

## ПОЧВЕННЫЕ ГРИБЫ: СЕТЬ ЖИЗНИ, КОТОРАЯ ЗАЩИЩАЕТ ДЕРЕВЬЯ И БОРЕТСЯ С ИЗМЕНЕНИЕМ КЛИМАТА

**Оливия Азеведо<sup>1</sup> и Фрэнк Эшвуд<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Biological and Environmental Sciences, University of Stirling, Stirling, United Kingdom

<sup>2</sup> Forest Research, Northern Research Station, Roslin, United Kingdom

### МОЛОДЫЕ РЕЦЕНЗЕНТЫ:



**АННА**  
16 лет



**КАТЕРИН**  
15 лет



**ГЛЕБ**  
7 лет



**ВИТАЛИЙ**  
14 лет

Эктомикоризные грибы - это грибы, которые развивают взаимовыгодные (мутуалистические) отношения с корнями растений. Эти грибы образуют древние и чрезвычайно успешные партнерские отношения с лесными деревьями по всему миру. Деревья и связанные с ними грибы установили взаимовыгодный обмен: грибы помогают растениям добраться до труднодоступных питательных веществ, а взамен грибы получают постоянный и бесперебойный доступ к углеводам (например, сахарам) из растений. Это, часто невидимое, взаимодействие влияет на процессы запасаения и круговорот углерода в почве и приносит пользу растениям, обеспечивая их здоровье и питание. Эктомикоризные грибы также важны для разложения мертвых растений и животных. Эти грибы вносят вклад в биоразнообразие почвы и могут помочь нам защитить наши леса от стрессов окружающей среды, таких как изменение климата и чрезмерное землепользование.

## РЕДУЦЕНТЫ (РАЗЛАГАТЕЛИ)

это бактерии, грибы или беспозвоночные, которые разрушают ткани растений и животных, высвобождая питательные вещества обратно в почву. Без них, мертвые организмы и отходы просто бы накапливались, а растения не смогли бы получить необходимые питательные вещества.

## ОРГАНИЧЕСКОЕ ВЕЩЕСТВО

любое вещество, первоначально произведенное живыми организмами, такими как растения, животные и микроорганизмы, и которое возвращается в почву и может быть разложено. Органическое вещество богато углеродом.

## СИМБИОЗ

любой тип близкого, долгосрочного биологического взаимодействия между двумя разными живыми организмами.

## МУТУАЛИЗМ

отношения между двумя или более видами, при которых каждый вид получает выгоду.

## МИКОРИЗНЫЕ ГРИБЫ

грибы, которые образуют мутуалистические отношения с корнями растений. Растения получают питательные вещества и защиту от грибов, а грибы получают сахара от растения.

## ГРИБЫ И ИХ РОЛЬ В ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМАХ

Мы часто слышим, что разнообразие придает вкус жизни. Это утверждение можно легко применить к большинству взаимодействий в природе, в частности, происходящим в лесных экосистемах. Чтобы прожить долгую и здоровую жизнь, почти все растения в природе полагаются на сложную и разнообразную сеть почвенных организмов, питающихся друг другом. Эта, по большей части невидимая, подземная сеть состоит из крошечных бактерий, архей, грибов и многих других микроскопических организмов.

В лесных почвах роль грибов является одним из важнейших кусочков более широкой экологической сети. Грибы играют множество экологических ролей, но две из них особенно важны. Во-первых, грибы играют важную роль как **разлагатели (редуценты)**. Грибы отлично справляются с разложением мертвого растительного материала (называемого **органическим веществом**), потому что они лучше других организмов полностью расщепляют особо прочные вещества, содержащиеся в клетках древесных растений [1]. Оснащенные широким спектром ферментов, которые представляют собой специальные белки, помогающие проводить и ускорять химические реакции, грибы способны разлагать органические вещества и высвобождать труднодоступные питательные вещества, делая их доступными для растений и других обитателей почвы. Однако во время разложения грибы выделяют в качестве побочного продукта углекислый газ (CO<sub>2</sub>), что приводит к перемещению углерода из почвы в атмосферу. Грибы являются настолько эффективными редуцентами, что разложение органического вещества с их помощью является одним из крупнейших глобальных источников выбросов углерода, высвобождая 85 гигатонн (одна гигатонна равна 1 миллиарду тонн) углерода в атмосферу каждый год. Для сравнения, в 2018 году в результате сжигания ископаемого топлива было выброшено около 10 гигатонн [2].

В этой статье мы сосредоточимся на другой важной роли, которую также играют грибы, а именно на **симбиотических** отношениях с деревьями и другими растениями. Симбиотические отношения, при которых оба вида получают выгоду, известны под названием **мутуализм**. Грибы, которые формируют мутуалистические отношения с растениями, известны как **микоризные грибы**, от "mυco", что означает "относящийся к грибам" и "rhizal", что означает "корни". Микоризные грибы образуют древние мутуалистические отношения с корнями около 80% всех наземных видов растений [1]. Ископаемые микоризные сообщества представлены даже на, казалось бы, бесплодном Антарктическом континенте. Исследования показывают, что такая «совместная работа» продолжается уже 400 миллионов лет, с того времени, когда растения только начали колонизировать сушу [3]. Как и все грибы, микоризные грибы не могут производить пищу самостоятельно, поэтому они получают сахара от своих

растений-хозяев, а в обмен обеспечивают растения получаемыми из почвы водой и питательными веществами, такими как азот и фосфор.

### Рисунок 1

Эктомикоризный гриб *Lactarius camphoratus*, образующий белую оболочку-чехлик вокруг корней дуба (фотография предоставлена: Laura Martinez-Suz).



Рисунок 1

В отличие от грибов-редуцентов, которые, как правило, обитают преимущественно в верхней части почвы и высвобождают много углерода в результате своей деятельности, симбиотические микоризные грибы проникают глубже в почву. Благодаря этому грибная сеть является значительной частью запаса углерода в почве, что означает, что эти грибы удерживают углерод от высвобождения в атмосферу, сохраняя его в виде трудноразлагаемых органических веществ в почве. Было подсчитано, что растения, ассоциированные с микоризными грибами, могут переносить в почву на 35% больше углерода, чем не-микоризные растения, и значительное количество углерода в тканях микоризных грибов может сохраняться в почве в течение многих лет [4]. Это важно, поскольку нам необходимо сохранять углерод в почве в течение длительных периодов времени для того, чтобы его было меньше в атмосфере и он не приводил к росту температуры по всему миру.

Несмотря на важнейшую роль, которую грибы играют в лесных экосистемах, разнообразие грибов часто игнорируется при принятии решений в рамках лесопользования (управления лесным хозяйством). Вмешательство человека, например, вырубка леса или неизбирательное использование удобрений, может изменить сеть подземных взаимодействий и нарушить баланс всей экосистемы. Как и в любой другой сети, если хотя бы один из соединительных сегментов отсутствует или ослаблен, может пострадать вся структура.

## ЭКТОМИКОРИЗА

вид микоризы, образуемый между определенными видами грибов корнями определенных растений (множественное число - эктомикоризы).

### Рисунок 2

Известный ядовитый гриб мухомор (*Amanita muscaria*) может образовывать микоризу с несколькими видами деревьев, включая сосны, как показано на данном рисунке (иллюстрация: Angela Mele).

## СФЕРА ОХВАТА МИКОРИЗНЫХ ГРИБОВ

Существует два основных типа микоризных грибов. Один тип, называемый эндомикориза, живет внутри клеток растений. Хотя мы и не будем останавливаться на таких грибах в этой статье, они интересны тем, что являются невероятными экспертами в адаптации ко многим различным средам обитания. Эндомикоризные грибы включают арбускулярный, эрикоидный и орхидный типы микоризы. Однако основной темой нашей статьи является **эктомикориза**, которая живет на внешней стороне клеточных стенок растений. Хотя в экосистеме могут сосуществовать несколько типов микориз, эктомикориза доминирует в лесах умеренного и бореального пояса, где около 6000 видов грибов создают симбиотические ассоциации со многими деревьями и другими растениями.

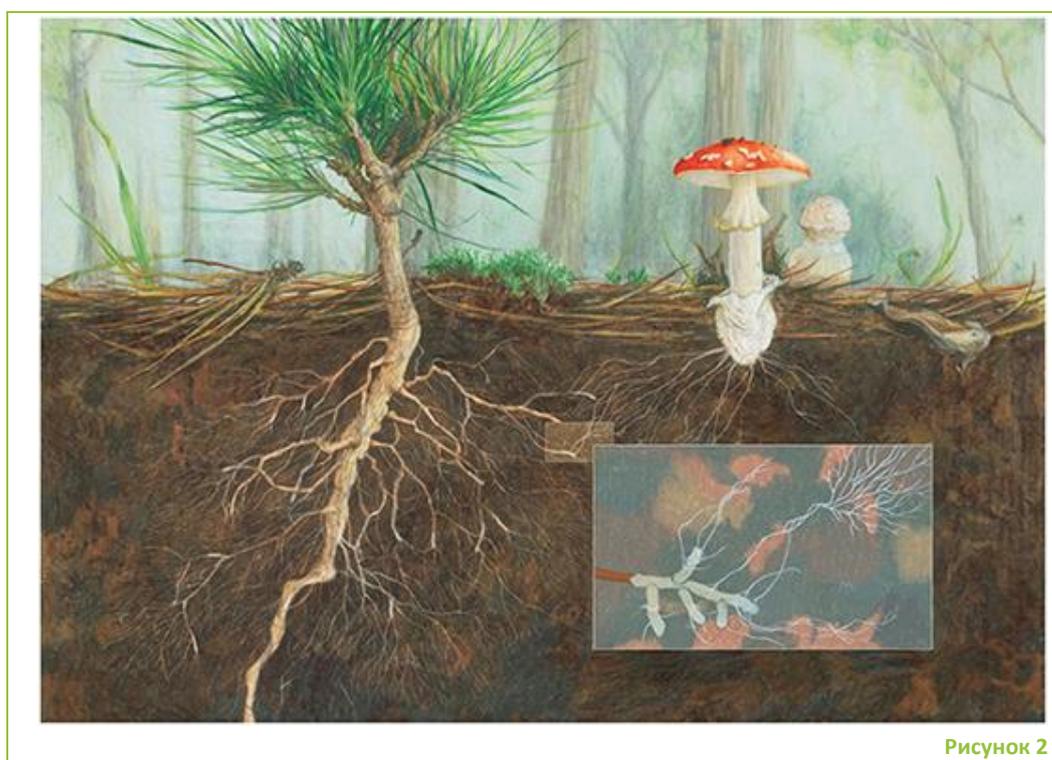


Рисунок 2

## ПЛОДОВОЕ ТЕЛО

структура, создаваемая грибами для размножения. Привычные нам грибы в лесу - со шляпкой и ножкой - это плодовые тела.

## ГИФЫ

длинные, ветвящиеся структуры грибов (грибница) которые распространяются по почве для поглощения и переноса питательных веществ (единственное число - гифа).

Эктомикориза состоит из двух типов важных структур: **плодовых тел** и **гиф**. Плодовые тела - это структуры, содержащие споры, используемые эктомикоризой для размножения. Около 4 500 видов эктомикоризных грибов имеют надземные плодовые тела (как те грибы, которые мы видим в лесу), в то время как до четверти всех видов имеют подземные плодовые тела (например, трюфели). Эктомикоризы также имеют гифы (от греч. "паутина"), которые представляют собой длинные нити или структуры, похожие на трубки, используемые грибами для поглощения и транспортировки питательных веществ. Гифы образуют «чехол» из грибницы вокруг корней растений, создавая оболочку, которая обволакивает корни, как гипс, накладываемый при переломах (Рисунок 1). Грибные гифы также растут наружу, как сосуды, прокладывая себе путь между частицами почвы, корнями и камнями, чтобы получить питательные вещества, которые находятся вне досягаемости корней

растений. Эктомикориза на корнях растений также производит антибиотики, гормоны и витамины, полезные для растения, и защищает корни растений от негативных условий, возникающих в почве: низкого уровня питательных веществ, болезнетворных микроорганизмов и токсичных веществ. В свою очередь, грибы получают постоянный и прямой доступ к углеводам (например, сахарам), вырабатываемым их растениями-хозяевами в процессе фотосинтеза.

## ЭКТОМИКОРИЗА И ЛЕСА: КОМАНДНАЯ РАБОТА В ЛУЧШЕМ ЕЁ ПРОЯВЛЕНИИ

Эктомикоризные грибы предпочитают в качестве своих партнеров (растений-хозяев) древесные виды растений, такие как деревья и кустарники. Иногда они могут формировать эксклюзивные связи, когда только один вид грибов объединяется с определенным видом деревьев. Однако эктомикоризные грибы обычно ассоциированы с большим количеством видов деревьев. Обычно на корневой системе одного дерева можно обнаружить несколько различных видов микоризных грибов либо один вид гриба, который образует микоризу с несколькими различными видами деревьев. Например, норвежская ель может образовывать симбиоз с более чем 100 различными видами грибов. Известный ядовитый гриб мухомор может колонизировать корни нескольких видов деревьев, включая сосну, березу, ель и эвкалипт (Рисунок 2).

Диапазон видов растений, колонизируемых эктомикоризой, относительно невелик - всего около 2% всех растений мира. Однако растения, с которыми эктомикоризные грибы вступают в партнерские отношения, занимают большие территории и имеют высокую экономическую ценность, например, в качестве источника древесины. В северных регионах с умеренным климатом эктомикоризу образуют такие деревья как сосна, тополь, ель, пихта, ива, бук, береза и дуб, а в южном полушарии такими деревьями чаще всего являются эвкалипт и южные виды бука.

Эктомикориза дает деревьям и лесам способность адаптироваться к сезонным и ландшафтным изменениям, например, обеспечивая достаточное количество воды в течение всего года и помогая растениям заселять новые участки и типы почвы. Грибы также защищают растения от деградации почвы, загрязнений и изменения климатических условий. Ученые заметили прямую связь между сокращением численности эктомикоризных грибов и ухудшением здоровья деревьев. Поскольку каждый эктомикоризный гриб обладает своим уникальным набором характеристик, каждый вид является необходимым и незаменимым. Например, некоторые виды предпочитают прохладные или влажные условия окружающей среды; другие лучше развиваются в теплое или сухое время года; некоторые виды являются экспертами в получении фосфора и азота из минеральной части почвы, а другие более эффективны при получении этих питательных веществ из разлагающегося органического вещества [5].

Эктомикоризные грибы также являются чрезвычайно важным связующим звеном между растениями и почвенными пищевыми сетями, которые представляют собой сложное сообщество организмов, обитающих в почве, и взаимодействия между ними. Эти грибы обеспечивают важными питательными веществами организмы, живущие в почве вокруг корней растений, такие как микроскопические грибы, бактерии, простейшие и беспозвоночные животные. Грибы также образуют плодовые тела, которые являются необходимой пищей для диких животных в лесных экосистемах. Например, многие грызуны, такие как северная белка-летяга и западная красноспинная полевка, зависят от трюфелей в качестве основного источника пищи. Многие другие млекопитающие питаются грибами, в том числе медведи, олени и мыши. Люди восхищаются сложными и часто красивыми структурами грибов, получая огромное удовольствие от обучения их морфологическому определению, изучения их экологии; многим также нравится вкус грибов в составе кулинарных деликатесов. Дикорастущие грибы также используются в качестве лекарственных средств, а фармацевтическая промышленность часто заинтересована в изучении антибактериальных свойств эктомикоризных грибов.

## ЗАЩИТА НАШИХ ЛЕСОВ И ГРИБОВ

Несмотря на важность эктомикоризного симбиоза в лесах по всему миру, сохранение эктомикоризных грибов и их мониторинг для оценки здоровья лесов редко учитываются при принятии решений в лесоводстве. Функции и услуги, которые предоставляют леса, зависят от биоразнообразия почвы. Грибы являются одним из основных компонентов этого биоразнообразия, что делает их важным партнером в преодолении глобальных проблем, с которыми мы сталкиваемся в настоящее время. Грибы могут вносить свой вклад в долгосрочное изъятие углерода из атмосферы, что может помочь человечеству бороться с последствиями изменения климата. Благодаря участию в круговороте важнейших питательных веществ, грибы также могут помочь предотвратить деградацию почв, чтобы земля могла продолжать производить продукты питания и поддерживать жизнь. Ученые и землеустроители должны продолжать изучать и охранять эктомикоризные грибы, чтобы эти важные организмы продолжили осуществлять свою важнейшую роль в сети жизни на нашей планете.

## БЛАГОДАРНОСТИ

Мы хотели бы поблагодарить за финансовую и/или материально-техническую поддержку Университет Стирлинга, а также компаниям Forest Research, Natural England, Woodland Trust, Forestry Commission Scotland и Tarmac.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. van der Heijden, M. G. A., Martin, F. M., Selosse, M. A., and Sanders, I. R. 2015. Mycorrhizal ecology and evolution: the past, the present, and the future. *New Phytol.* 205:1406–23. doi: 10.1111/nph.13288
2. Friedlingstein, P., Jones, M. W., O'sullivan, M., Andrew, R. M., Hauck, J., Peters, G. P., et al. 2019. Global carbon budget 2019. *Earth Syst. Sci. Data.* 11:1783–838. doi: 10.5194/essd-11-1783-2019
3. Brundrett, M. C. 2002. Coevolution of roots and mycorrhizas of land plants. *New Phytol.* 154:275–304. doi: 10.1046/j.1469-8137.2002.00397.x
4. Frey, S. D. 2019. Mycorrhizal fungi as mediators of soil organic matter dynamics. *Annu. Rev. Ecol. Evol. Syst.* 50:237–59. doi: 10.1146/annurev-ecolsys-110617-062331
5. Amaranthus, M. P. 1998. The Importance and Conservation of Ectomycorrhizal Fungal Diversity in Forest Ecosystems: Lessons From Europe and the Pacific Northwest. Portland, OR. doi: 10.2737/PNW-GTR-431

**EDITOR:** Rémy Beugnon, German Centre for Integrative Biodiversity Research (iDiv), Germany

**SCIENCE MENTOR:** Ryan Thomas Weir

**CITATION:** Azevedo O and Ashwood F (2022) The Soil Fungi: A Web of Life That Protects Trees and Fight Climate Change. *Front. Young Minds* 10:652660. doi: 10.3389/frym.2022.652660

**CONFLICT OF INTEREST:** The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

**COPYRIGHT** © 2022 Azevedo and Ashwood. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution and reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

## МОЛОДЫЕ РЕЦЕНЗЕНТЫ:



### АННА, 16 ЛЕТ

Я хотела участвовать в программе "Frontiers for Young Minds", потому что думала, что это будет отличная возможность узнать больше о мире вокруг меня! Я люблю естественные науки, особенно биологию и физику. После школы я бы хотела заниматься этими дисциплинами.



### КАТЕРИН, 15 ЛЕТ

Я люблю музыку и пение, играю на скрипке и гитаре, а также люблю заниматься писательством! Я состою в труппе горского танца и работаю волонтером с детьми в местных детских клубах. Мне нравится посещать молодежные мероприятия в моей церкви и заниматься фитнесом. Я надеялась, что рецензируя эти статьи, я смогу узнать о новых и интересных вещах!.



### ГЛЕБ, 7 ЛЕТ

Я люблю путешествовать и уже посетил много интересных мест: горы, различные леса, тундру, пустыню, холодные и теплые моря. Мне интересно изучать природу и особенно животных. Я также люблю кошек и читаю книги о беспозвоночных и динозаврах. Рецензируя статьи, я могу больше узнать об окружающем мире, а потом поделиться своими впечатлениями с друзьями.



### ВИТАЛИЙ, 14 ЛЕТ

Я люблю спорт, и науку, поэтому мне было интересно присоединиться к проекту "Frontiers for young minds" в качестве молодого рецензента. Тема почвенных грибов, охватывающая роль грибов в природе, показалась мне очень интересной. Я был удивлен, когда понял, насколько важны грибы, особенно для сохранения климата.

## АВТОРЫ



### ОЛИВИЯ АЗЕВЕДО

Я бывший журналист, который решил стать почвоведом. Я переехала из Португалии в Шотландию, где в настоящее время являюсь аспирантом Университета им. Стерлинга. Мои исследования включают в себя много работы с лесными почвами в поисках ответа на один важный вопрос: что происходит с почвой и живущими в ней существами, когда вы сажаете деревья. Мои исследовательские интересы включают биоразнообразие почвы; круговорот питательных веществ; мутуалистические отношения, связывающие надземные и подземные компоненты наземных экосистем; деградацию почв и управление ими, а также исторические почвенные ландшафты. Но не ограничиваются ими. \*[olivia.azevedo@stir.ac.uk](mailto:olivia.azevedo@stir.ac.uk)



## **ФРЭНК ЭШВУД**

Страсть к природе побудила меня изучать биологию в университете, где я участвовал в исследовательских проектах по экологии беспозвоночных в Шотландии и Мексике в качестве волонтера. Проработав несколько лет консультантом по охране окружающей среды, я вернулся в университет и защитил кандидатскую диссертацию, изучая дождевых червей на рекультивированных свалках. Сейчас у меня отличная работа в качестве почвенного эколога, в компании Forest Research, и я исследую биоразнообразие почв в лесных массивах Великобритании. В свободное время я преподаю почвенную биологию и занимаюсь макрофотографией (фотографированием крошечных животных, живущих в почве).

## **ПЕРЕВОД**

### **АНДРЕЙ ГЕОРГИЕВИЧ ЗУЕВ**

Я почвенный миколог и эколог, работаю в Институте проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН в России и Лейпцигском университете в Германии. Мне особенно нравится изучать микоризные грибы и их взаимодействия с почвенными животными в условиях умеренного и тропического климата. Я хочу понять, какова роль микоризных грибов в сложных почвенных пищевых сетях и формировании почв, а также узнать больше о функционировании и биоразнообразии экосистем на нашей планете.

КОРРЕКЦИЯ ПЕРЕВОДА:

### **АННА ИГОРЕВНА ЗУЕВА**

Я эколог и микробиолог, работаю в лаборатории почвенной зоологии и общей энтомологии Института проблем экологии и эволюции им. А.Н. Северцова РАН (Россия). Я исследую разнообразие бактерий, грибов и вирусов в разных почвенных местообитаниях. В основном я применяю молекулярные методы анализа. Сейчас я занимаюсь изучением сообществ микроорганизмов, связанных с социальными насекомыми – такими, как термиты и муравьи.