

Биоразнообразиие почв - Что самое важное?

Авторы

Кейтлин Лютесис – старший лаборант. Работает в лаборатории биогеохимии в Центре исследований и сельскохозяйственных разработок, и агропродовольственных товаров в Летбридже, Канаде. Имеет степень магистра наук по почвоведению и обладает большим опытом работы в проведении исследований на полях, в теплицах и лабораториях. Свой опыт работы в области аналитической химии применяет к почвам и тканям растений, а также к пробам газов и воды, взятых из окружающей среды. В свободное время любит рисовать и ходить в горы со своей собакой Спраут.



Бенджамин Эллерт – доктор наук по почвоведению. Работает научным сотрудником в области биогеохимии в Центре исследований и сельскохозяйственных разработок и агропродовольственных товаров в Летбридже, Канаде. Интерес Бенджамина к сельскому хозяйству исходит из его ранних лет жизни на небольшой смешанной ферме в Милк-Ривер в южном Альберте. Обладает значительным опытом в проведении исследований в области биогеохимического круговорота агроэкосистем и обмена парниковыми газами в земной атмосфере путем применения изотопных методов к потокам микроэлементов в окружающей среде.

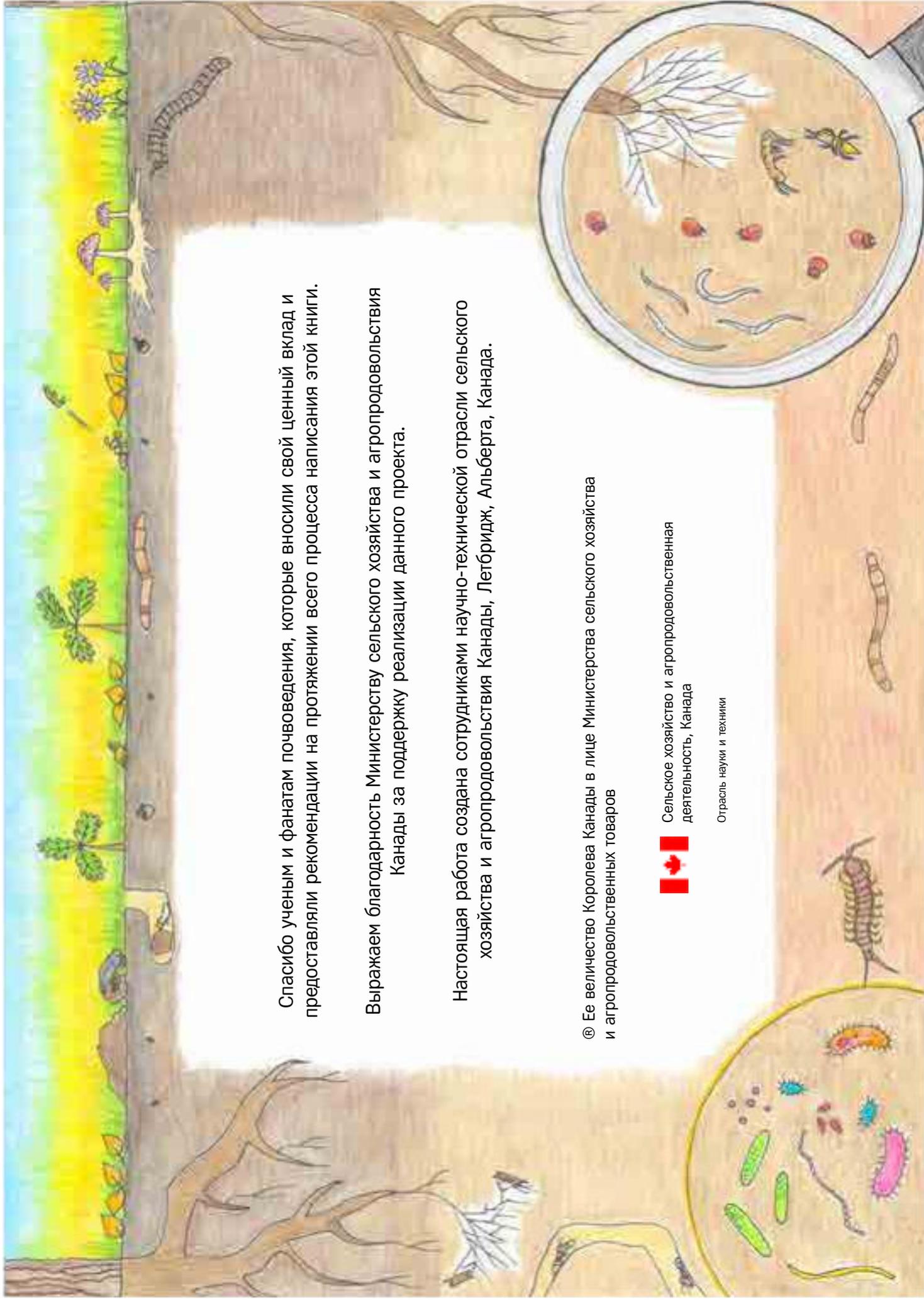
BIODIVERSITY

Биоразнообразии почв



Что самое важное?

Авторы: Кейтлин Лютесис и Бенджамин Эллерт
Иллюстрации: Кейтлин Лютесис



Спасибо ученым и фанатам почвоведения, которые вносили свой ценный вклад и предоставляли рекомендации на протяжении всего процесса написания этой книги.

Выражаем благодарность Министерству сельского хозяйства и агропродовольствия Канады за поддержку реализации данного проекта.

Настоящая работа создана сотрудниками научно-технической отрасли сельского хозяйства и агропродовольствия Канады, Летбридж, Альберта, Канада.

© Ее величество Королева Канады в лице Министерства сельского хозяйства и агропродовольственных товаров



Сельское хозяйство и агропродовольственная деятельность, Канада

Отрасль науки и техники

Добро пожаловать в клуб фанатов почвы! Здесь встречаются ученые из разных лабораторий и обсуждают проводимые ими исследования в области почвоведения. В этом году тема клуба -

Биоразнообразии почв

Почва - это экосистема, состоящая из множества живых и неживых компонентов. Много разных ученых являются членами этого клуба, и они нам помогут понять биоразнообразие почвы и выяснить, что является наиболее важной живой частью или группой организмов в почве. Познакомьтесь с этими учеными!



Билли - ботаник, изучает жизнь растений



Эдвард - энтомолог и зоолог,
специализирующийся на почвенных насекомых



Мо - микробиолог, изучает микроскопическую
жизнь в почве



Зои - почвенный зоолог, изучает почвенных
животных



Мелоди - миколог и микробиолог,
специализирующийся на грибах

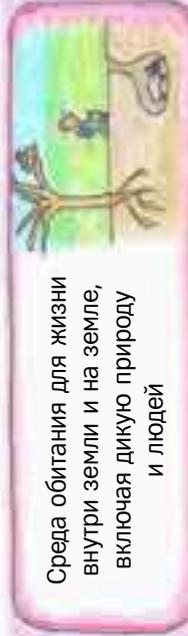


Эмили - эколог, изучает взаимодействие
между почвенными организмами
и окружающей их средой

Что такое биоразнообразии почв?

“Биоразнообразии - это разнообразии жизни на Земле”, - сказала Эмили, эколог. Биоразнообразии включает в себя все живые существа, такие как растения, животные и микробы. Таким образом, биоразнообразии почвы - это общее разнообразии жизни в почве”, - ученые кивнули в знак согласия.

“Биоразнообразии имеет важное значение, потому что по мере увеличения количества различных организмов, польза для экосистемы также увеличивается”, - продолжила она. “Прямые выгоды для людей называются экосистемными услугами. К некоторым примерам экосистемных услуг относятся следующие:



Среда обитания для жизни
внутри земли и на земле,
включая дикую природу
и людей



Круговорот
и хранение
питательных
веществ в почве



Продукты питания и
другие материалы,
которые мы используем
для одежды и
строительства

На самом деле, формирование почвы можно считать экосистемной услугой, поскольку людям нужна почва, чтобы выращивать растения для использования в пищу и поддерживать жизнь на планете”, - соглашаются ученые.

“Мы все изучаем биоразнообразии! И мы все согласны с тем, какой аспект биоразнообразии почв является наиболее важным! Это....”



Мы, ученые, с недоумением смотрим друг на друга. Они не соглашались друг с другом! Очевидно, ответ был не так прост, как они думали.





Ботаник, Билли

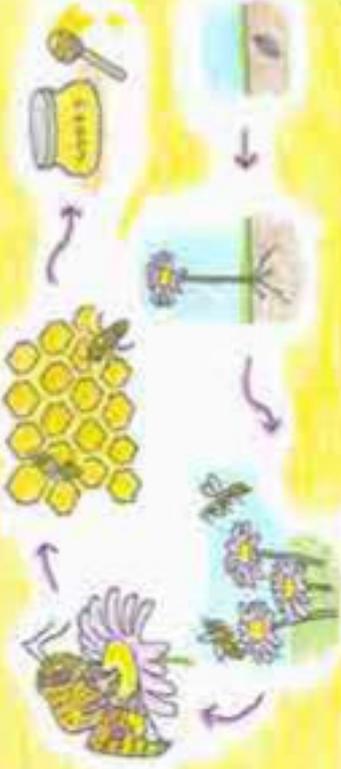
“Я ботаник и изучаю растения. Почти все изучаемые мною растения не смогут существовать без почвы, и одна из самых важных ролей почвы заключается в том, что она может поддерживать жизнь растений. В течение длительного времени целью фермеров и садоводов был посев семян и выращивание продуктов питания, а процветание цивилизации началось только тогда, когда им удалось защитить почву и ее биоразнообразие для выращивания продуктов питания.

Большая часть пищи, кроме морепродуктов, исходит из почвы.

“Подумай о хлопьях, которые ты ешь на завтрак. Злаки получают из семян пшеницы или овса, которые выросли в почве”.



“Подумай о меде. Мед получают в ульях. Пчелы собирают пыльцу со многих цветов, чтобы производить мед, а цветы растут на почве”.



“Подумай о ломтике сыра на своем бутерброде. Сыр сделан из коровьего молока. Корову кормили травой, чтобы она выросла, а затем родила теленка. Поле с травой растет на почве”.

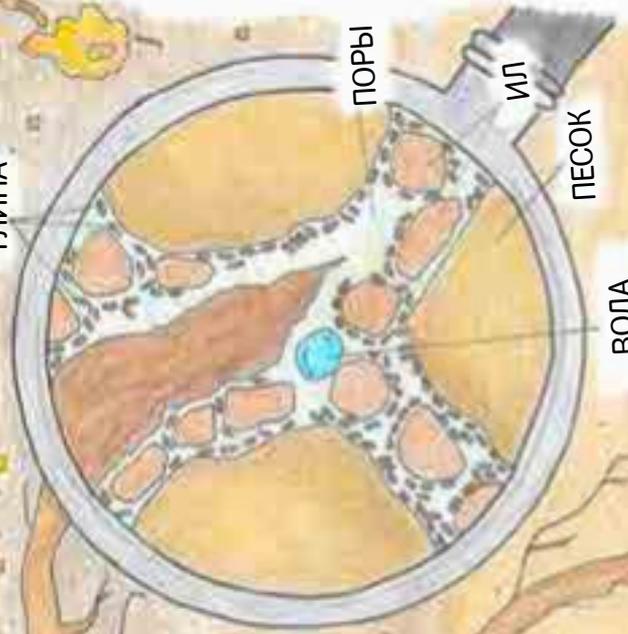


“Когда мы смотрим на экосистему, мы видим так много разных растений! Растения также могут увеличить биологическое разнообразие, которое мы не можем легко увидеть, потому что растения в большей степени обеспечивают пищу животных и микробов в почве. Когда мы сажаем только одну культуру на поле фермы или рубим лес для использования в качестве древесины, мы полностью меняем биологическое разнообразие, которое мы видим. Но мы также меняем биологическое разнообразие, которое мы не видим, в почве. Мы, люди, обязаны учитывать это биоразнообразие при использовании почвы.



"Когда мы думаем о растениях, мы обычно думаем о миллиардах растений, которые мы видим на поверхности земли. Но половина растений скрыта под землей в почве в виде корней."

ГЛИНА



"Почва не совсем твердая. Конечно, есть твердые частицы почвы, которые существуют в виде песка, ила, глины или мертвого органического вещества. Но между этими частицами есть открытые пространства, называемые порами. Эти поры могут быть заполнены водой или воздухом, которые корни растений используют для своего роста. Корни растений растут и продвигаются по самому легкому пути в почве, используя доступное поровое пространство или создавая новые каналы. Таким образом, они формируют структуру почвы. Кроме того, корни удерживают почву наподобие якоря, чтобы не сдуло и не унесло ее дождем. После того как растения умирают, они разрушаются в почве или разлагаются, что обеспечивает энергию для деструкторов (бактерии, способствующие разложению) и высвобождают питательные вещества, которые снова будут использоваться живыми растениями, микробами и животными. Это необходимо для жизни на Земле, поскольку большая часть наземной жизни зависит от растительной пищи для получения энергии и питательных веществ".

"Поскольку в мире так много растений, которые питают почти всю жизнь на планете, и поскольку растения обеспечивают основные ресурсы для существования почвенных организмов, я думаю, что растения являются самой важной частью биоразнообразия почв!"

Эдвард, энтомолог

“Я почвенный энтомолог и изучаю насекомых. Я думаю, что самая важная часть биоразнообразия почвы - это разнообразные виды насекомых, которых мы находим в почве. Почва является домом для многих насекомых, но я расскажу вам только о двух моих любимых: муравьях и навозных жуках”.



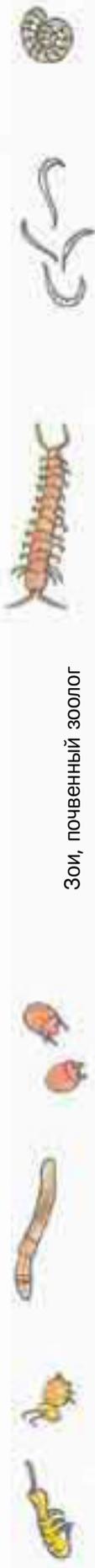
“Муравьи - инженеры экосистем, а это значит, что они оказывают большое влияние на почву, когда строят туннели и гнезда. Муравьи в колонии работают вместе для того, чтобы изменить почвенную экосистему, смешивая и увеличивая поры в почве, перемещая растительные материалы, а некоторые виды муравьев даже собирают грибы, чтобы получить энергию и питательные вещества. Активность муравьиных колоний может изменить почву быстрее и намного больше, чем мы могли бы ожидать от таких мелких насекомых. Несмотря на то что муравьи маленького размера, но из-за того, что их так много в мире, они на самом деле составляют больше биомассы или весят больше, чем земные амфибии, птицы, рептилии и дикие млекопитающие вместе взятые!”

“Навозные жуки важны для переработки навоза крупных травоядных животных, таких как пасущиеся коровы. Для навозного жука свежий навоз является ценным источником пищи и строительного материала. Некоторые виды навозных жуков просто живут в навозе, в то время как другие перемещают и изменяют форму навоза, скатывая в шарики и проталкивая их в туннели в почве. Они питаются, размножаются и живут в навозе. Они даже откладывают в него яйца, чтобы у личинок был источник пищи.”

“Можете ли вы представить себе мир, если бы навоз животных никогда не разлагался? Навоз быстро накапливался бы, грузом ложился на пастбища, так что трава и животные, зависящие от нее, больше не могли бы расти. Навозные жуки продлевают хорошую работу по быстрому расщеплению навоза, что в противном случае происходило бы гораздо медленнее. Навозные жуки помогают создавать здоровые почвы, возвращая питательные вещества в почву и распространяя и разрушая навоз, чтобы растения и другие живые существа могли процветать.”

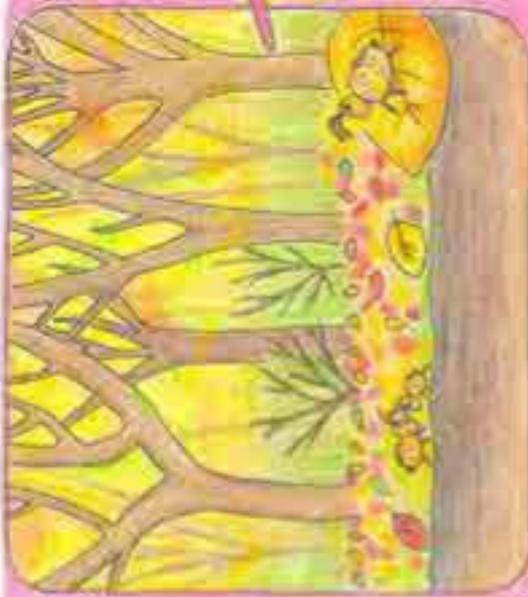


“Поскольку так много насекомых живет внутри почвы и на ней, а также потому, что они изменяют и добавляют питательные вещества в почву, я думаю, что почвенные насекомые являются самой важной частью биоразнообразия почвы!”



Зои, почвенный зоолог

“Я почвенный зоолог. Это означает, что я изучаю почвенных животных. Меня интересуют почвенные животные, такие как ногохвостки, клещи, дождевые черви, многоножки, сороконожки и нематоды. Почвенные животные очень распространены: их может быть множество миллионов на квадратном метре почвы. Это все равно, что иметь популяцию больше чем население всего вашего города, в размахе твоей руки!”



“Ногохвостки - это очень маленькие насекомоподобные организмы. Когда чувствуют опасность, ногохвостки могут использовать небольшой придаток или хвост, который находится ниже их тела, чтобы подпрыгнуть в воздух. Они могут подпрыгивать в воздухе на 10 см, это наподобие того, как мы с вами бы прыгнули через небоскреб. Ногохвостки живут по всему миру, на самых экстремальных почвах, от Антарктики до пустынь и тропических джунглей”.

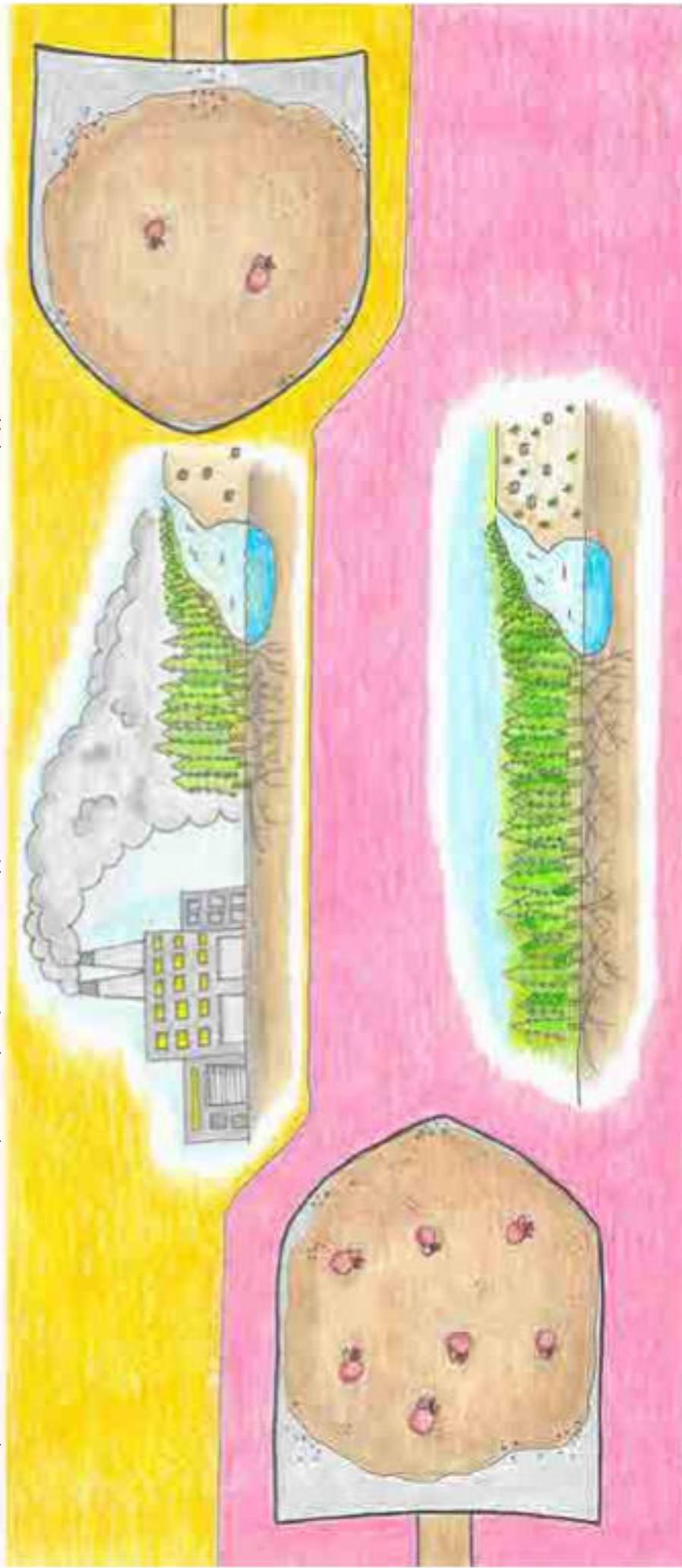


“В почвах ногохвостки измельчают, смешивают и едят мертвые растительные материалы, возвращая питательные вещества назад в почву, когда они обедают. Это помогает улучшить окружающую среду для почвенных микробов и увеличить биоразнообразие почвы. Но подождите! Некоторые ногохвостки также любят есть бактерии и грибы, что также изменяет биологическое разнообразие почвенных микробов”.

"Клещи играют такую же роль в почве, что и ногохвостки; они также измельчают, смешивают и разрушают растительный материал, высвобождают питательные вещества и рассеивают в разные стороны почвенные микробы, когда они едят."



Одна из наиболее распространенных групп клещей, называемая Oribatida, используемая в качестве биоиндикатора. Биоиндикаторы - это живые существа, которые рассказывают нам о здоровье окружающей их экосистемы. Представьте, что рядом с дымовой трубой растет лес. Вследствие того что деревья растут очень медленно, то могут пройти годы, прежде чем мы обнаружим болезнь леса, и он погибнет из-за загрязнения, выходящего из дымовой трубы. К тому времени может быть уже слишком поздно, чтобы помочь лесу. Биоиндикаторы быстрее реагируют на изменения и их легче измерить, поэтому, изучив почвенных клещей, мы можем быстро определить загрязнение, наносящее ущерб экосистеме, и устранить любые проблемы. Изучение биоразнообразия этих клещей может сказать нам, здорова ли экосистема или она подвергается стрессу из-за таких нарушений, как добыча полезных ископаемых, сбор урожая или изменение климата.



В почве также живут другие длинные и тощие животные, включая земляных червей, многоножек, сороконожек и крошечных нематод!



“Земляные черви могут быть инженерами экосистем, как муравьи. По мере того как они прокладывают туннель через почву, они смешивают почву с растительными материалами. Это помогает разлагать растения и обеспечивает пищей другие почвенные организмы”.

“Но земляные черви также могут снизить биоразнообразие в тех почвах, в которых они не должны быть. Иногда их агрессивное туннелирование изменяет лесные почвы так, что другим почвенным организмам трудно найти знакомую пищу и среду обитания”.



“Когда они едят многоножек, они измельчают мертвые растительные материалы на более мелкие кусочки и смешивают их в почве с более мелкими почвенными животными и микробами. Другие почвенные животные не смогли бы получить столько пищи без помощи более крупных животных, таких как многоножки”.

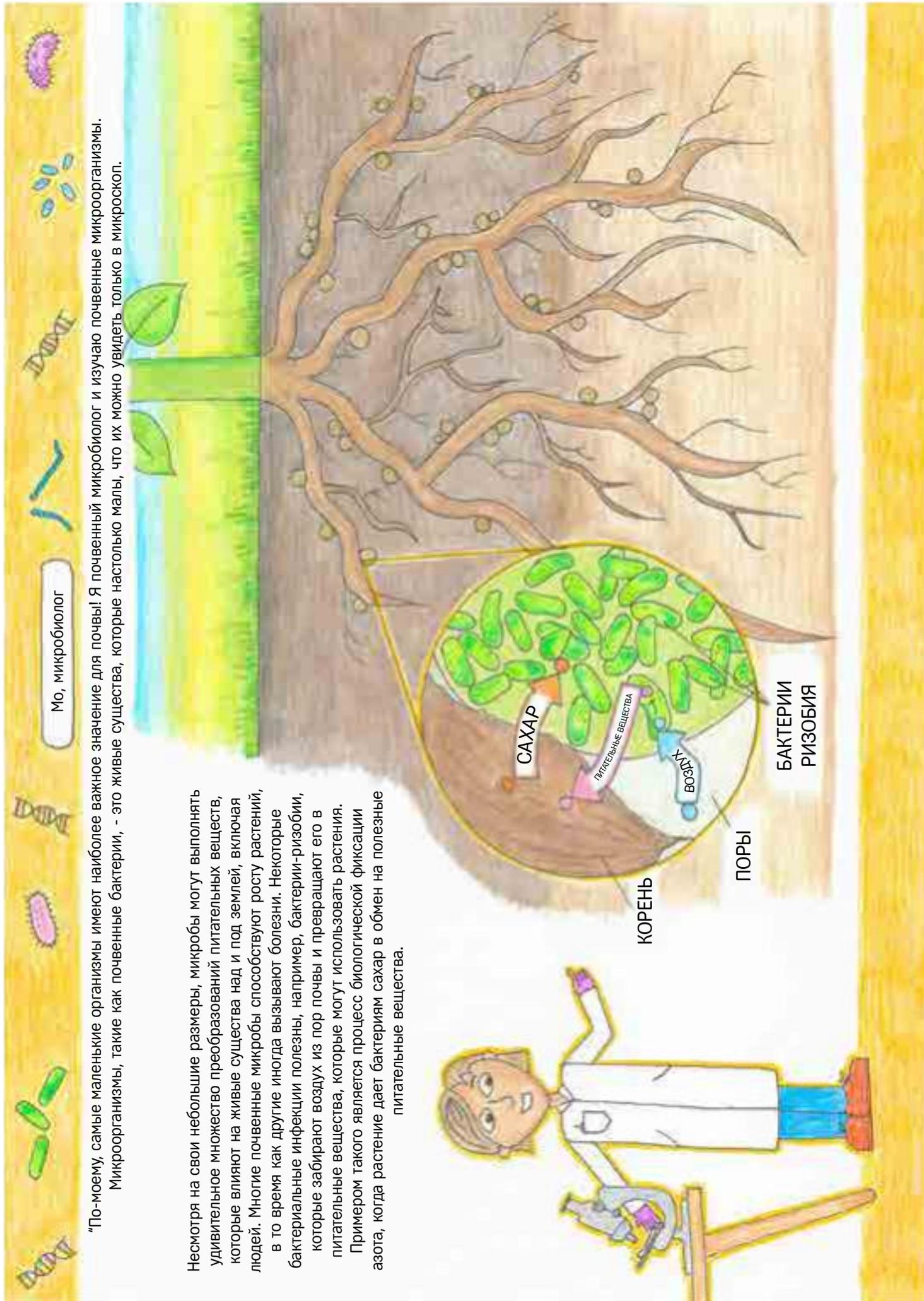


“Сороконожки – хищники, а это значит, что они охотятся на других почвенных животных, потому что им нравится их есть. Таким образом, они помогают контролировать популяции, живущие в почве”.



“Нематоды - это крошечные червеобразные почвенные животные, которые невидимы невооруженным глазом. Они питаются растениями и микробами, а более крупные почвенные животные питаются ими. Как и клещи, нематоды использовались в качестве биоиндикаторов. Но большее количество нематод не всегда означает более здоровую почву, так как некоторые нематоды становятся вредителями, когда они едят корни культурных растений”.

“Поскольку существует так много почвенных животных, которые соединяют растения и микробы, я думаю, что они являются наиболее важной частью биоразнообразия почвы!”



Мо, микробиолог

“По-моему, самые маленькие организмы имеют наиболее важное значение для почвы! Я почвенный микробиолог и изучаю почвенные микроорганизмы. Микроорганизмы, такие как почвенные бактерии, - это живые существа, которые настолько малы, что их можно увидеть только в микроскоп.

Несмотря на свои небольшие размеры, микробы могут выполнять удивительное множество преобразований питательных веществ, которые влияют на живые существа над и под землей, включая людей. Многие почвенные микробы способствуют росту растений, в то время как другие иногда вызывают болезни. Некоторые бактериальные инфекции полезны, например, бактерии-ризобии, которые забирают воздух из пор почвы и превращают его в питательные вещества, которые могут использоваться растениями. Примером такого является процесс биологической фиксации азота, когда растение дает бактериям сахар в обмен на полезные питательные вещества.

САХАР

ПИТАТЕЛЬНЫЕ ВЕЩЕСТВА

ВОЗДУХ

КОРЕНЬ

ПОРЫ

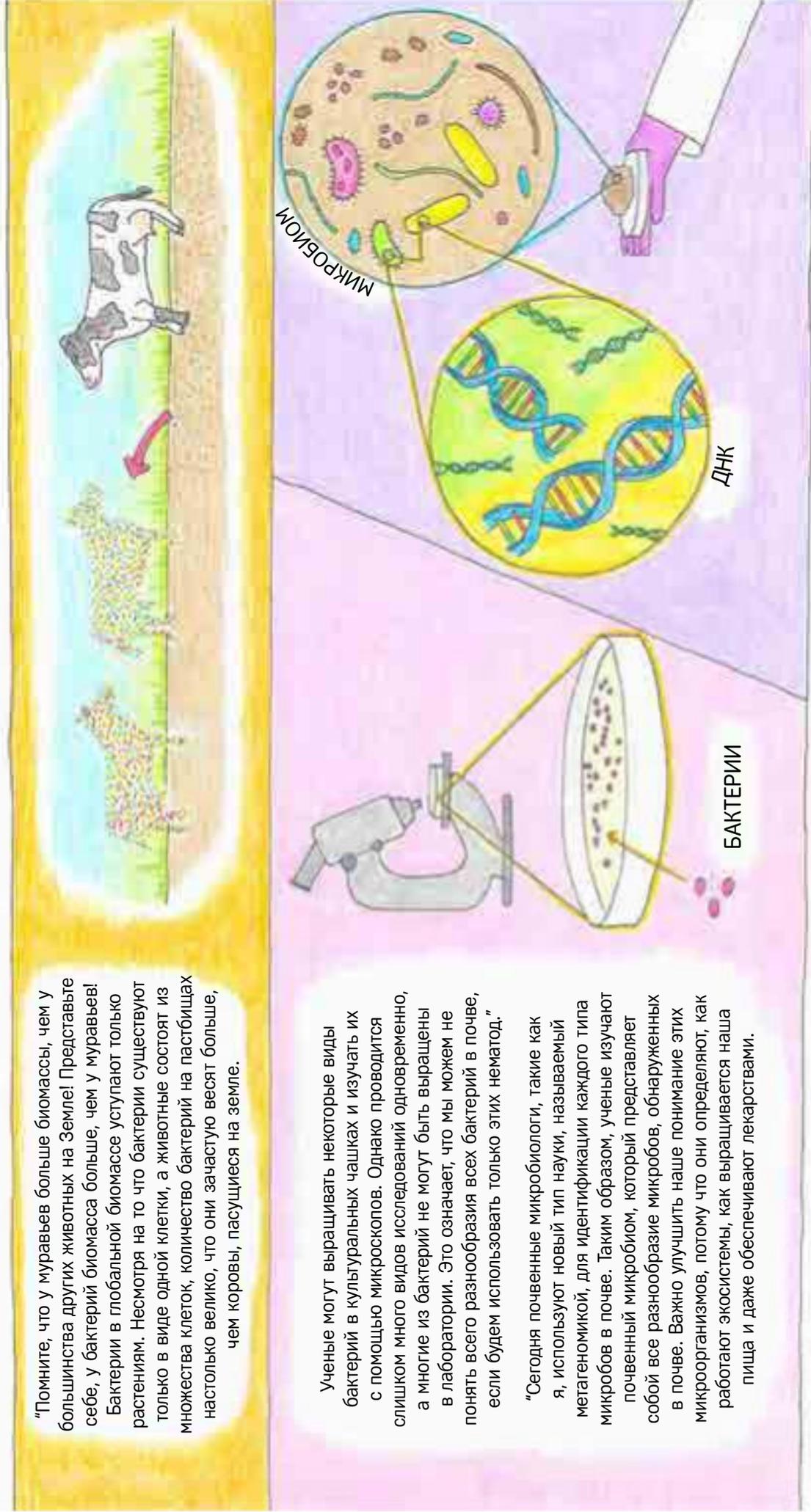
БАКТЕРИИ
РИЗОБИЯ

“Помните, что у муравьев больше биомассы, чем у большинства других животных на Земле! Представьте себе, у бактерий биомасса больше, чем у муравьев! Бактерии в глобальной биомассе уступают только растениям. Несмотря на то что бактерии существуют только в виде одной клетки, а животные состоят из множества клеток, количество бактерий на пастбищах настолько велико, что они зачастую весят больше, чем коровы, пасущиеся на земле.”

Ученые могут выращивать некоторые виды бактерий в культуральных чашках и изучать их с помощью микроскопов. Однако проводится слишком много видов исследований одновременно, а многие из бактерий не могут быть выращены в лаборатории. Это означает, что мы можем не понять всего разнообразия всех бактерий в почве, если будем использовать только этих нематод.”

“Сегодня почвенные микробиологи, такие как я, используют новый тип науки, называемый метатеномикой, для идентификации каждого типа микробов в почве. Таким образом, ученые изучают почвенный микробиом, который представляет собой все разнообразие микробов, обнаруженных в почве. Важно улучшить наше понимание этих микроорганизмов, потому что они определяют, как работают экосистемы, как выращивается наша пища и даже обеспечивают лекарствами.”

“Всего в одной чайной ложке почвы могут содержаться сотни миллионов или миллиарды бактерий. Мы пока еще не обнаружили большинство микроорганизмов в почве, и у нас мало представления о роли в почве. Здесь так много места для новых открытий! Поскольку они настолько разнообразны, я думаю, что микроорганизмы являются наиболее важными для биоразнообразия почвы!”



“Как почвенный миколог, я изучаю почвенные грибы и их связь с растительной жизнью. Некоторые грибы могут вырастать до размера больших слонов или голубых китов. На самом деле, самый большой организм на планете - это грибы!

Почвенные грибы существуют в виде длинных и тонких взаимосвязанных нитей, называемых гифами (грибной нитью). Обычно они скрыты под землей, но иногда они образуют грибы, которые мы легко можем увидеть. Некоторые почвенные грибы являются мощными разлагателями, которые могут разрушать твердые материалы, такие как дерево. Другие грибы могут быть вредителями, которые повреждают корни растений.

Многие почвенные грибы селятся в корнях растений; жизнь как грибов, так и растений зависит друг от друга. Мы называем их микоризами, что означает “корень гриба”. Но почему это так успешно?

Микоризы не получают пищу путем разложения материалов, вместо этого они получают сахар из корней растений. В свою очередь грибы расширяют корневую систему и служат крошечными трубопроводами для перемещения воды и питательных веществ к растению, получая доступ к тем ресурсам, которые могут быть им недоступны.

Микоризы могут даже помогать растениям общаться друг с другом с помощью химических веществ. Растение высвобождает химическое вещество из корней, которое проходит через гифы к другим связанным растениям. Таким образом, растение может предупредить своих соседей о нападении насекомых.

Поскольку грибы перерабатывают питательные вещества почвы, помогают растениям расти и общаться, а также имеют такую большую биомассу в почве, я думаю, что они имеют самое важное значение для биоразнообразия почвы!”



“Я согласна со всеми моими коллегами-учеными; важен каждый организм, начиная от микробов до растений и всего остального, что способствует биоразнообразию почвы. Я почвенный эколог и изучаю взаимодействие между почвенным организмом и окружающей средой.

Почвенная экосистема - это огромная паутина, в которой все взаимосвязано. Растения связаны с почвенными микробами, которые преобразуют питательные вещества для использования своими корнями. Почвенные микробы связаны с почвенными животными, которые распространяются и поедают их. Почвенные насекомые связаны с растениями, которые обеспечивают им среду обитания и пищу. Почвенные животные связаны с почвенными насекомыми, которые помогают измельчать и смешивать материалы в почве, чтобы они могли есть. Между ними много связей, и я могла бы продолжать и продолжать их перечислять. Проще говоря, у нас не может быть биоразнообразия без почвы, и у нас не может быть почвы без биоразнообразия организмов, живущих там”.



“Когда мы используем почву, недостаточно учитывать только ресурсы, такие как пища и деревья, которые мы можем использовать прямо сейчас; мы должны думать о будущем. При выращивании продуктов питания, вырубке леса, добыче полезных ископаемых или строительстве городов мы всегда должны спрашивать себя:

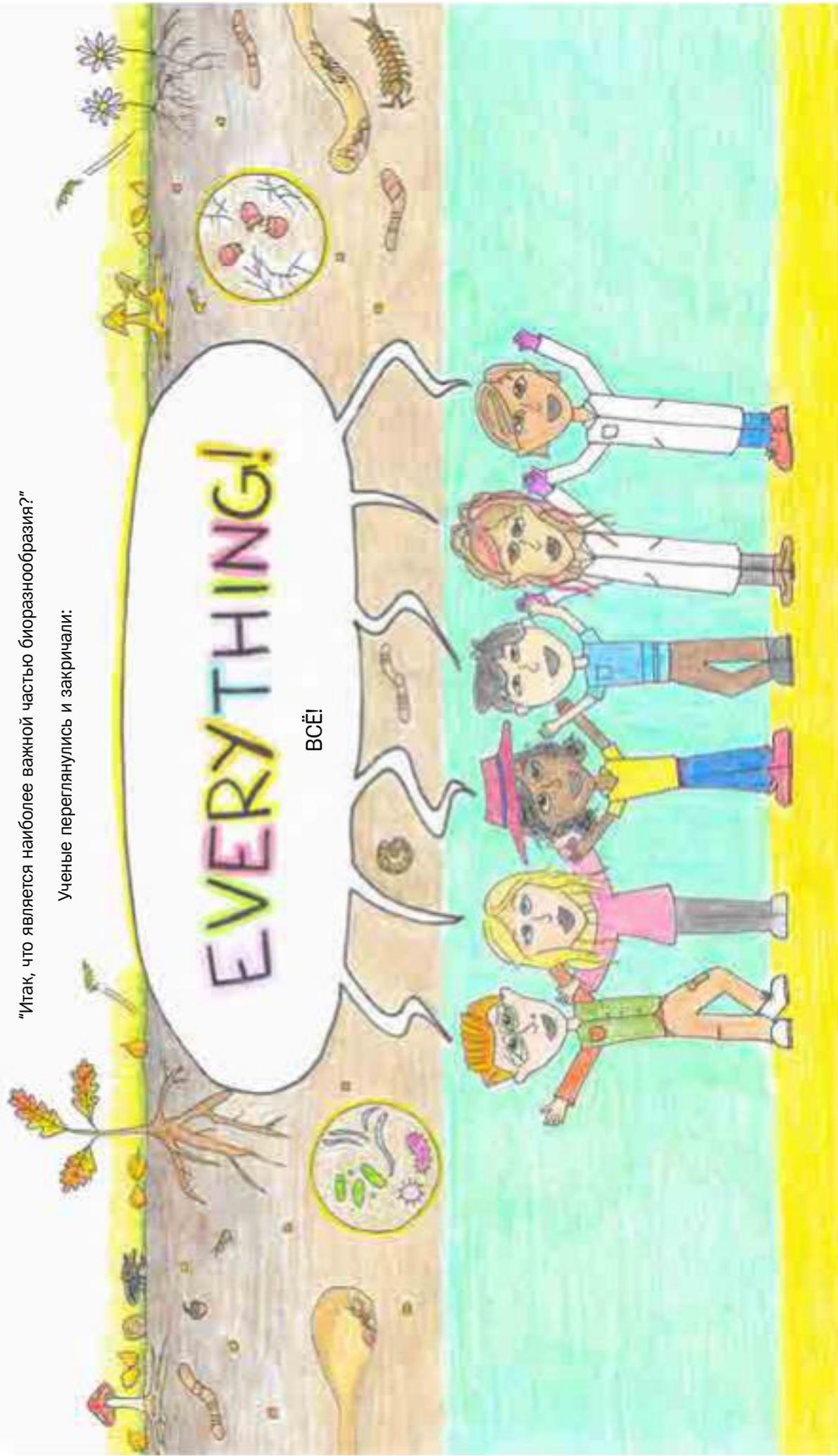
“Позволит ли наша сегодняшняя деятельность сохранить биоразнообразие почвы, чтобы мы продолжали извлекать выгоду из деятельности почвенного организма в будущем?” Потому что без должного ухода за нашими почвами и живыми организмами, находящимися в почве, мы не сможем сохранить жизнь на нашей планете”.

"Почва разнообразна, сложна и насыщена биологическим разнообразием, и все мы, ученые, должны работать вместе, чтобы лучше понять, как биоразнообразие почвы способствует здоровью экосистемы и способности почвы предоставлять экосистемные услуги", - закончил эколог.

Ученые улыбнулись друг другу. Наконец они поняли, что должны работать вместе, чтобы защитить биоразнообразие почвы, сохранить почву живой и сохранить жизнь на Земле.

"Итак, что является наиболее важной частью биоразнообразия?"

Ученые переглянулись и закричали:



Книги для юных читателей:

- Grover, S. and Heisler, C. 2018. Exploring Soils: A Hidden World Underground Australia: CSIRO Publishing. ISBN: 9781465490957. Colour Illustrations, 32 p.
- Ignotofsky, R. 2018. The Wondrous Workings of Planet Earth: Understanding our world and its ecosystems. Berkeley: Ten Speed Press. ISBN 9780399580413 128 p. also see Author's presentation at <https://youtu.be/KQsM0TEzIUg>
- Kappler, C. and Virostek, R. 2019. Dirt to Dinner: It Starts With A Seed, but is That All We Need? Medicine Hat, Canada: Connie Kappler ISBN: 9781999299606, 39 p.
- Rajcak, H., Laverdunt, D. 2019. Unseen World: Real-life Microscopic Creatures Hiding All Around Us. Kent, UK: What on Earth Books ISBN 1999968018 36 p.
- Stroud, J. L. V. Redmile-Gordon and W. Tang. 2020. Under your Feet: Soil, Sand and Everything Underground. New York, New York: DK Publishing. ISBN: 9781465490957. Colour Illustrations, 64 p.

Веб-Ресурсы:

- Behan-Pelletier, Valerie. Soil biodiversity podcast <http://www.oursafetynet.org/2020/05/21/podcast-episode-1-soil-biodiversity/>
- Beugnon, R., Jochum, M., Phillips, H. [Collection Editors] 2020. Frontiers for Young Minds, Soil Biodiversity. <http://kids.frontiersin.org/collection/11796/soil-biodiversity>
- Blanchart, E., Chevallier, T., Sapjianskas, J., Bispo, A. Guellier, C. and Arrouays, D. 2010. Soil biodiversity card game [in French] <http://www.ademe.fr/vie-cachee-sols-English>
- version: www.globalsoilbiodiversity.org/s/Macrofauna-game-cards.pdf
- FAO. 2020. It's alive! Soil is much more than you think. Soil biodiversity is the foundation for human life. video. https://youtu.be/hbdsH0nd_gw?t=22; also see photos & clips at www.flickr.com/photos/faofthetun/albums/72157716380971407/ with/50460418053/
- Murray, Andy. A chaos of delight - soil mesofauna. <https://www.chaosofdelight.org/Orgi-azzi>, A. et al. 2016. Global soil biodiversity atlas. 184 p. Joint Res. Ctr, European Soil Data Ctr. https://esdac.jrc.ec.europa.eu/public_path/shared_folder

Ресурсы для учителей и учащихся:

- Asshoff, R., Riedl, S. and Leuzinger, S. 2020. Towards a better understanding of carbon flux. J. Biol. Education 44(4):180-184.
- Green, K., Roller, C. and Cubeta, M. 2019. A plethora of fungi: Teaching a middle school unit on fungi. Science Activities. 56(2):57-62.
- Krzic, M., Wilson, J., Hazlett, P. and Diophon, A. 2019. Soil science education practices used in Canadian post secondary, K-12, and Informal settings. Nat. Sci. Educ. 48:190015 6 p.
- Lehtinen, Taru. 2016. Tea4Science: Lesson plan for plant litter decomposition. Soil Science Soc. Amer., Madison USA; one of many resources at www.soils4teachers.org/home
- Lessard, R. Gignac, L.D. 2002. Carbon Rising: Measuring CO₂ fluxes from the soil. Green Teacher, n68 p 34-38.
- Lindbo, D., Kozlowski, D.A. and Robinson, C. [Editors]. 2012. Know soils, know life. Soil Science Soc. America, Madison USA 206 p. doi:10.2136/2012.knowsoil
- McGenity and 30 others. 2020. Visualizing the invisible: class excursions to ignite children's enthusiasm for microbes. Microbial Biotechnology 13(4):844-887.

Научная база:

- Addison, J.A. 2009. Distribution and impacts of invasive earthworms in Canadian forest ecosystems. Biol. Invasions. 11:59-79.
- Bar-On, Y.M., Phillips, R. and Mila, R. 2018. The biomass distribution on Earth PNAS 111(14): 5266-5270. Also see: www.vox.com/science-and-health/2018/5/29/17386112/all-life-on-earth-chart-weight-plants-animals-pnas
- Behan-Pelletier, V. M. 2003. Acari and collembolan biodiversity in Canadian agricultural soils. Can J. Soil Sci. 83:279-288.
- Berg, et al. 2020. Microbiome definition revisited: old concepts and new challenges. Microbiome 8:103 22 p.
- Briones, M.J.I. 2014. Soil fauna and soil functions: A jigsaw puzzle. Frontiers in Environmental Science vol. 2, 22 p.
- Chen, X.D. and 5 others. 2020. Soil biodiversity and biogeochemical function in managed ecosystems. Soil Research 58:1-20.
- Christiansen, K.A., Bellinger, P., Janssens, F. 2009. Collembola (Springtails, Snow Fleas). In: Resh and Cardé (Eds.), Encyclopedia of Insects, 2nd Edition, Academic Press pp. 206-210.
- Cristescu, M.E. and Hebert, P.D.N. 2018. Uses and misuses of environmental DNA in biodiversity science and conservation. Ann. Rev. Ecology, Evolution and Systematics 49:209-230.
- Dubey, A., Malla, M.A., Khan, F., et al. 2019. Soil microbiome: a key player for conservation of soil health under changing climate. Biodiversity and Conservation 28:2405-2429.
- Floate, K.D. 2011. Arthropods in Cattle Dung on Canada's Grasslands. In K. D. Floate (Ed.), *Arthropods of Canadian Grasslands*, Vol. 2. Biologocal Survey of Canada. Pp. 71-88.
- Fouke, D.C. 2011. Humans and the soil. Environmental Ethics 33:147-161.
- Frouz, J., Jilkova, V. 2008. The effects of ants on soil properties and processes (*Hymenoptera: Formicidae*). Myrmecological News. 11:191-199.
- Giesen, S., Wall, D.H., van der Putten, W.H. 2019. Challenges and opportunities for soil biodiversity in the anthropocene. Current Biology 29:R1036-R1044.
- Gorzalak, M. A., Asay, A.A., Pickles, B. J., Simard, S. W. 2015. Inter-plant communication through mycorrhizal networks mediates complex adaptive behaviour in plant communities. AOB PLANTS. 2015. Doi: 10.1093/aobpla/plv050
- Lavelle, P.A. and 10 others. 2016. Ecosystem engineers as a self-organized soil: A review of concepts and future research questions. Soil Science 181:91-109.
- Peralta, A., Sun, Y., McDaniel, M.D., Lennon, J.T. 2018. Crop rotational diversity increases disease suppressive capacity of soil microbiomes. Ecosphere 9(5):e02235 16 p.
- Powelson, D., Xu, J. and Brookes, P. 2017. Through the eye of the needle - The story of the soil microbial biomass. In K.R. Tate, Ed. Microbial Biomass: A Paradigm Shift in Terrestrial Biogeochemistry. London UK: World Scientific, London, 327 p.
- Saleem, M., Hu, J. Jousset, A. 2019. More than the sum of its parts: Microbiome biodiversity as a driver of plant growth and soil health. Annu. Rev. Ecol. Syst. 50:145-68.
- Thakur, M.P. and 26 others. 2020. Towards an integrative understanding of soil biodiversity. Biol. Rev. 95:350-364.