker MD, Yumiki K, Kobayashi R, Nakagaki T. 2010. Rules for biologically inspired adaptive network design. *Science* 327: 439–42.
- Terrer C, Vicca S, Hungate BA, Phillips RP, Prentice IC. 2016. Mycorrhizal association as a primary control of the CO₂ fertilization effect. *Science* 353: 72–74.
- Thierry G. 2019. Lab-grown mini brains: we can't dismiss the possibility that they could one day outsmart us. *The Conversation: theconversation.com/lab-grown-mini-brains-we-cant-dismiss-the-possibility-that-they-could-one-day-outsmart-us-125842* [accessed October 29, 2019].
- Thirkell TJ, Charters MD, Elliott AJ, Sait SM, Field KJ. 2017. Are mycorrhizal fungi our sustainable saviours? Considerations for achieving food security. *Journal of Ecology* 105: 921–29.
- Thirkell TJ, Pastok D, Field KJ. 2019. Carbon for nutrient exchange between arbuscular mycorrhizal fungi and wheat varies according to cultivar and changes in atmospheric carbon dioxide concentration. *Global Change Biology*: DOI: 10.1111/gcb.14851.

- Thomas P, Büntgen U. 2017. First harvest of Périgord black truffle in the UK as a result of climate change. *Climate Research* 74: 67–70.
- Tilman D, Balzer C, Hill J, Befort BL. 2011. Global food demand and the sustainable intensification of agriculture. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 108: 20260–264.
- Tilman D, Cassman KG, Matson PA, Naylor R, Polasky S. 2002. Agricultural sustainability and intensive production practices. *Nature* 418: 671–77.
- Tkavc R, Matrosova VY, Grichenko OE, Gostin ar C, Volpe RP, Klimenkova P, Gaidamakova EK, Zhou CE, Stewart BJ, Lyman MG, et al. 2018. Prospects for Fungal Bioremediation of Acidic Radioactive Waste Sites: Characterization and Genome Sequence of *Rhodotorula taiwanensis* MD1149. *Frontiers in Microbiology* 8: 2528.
- Tlalka M, Bebbler DP, Darrah PR, Watkinson SC, Fricker MD. 2007. Emergence of self-organised oscillatory domains in fungal mycelia. *Fungal Genetics and Biology* 44: 1085–95.
- Tlalka M, Hensman D, Darrah P, Watkinson S, Fricker MD. 2003. Noncircadian oscillations in amino acid transport have complementary profiles in assimilatory and foraging hyphae of *Phanerochaete velutina*. *New Phytologist* 158: 325–35.
- Toju H, Guimarães PR, Olesen JM, Thompson JN. 2014. Assembly of complex plant–fungus networks. *Nature Communications* 5: 5273.
- Toju H, Peay KG, Yamamichi M, Narisawa K, Hiruma K, Naito K, Fukuda S, Ushio M, Nakaoka S, Onoda Y, et al. 2018. Core microbiomes for sustainable agroecosystems. *Nature Plants* 4: 247–57.
- Toju H, Sato H. 2018. Root-associated fungi shared between arbuscular mycorrhizal and ectomycorrhizal conifers in a temperate forest. *Frontiers in Microbiology* 9: 433.
- Toju H, Yamamoto S, Tanabe AS, Hayakawa T, Ishii HS. 2016. Network modules and hubs in plant-root fungal biomes. *Journal of the Royal Society Interface* 13: 20151097.
- Tolkien JRR. 2014. *The Lord of the Rings*. London, UK: Harper Collins.
- Tornberg K, Olsson S. 2002. Detection of hydroxyl radicals produced by wood-decomposing fungi. *FEMS Microbiology Ecology* 40: 13–20.
- Torri L, Migliorini P, Masoero G. 2013. Sensory test vs. electronic nose and/or image analysis of whole bread produced with old and modern wheat varieties adjuvanted by means of the mycorrhizal factor. *Food Research International* 54: 1400–408.
- Toyota M, Spencer D, Sawai-Toyota S, Jiaqi W, Zhang T, Koo AJ, Howe GA, Gilroy S. 2018. Glutamate triggers long-distance, calcium-based plant defense signaling. *Science* 361: 1112–115.
- Trappe J. 2015. “Foreword.” In *Mycorrhizal Networks*. Horton T., ed. Springer International Publishing.
- Trappe JM. 2005. A. B. Frank and mycorrhizae: the challenge to evolutionary and ecologic theory. *Mycorrhiza* 15: 277–81.
- Trewavas A. 2016. Intelligence, Cognition, and Language of Green Plants. *Frontiers in Psychology* 7: 588.
- Trewavas A. 2014. *Plant Behaviour and Intelligence*. Oxford, UK: Oxford University Press.

- Trewavas A. 2007. Response to Alpi et al.: Plant neurobiology—all metaphors have value. *Trends in Plant Science* 12: 231–33.
- Trivedi DK, Sinclair E, Xu Y, Sarkar D, Walton-Doyle C, Liscio C, Banks P, Milne J, Silverdale M, Kunath T, et al. 2019. Discovery of volatile biomarkers of Parkinson's disease from sebum. *ACS Central Science* 5: 599–606.
- Tsing AL. 2015. *The Mushroom at the End of the World*. Princeton, NJ: Princeton University Press.
- Tuovinen V, Ekman S, Thor G, Vanderpool D, Spribille T, Johannesson H. 2019. Two basidiomycete fungi in the cortex of wolf lichens. *Current Biology* 29: 476–83.
- Tyne D, Manson AL, Huycke MM, Karanicolas J, Earl AM, Gilmore MS. 2019. Impact of antibiotic treatment and host innate immune pressure on enterococcal adaptation in the human bloodstream. *Science Translational Medicine* 11: eaat8418.
- Umehata H, Fumagalli M, Smail I, Matsuda Y, Swinbank AM, Cantalupo S, Sykes C, Ivison RJ, Steidel CC, Shapley AE, et al. 2019. Gas filaments of the cosmic web located around active galaxies in a protocluster. *Science* 366: 97–100.
- Vadde F, Grasset E, Holm L, Karsenty G, Macpherson AJ, Olofsson LE, Bäckhed F. 2018. Gut microbiota regulates maturation of the adult enteric nervous system via enteric serotonin networks. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 115: 6458–463.
- Vahdatzadeh M, Deveau A, Splivallo R. 2015. The role of the microbiome of truffles in aroma formation: a meta-analysis approach. *Applied and Environmental Microbiology* 81: 6946–952.
- Vajda V, McLoughlin S. 2004. Fungal proliferation at the cretaceous-tertiary boundary. *Science* 303: 1489–489.
- Valles-Colomer M, Falony G, Darzi Y, Tigchelaar EF, Wang J, Tito RY, Schiweck C, Kurilshikov A, Joossens M, Wijmenga C, et al. 2019. The neuroactive potential of the human gut microbiota in quality of life and depression. *Nature Microbiology*: 623–32.
- van Delft FC, Ipolitti G, Nicolau DV, Perumal A, Kašpar O, Kheireddine S, Wachsmann-Hogiu S, Nicolau DV. 2018. Something has to give: scaling combinatorial computing by biological agents exploring physical networks encoding NP-complete problems. *Journal of the Royal Society Interface Focus* 8: 20180034.
- van der Heijden MG. 2016. Underground networking. *Science* 352: 290–91.
- van der Heijden MG, Bardgett RD, Straalen NM. 2008. The unseen majority: soil microbes as drivers of plant diversity and productivity in terrestrial ecosystems. *Ecology Letters* 11: 296–310.
- van der Heijden MG, Dombrowski N, Schlaeppi K. 2017. Continuum of root-fungal symbioses for plant nutrition. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 114: 11574–576.
- van der Heijden MG, Horton TR. 2009. Socialism in soil? The importance of mycorrhizal fungal networks for facilitation in natural ecosystems. *Journal of Ecology* 97: 1139–150.
- van der Heijden MG, Walder F. 2016. Reply to “Misconceptions on the application of biological market theory to the mycorrhizal symbiosis.” *Nature Plants* 2: 16062.

- van der Linde S, Suz LM, Orme DC, Cox F, Andreae H, Asi E, Atkinson B, Benham S, Carroll C, Cools N, et al. 2018. Environment and host as large-scale controls of ectomycorrhizal fungi. *Nature* 558: 243–48.
- Vannini C, Carpentieri A, Salvioli A, Novero M, Marsoni M, Testa L, Pinto M, Amoresano A, Ortolani F, Bracale M, et al. 2016. An interdomain network: the endobacterium of a mycorrhizal fungus promotes antioxidative responses in both fungal and plant hosts. *New Phytologist* 211: 265–75.
- Van Tyne D, Manson AL, Huycke MM, Karanicolas J, Earl AM, Gilmore MS. 2019. Impact of antibiotic treatment and host innate immune pressure on enterococcal adaptation in the human bloodstream. *Science Translational Medicine* 487: eaat8418.
- Venner S, Feschotte C, Biémont C. 2009. Dynamics of transposable elements: towards a community ecology of the genome. *Trends in Genetics* 25: 317–23.
- Verbruggen E, Röhling WF, Gamper HA, Kowalchuk GA, Verhoef HA, van der Heijden MG. 2010. Positive effects of organic farming on below-ground mutualists: large-scale comparison of mycorrhizal fungal communities in agricultural soils. *New Phytologist* 186: 968–79.
- Vetter W, Roberts D. 2007. Revisiting the organohalogens associated with 1979-samples of Brazilian bees (*Eufriesea purpurata*). *Science of the Total Environment* 377: 371–77.
- Vita F, Taiti C, Pompeiano A, Bazihizina N, Lucarotti V, Mancuso S, Alpi A. 2015. Volatile organic compounds in truffle (*Tuber magnatum* Pico): comparison of samples from different regions of Italy and from different seasons. *Scientific Reports* 5: 12629.
- Viveiros de Castro E. 2004. Exchanging perspectives: the transformation of objects into subjects in amerindian ontologies. *Common Knowledge*: 463–84.
- von Bertalanffy L. 1933. *Modern Theories of Development: An Introduction to Theoretical Biology*. London, UK: Humphrey Milford.
- Wadley G, Hayden B. 2015. Pharmacological influences on the Neolithic Transition. *Journal of Ethnobiology* 35: 566–84.
- Wagg C, Bender FS, Widmer F, van der Heijden MG. 2014. Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 5266–270.
- Wainwright M. 1989a. Moulds in ancient and more recent medicine. *Mycologist* 3: 21–23.
- Wainwright M. 1989b. Moulds in Folk Medicine. *Folklore* 100: 162–66.
- Wainwright M, Rally L, Ali T. 1992. The scientific basis of mould therapy. *Mycologist* 6: 108–10.
- Walder F, Niemann H, Natarajan M, Lehmann MF, Boller T, Wiemken A. 2012. Mycorrhizal networks: common goods of plants shared under unequal terms of trade. *Plant Physiology* 159: 789–97.
- Walder F, van der Heijden MG. 2015. Regulation of resource exchange in the arbuscular mycorrhizal symbiosis. *Nature Plants* 1: 15159.
- Waller LP, Felten J, Hiiesalu I, Vogt-Schilb H. 2018. Sharing resources for mutual benefit: crosstalk between disciplines deepens the understanding of mycorrhizal symbioses across scales. *New Phytologist* 217: 29–32.

- Wang B, Yeun L, Xue J, Liu Y, Ané J, Qiu Y. 2010. Presence of three mycorrhizal genes in the common ancestor of land plants suggests a key role of mycorrhizas in the colonization of land by plants. *New Phytologist* 186: 514–25.
- Wasson G, Hofmann A, Ruck C. 2009. *The Road to Eleusis: Unveiling the Secret of the Mysteries*. Berkeley, CA: North Atlantic Books.
- Wasson G, Kramrisch S, Ott J, Ruck C. 1986. *Persephone's Quest: Entheogens and the Origins of Religion*. New Haven, CT: Yale University Press.
- Wasson VP, Wasson G. 1957. *Mushrooms, Russia and History*. New York, NY: Pantheon Books, Inc.
- Watanabe S, Tero A, Takamatsu A, Nakagaki T. 2011. Traffic optimization in railroad networks using an algorithm mimicking an amoeba-like organism, *Physarum plasmodium*. *Biosystems* 105: 225–32.
- Watkinson SC, Boddy L, Money N. 2015. *The Fungi*. London, UK: Academic Press.
- Watts J. 2018. Scientists identify vast underground ecosystem containing billions of micro-organisms. *The Guardian*: www.theguardian.com/science/2018/dec/10/tread-softly-because-you-tread-on-23bn-tonnes-of-micro-organisms [accessed October 29, 2019].
- Watts-Williams SJ, Cavagnaro TR. 2014. Nutrient interactions and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of a mycorrhiza-defective mutant and wild-type tomato genotype pair. *Plant and Soil* 384: 79–92.
- Wellman CH, Strother PK. 2015. The terrestrial biota prior to the origin of land plants (embryophytes): a review of the evidence. *Palaeontology* 58: 601–27.
- Weremijewicz J, da Sternberg L, Janos DP. 2016. Common mycorrhizal networks amplify competition by preferential mineral nutrient allocation to large host plants. *New Phytologist* 212: 461–71.
- Werner GD, Kiers TE. 2015. Partner selection in the mycorrhizal mutualism. *New Phytologist* 205: 1437–442.
- Werner GD, Strassmann JE, Ivens AB, Engelmoer DJ, Verbruggen E, Queller DC, Noë R, Johnson N, Hammerstein P, Kiers TE. 2014. Evolution of microbial markets. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 111: 1237–244.
- Werrett S. 2019. *Thrifty Science: Making the Most of Materials in the History of Experiment*. Chicago, IL: University of Chicago Press.
- West M. 2019. Putting the “I” in science. *Nature*: www.nature.com/articles/d41586-019-03051-z [accessed October 29, 2019].
- Westerhoff HV, Brooks AN, Simeonidis E, García-Contreras R, He F, Boogerd FC, Jackson VJ, Goncharuk V, Kolodkin A. 2014. Macromolecular networks and intelligence in microorganisms. *Frontiers in Microbiology* 5: 379.
- Weyrich LS, Duchene S, Soubrier J, Arriola L, Llamas B, Breen J, Morris AG, Alt KW, Caramelli D, Dresely V, et al. 2017. Neanderthal behaviour, diet, and disease inferred from ancient DNA in dental calculus. *Nature* 544: 357–61.
- Whiteside MD, Werner GDA, Caldas VEA, Van't Padje A, Dupin SE, Elbers B, Bakker M, Wyatt GAK, Klein M, Hink MA, et al. 2019. Mycorrhizal fungi

- respond to resource inequality by moving phosphorus from rich to poor patches across networks. *Current Biology* 29: 2043–50.
- Whittaker R. 1969. New Concepts of Kingdoms of Organisms. *Science* 163: 150–60.
- Wiens F, Zitzmann A, Lachance M-A, Yegles M, Pragst F, Wurst FM, von Holst D, Guan S, Spanagel R. 2008. Chronic intake of fermented floral nectar by wild treeshrews. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 105: 10426–431.
- Wilkinson DM. 1998. The evolutionary ecology of mycorrhizal networks. *Oikos* 82: 407–10.
- Willerslev R. 2007. *Soul Hunters: Hunting, Animism, and Personhood among the Siberian Yukaghirs*. Berkeley, CA: University of California Press.
- Wilson GW, Rice CW, Rillig MC, Springer A, Hartnett DC. 2009. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. *Ecology Letters* 12: 452–61.
- Winkelman MJ. 2017. The mechanisms of psychedelic visionary experiences: hypotheses from evolutionary psychology. *Frontiers in Neuroscience* 11: 539.
- Wipf D, Krajinski F, Tuinen D, Recorbet G, Courty P. 2019. Trading on the arbuscular mycorrhiza market: from arbuscules to common mycorrhizal networks. *New Phytologist* 223: 1127–142.
- Wisecaver JH, Slot JC, Rokas A. 2014. The evolution of fungal metabolic pathways. *PLOS Genetics* 10: e1004816.
- Witt P. 1971. Drugs alter web-building of spiders: a review and evaluation. *Behavioral Science* 16: 98–113.
- Wolfe BE, Husband BC, Klironomos JN. 2005. Effects of a belowground mutualism on an aboveground mutualism. *Ecology Letters* 8: 218–23.
- Wright CK, Wimberly MC. 2013. Recent land use change in the Western Corn Belt threatens grasslands and wetlands. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 110: 4134–139.
- Wulf A. 2015. *The Invention of Nature*. New York, NY: Alfred A. Knopf.
- Wyatt GA, Kiers TE, Gardner A, West SA. 2014. A biological market analysis of the plant-mycorrhizal symbiosis. *Evolution* 68: 2603–618.
- Yano JM, Yu K, Donaldson GP, Shastri GG, Ann P, Ma L, Nagler CR, Ismagilov RF, Masmanian SK, Hsiao EY. 2015. Indigenous bacteria from the gut microbiota regulate host serotonin biosynthesis. *Cell* 161: 264–76.
- Yon D. 2019. Now You See It. *Quanta*: aeon.co/essays/how-our-brain-sculpts-experience-in-line-with-our-expectations? [accessed October 29, 2019].
- Yong E. 2014. The Guts That Scrape The Skies. *National Geographic*: www.nationalgeographic.com/science/phenomena/2014/09/23/the-guts-that-scrape-the-skies/ [accessed October 29, 2019].
- Yong E. 2017. How the Zombie Fungus Takes Over Ants' Bodies to Control Their Minds. *The Atlantic*: www.theatlantic.com/science/archive/2017/11/how-the-zombie-fungus-takes-over-ants-bodies-to-control-their-minds/545864/ [accessed October 29, 2019].
- Yong E. 2016. *I Contain Multitudes: The Microbes Within Us and a Grand View of Life*. New York, NY: Ecco Press.

- Yong E. 2018. This Parasite Drugs Its Hosts With the Psychedelic Chemical in Shrooms. *The Atlantic*: www.theatlantic.com/science/archive/2018/07/massospora-parasite-drugs-its-hosts/566324/ [accessed October 29, 2019].
- Yong E. 2019. The Worst Disease Ever Recorded. *The Atlantic*: www.theatlantic.com/science/archive/2019/03/bd-frogs-apocalypse-disease/585862/ [accessed October 29, 2019].
- Young RM. 1985. *Darwin's Metaphor*. Cambridge, UK: Cambridge University Press.
- Yuan X, Xiao S, Taylor TN. 2005. Lichen-like symbiosis 600 million years ago. *Science* 308: 1017–20.
- Yun-Chang W. 1985. Mycology in Ancient China. *Mycologist* 1: 59–61.
- Zabinski CA, Bunn RA. 2014. “Function of Mycorrhizae in Extreme Environments.” In *Mycorrhizal Fungi: Use in Sustainable Agriculture and Land Restoration*. Solaiman Z, Abbott L, Varma A, eds. Springer International Publishing, pp. 201–14.
- Zhang MM, Poulsen M, Currie CR. 2007. Symbiont recognition of mutualistic bacteria by *Acromyrmex* leaf-cutting ants. *The ISME Journal* 1: 313–20.
- Zhang S, Lehmann A, Zheng W, You Z, Rillig MC. 2019. Arbuscular mycorrhizal fungi increase grain yields: a meta-analysis. *New Phytologist* 222: 543–55.
- Zhang Y, Kastman EK, Guasto JS, Wolfe BE. 2018. Fungal networks shape dynamics of bacterial dispersal and community assembly in cheese rind microbiomes. *Nature Communications* 9: 336.
- Zheng C, Ji B, Zhang J, Zhang F, Bever JD. 2015. Shading decreases plant carbon preferential allocation towards the most beneficial mycorrhizal mutualist. *New Phytologist* 205: 361–68.
- Zheng P, Zeng B, Zhou C, Liu M, Fang Z, Xu X, Zeng L, Chen J, Fan S, Du X, et al. 2016. Gut microbiome remodeling induces depressive-like behaviors through a pathway mediated by the host's metabolism. *Molecular Psychiatry* 21: 786–96.
- Zhu K, McCormack LM, Lankau RA, Egan FJ, Wurzburger N. 2018. Association of ectomycorrhizal trees with high carbon-to-nitrogen ratio soils across temperate forests is driven by smaller nitrogen not larger carbon stocks. *Journal of Ecology* 106: 524–35.
- Zhu L, Aono M, Kim S-J, Hara M. 2013. Amoeba-based computing for traveling salesman problem: Long-term correlations between spatially separated individual cells of *Physarum polycephalum*. *Biosystems* 112: 1–10.
- Zobel M. 2018. Eltonian niche width determines range expansion success in ectomycorrhizal conifers. *New Phytologist* 220: 947–49.

СОДЕРЖАНИЕ

ПРОЛОГ	7
<i>Введение. БЫТЬ ГРИБОМ</i>	9
<i>Глава первая. СОБЛАЗН</i>	35
<i>Глава вторая. ЖИВЫЕ ЛАБИРИНТЫ</i>	60
<i>Глава третья. БЛИЗОСТЬ НЕЗНАКОМЦЕВ</i>	89
<i>Глава четвертая. МИЦЕЛИЕВОЕ СОЗНАНИЕ</i>	118
<i>Глава пятая. ЧТО БЫЛО ДО КОРНЕЙ</i>	152
<i>Глава шестая. «ВСЕЛЕСНАЯ ПАУТИНА»</i>	182
<i>Глава седьмая. РАДИКАЛЬНАЯ МИКОЛОГИЯ</i>	213
<i>Глава восьмая. ГРИБНАЯ СУТЬ</i>	249
<i>Эпилог. ВЕСЬ ЭТОТ КОМПОСТ</i>	275
Благодарности	279
Примечания	282
Библиография	372



Серия «Интересный научпоп. Хиты Amazon»

Мерлин Шелдрейк

**Запутанная жизнь
Как грибы меняют мир,
наше сознание и наше будущее**

Перевод с английского *Ольги Ольховской*

Редакция благодарит за научную консультацию А. В. Тобиас,
к. б. н., миколога, сотрудника кафедры ботаники СПбГУ

Заведующая редакцией *Юлия Данник*
Ответственный редактор *Ольга Лазуткина*
Адаптация обложки *Ольга Жукова*
Компьютерная верстка *Юлия Анищенко*
Редактор *Яна Багряная*
Корректор *Ирина Мокина*

Подписано в печать 23.08.2021

Печать офсетная. Бумага типографская. Гарнитура ZapfElliptical711 BT.
Формат 60 × 90 ¹/₁₆. Усл. печ. л. 26.

Тираж 4000 экз. Заказ

Общероссийский классификатор продукции
ОК-034-2014 (КПЕС 2008): 58.11.1 – книги, брошюры печатные
Произведено в Российской Федерации. Изготовлено в 2021 году.

Изготовитель: ООО «Издательство АСТ»
129085, РФ, г. Москва, Звёздный бульвар, д. 21,
стр. 1, ком. 705, пом. I, 7 этаж

Наш электронный адрес: www.ast.ru
E-mail: ask@ast.ru

«Баспа Аста» деген ООО
129085, Мәскеу қ., Звёздный бульвары, 21-үй, 1-құрылыс, 705-бөлме, I жай, 7-қабат.

Біздің электрондық мекенжайымыз: www.ast.ru

Интернет-магазин: www.book24.kz

Интернет-дүкен: www.book24.kz

Импортер в Республику Казахстан ТОО «РДЦ-Алматы».

Қазақстан Республикасындағы импорттаушы «РДЦ-Алматы» ЖШС.

Дистрибьютор и представитель по приему претензий на продукцию в республике Казахстан:
ТОО «РДЦ-Алматы»

Қазақстан Республикасында дистрибьютор және өнім бойынша арыз-талаптарды
қабылдаушының өкілі

«РДЦ-Алматы» ЖШС, Алматы қ., Домбровский көш., 3«а», литер Б, офис 1.

Тел.: 8 (727) 2 51 59 89,90,91,92; Факс: 8 (727) 251 58 12, вн. 107;

E-mail: RDC-Almaty@eksmo.kz

Өнімнің жарамдылық мерзімі шектелмеген. Өндірген мемлекет: Ресей