

# НЕВИДИМЫЕ ФЕРМЕРЫ И АГРОНОМЫ

Как почвенные бактерии меняют будущее сельского хозяйства

В одной чайной ложке садовой земли живет больше микроорганизмов, чем людей на всей планете. Одни из них непрерывно трудятся, превращая недоступный для растений азот из воздуха в питательные вещества, другие – растворяют камни, добывая фосфор из минералов, синтезируют гормоны роста и защищают корни растений от болезней. Все эти невидимые труженики – почвенные бактерии, которые миллионы лет практиковали и совершенствовали искусство земледелия. Сегодня ученые учатся понимать язык этого микроскопического мира и создают на основе нового знания революционные биотехнологии, способные изменить будущее сельского хозяйства

Каждый год наша планета теряет 24 млрд тонн плодородной почвы, что в три раза превышает скорость ее восстановления. На создание минеральных удобрений в мире затрачивается 2% всей потребляемой энергии, при этом в атмосферу выбрасывается столько углекислого газа, сколько производит такая промышленно развитая страна, как Германия. При этом растения усваивают лишь треть азота из внесенного удобрения, а остальное попадает в водоемы и грунтовые воды, загрязняя их.

Решение этих глобальных проблем может лежать буквально у нас под ногами – в почве. Ведь она представляет собой не просто смесь минералов и органики, а сложнейшую живую экосистему, превосходящую по биоразнообразию даже тропические леса.

В каждом кубическом сантиметре здоровой почвы обитает от 100 млн до 1 млрд бактерий – больше, чем звезд в нашей галактике. И каждый из 50 тыс. видов микроорганизмов, жителей этого подземного «мегаполиса», выполняет свою уникальную функцию.

Эти микроскопические существа создали первую и самую совершенную на планете систему земледелия, и наука только начинает постигать секреты этих природных фермеров и агрономов. Примером такого подхода служит масштабный научный проект, реализуемый в новосибирском Институте химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН при участии сотен школьников из 85 регионов России.

Исследования, начавшиеся в рамках проекта «Всероссийский атлас почвенных микроорганизмов как основа для поиска новых противомикробных продуцентов и ферментов с уникальными свойствами», сейчас продолжают в рамках проекта «Гражданская наука и генетические технологии для сельского хозяйства» при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ.

## На почвенной «фабрике»

Почву можно сравнить с фабрикой, работающей круглосуточно и без выходных. В ее «цехах» трудятся разные специалисты. Бактерии-«химики» рода *Rhizobium* превращают недоступный растениям газообразный азот в аммоний ( $\text{NH}_4^+$ ), затрачивая на это столько же энергии, сколько

**Ключевые слова:** почвенные бактерии, ризосфера, биоудобрения, стимуляция роста растений, полногеномное секвенирование, гражданская наука.

**Key words:** soil bacteria, rhizosphere, biofertilizers, plant growth promotion (PGP), whole genome sequencing, citizen science

В публикации использованы фото из архива автора



ВОРОНИНА Елена Николаевна – кандидат биологических наук, доцент кафедры биологии Специализированного учебно-научного центра и старший преподаватель кафедры молекулярной биологии и биотехнологии Новосибирского государственного университета, старший научный сотрудник и заведующая группой молекулярной генетики Института химической биологии и фундаментальной медицины СО РАН. Автор и соавтор свыше 220 научных работ

© Е. Н. Воронина, 2025



требуется при промышленном производстве. Для фиксации 1 г азота они «сжигают» до 25 г сахара!

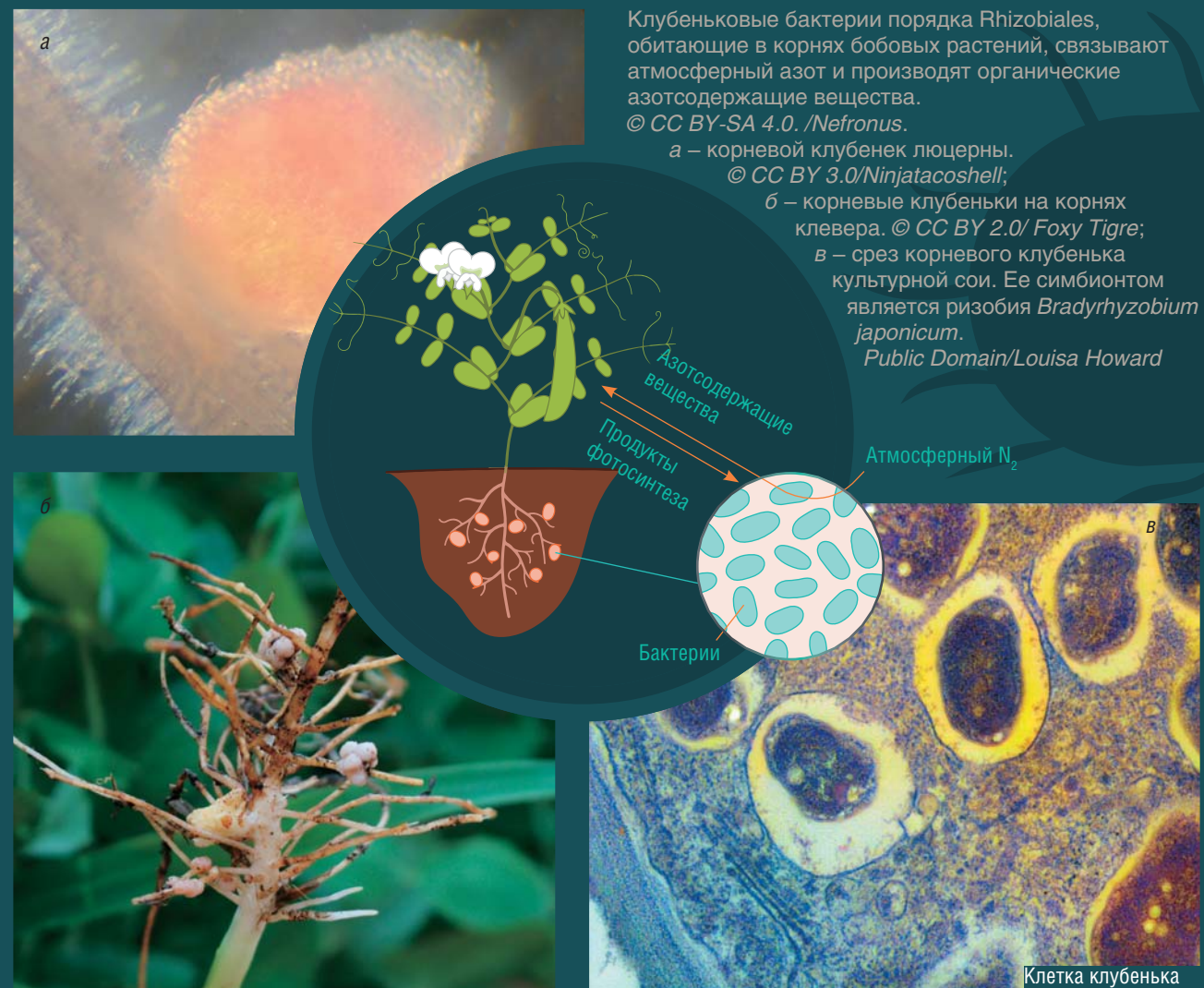
Рядом работают «горняки» – *фосфатмобилизирующие бактерии*, такие как представители родов *Bacillus* и *Pseudomonas*, способные переводить нерастворимые фосфаты в формы, доступные для растений. Эти бактерии выделяют органические кислоты, растворяющие даже самые стойкие минералы. Некоторые из них производят до 600 мкг/мл растворимого фосфора – такая эффективность сопоставима с промышленными растворителями.

Особую службу несут бактерии-«фармацевты», которые производят целый арсенал биологически активных веществ: *ауксины* для стимуляции роста корней, *цитокинины*, активирующие клеточное деление, *гибберелины*, способствующие растяжению стеблей и росту растений. Почвенные концентрации этих природных

гормонов, синтезируемых бактериями, иногда не уступают тем, что содержатся в самих растениях.

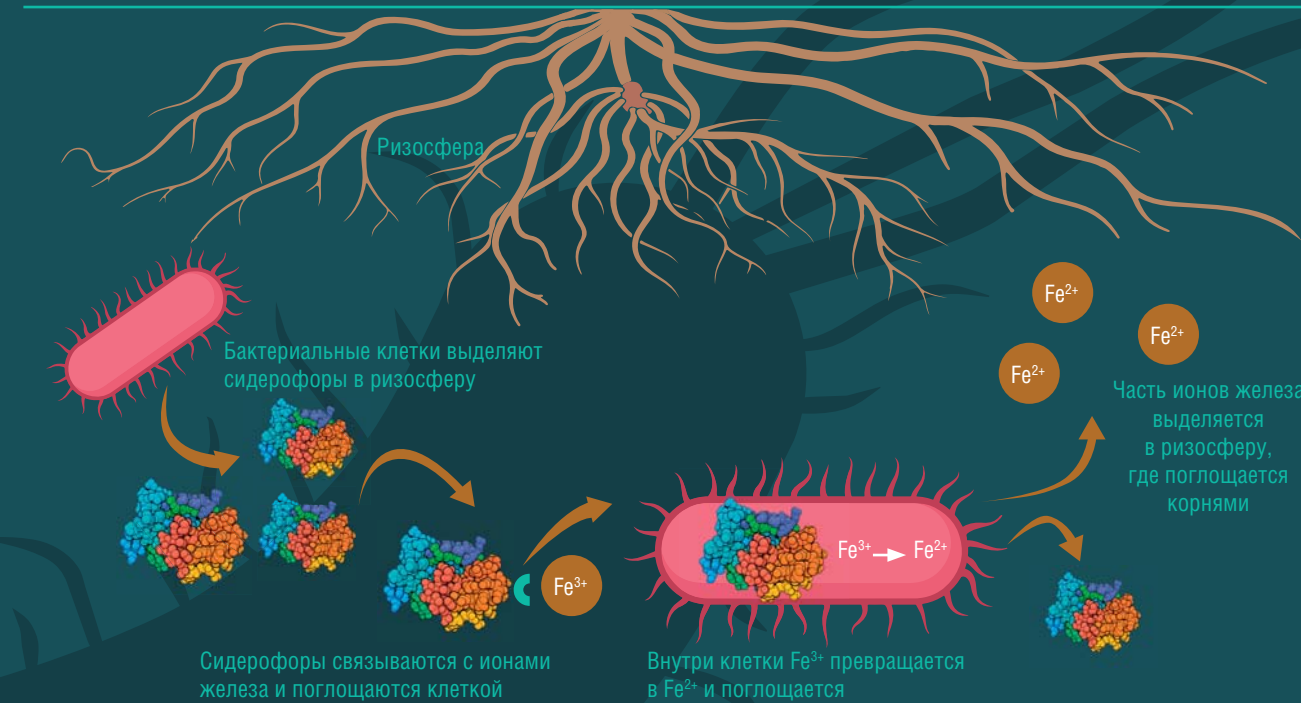
Не нужно забывать и о микробах-«металлургах», выделяющих в почву *сидерофоры* – высокотехнологичные молекулярные захваты для связывания малорастворимого и недоступного растениям трехвалентного железа ( $Fe^{3+}$ ), необходимого для процессов фотосинтеза и дыхания. Эти «клешни» держат железо в миллион раз крепче самых современных синтетических хелатных соединений.

Завершают картину бактерии-«охранники» – продуценты антибиотиков широкого спектра действия. Представители тех же *Bacillus* и *Pseudomonas* способны синтезировать более 300 различных противомикробных соединений, создавая вокруг корней «щит» от патогенов.

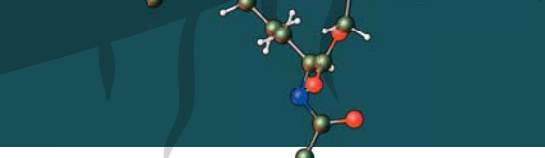


Клубеньковые бактерии порядка Rhizobiales, обитающие в корнях бобовых растений, связывают атмосферный азот и производят органические азотсодержащие вещества.

а – корневой клубень люцерны. © CC BY-SA 4.0. /Nefronus.  
 б – корневые клубеньки на корнях клевера. © CC BY 2.0/ Foxy Tigre;  
 в – срез корневого клубенька культурной сои. Ее симбионтом является ризобия *Bradyrhizobium japonicum*. Public Domain/Louisa Howard



Бактериальные клетки выделяют сидерофоры в ризосферу  
 Сидерофоры связываются с ионами железа и поглощаются клеткой  
 Внутри клетки  $Fe^{3+}$  превращается в  $Fe^{2+}$  и поглощается  
 Часть ионов железа выделяется в ризосферу, где поглощается корнями



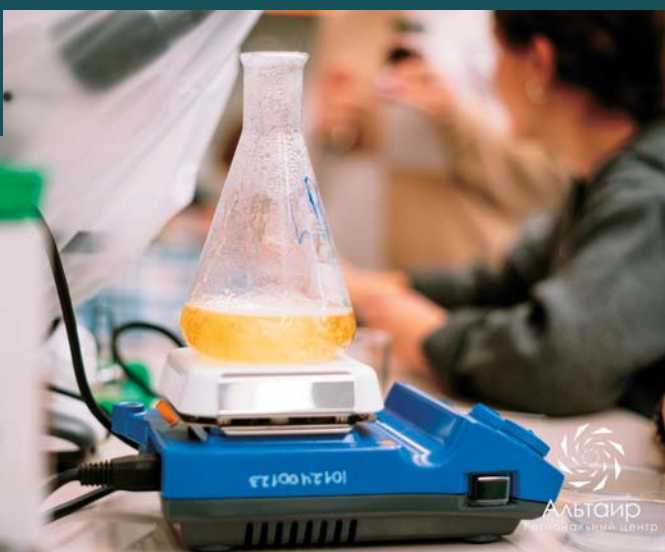
В аэробных условиях почвы из ионов железа  $Fe^{2+}$ , обладающих высокой растворимостью в воде, образуются ионы  $Fe^{3+}$ . При кислотности среды, близкой к нейтральной, последние обладают очень низкой растворимостью, из-за чего микроорганизмы не могут усваивать железо непосредственно из окружающей среды. Выделенный в среду сидерофор образует комплекс с ионами  $Fe^{3+}$ , которые попадают внутрь микробной клетки с помощью механизмов активного транспорта.  
 Рис. с сайта <https://www.biorender.com>

Слева – молекулярная структура сидерофора триацетилфузарина- $Fe^{3+}$  (ТАФС), выделяемого грибом *Aspergillus fumigatus*. Public Domain/Smokefoot

Полезные почвенные бактерии чаще всего остаются привязанными к своему дому – *ризосфере*. Эта узкая, шириной всего несколько миллиметров, зона вокруг корней растений представляет собой настоящий «Манхэттен» микробного мира – плотность населения здесь на два порядка выше, чем в окружающей почве. При этом сами растения – вовсе не пассивные участники этих отношений. Через корневые выделения они привлекают нужных им микробов, выплачивая им «зарплату» в виде органических веществ (сахаров, органических кислот, аминокислот). Растения тратят до 40% всех продуктов фотосинтеза на обеспечение своей микробной «команды поддержки». Благодаря применению современной флуоресцентной микроскопии удалось выяснить, что ризосфера

представляет собой не хаотичное скопление микробов, а высокоорганизованную структуру с «транспортными магистралями», «промышленными кластерами» и даже «жилыми кварталами», где разные виды бактерий образуют устойчивые микроколони.

**Защитник при стрессе**  
 В коллекции бактерий, собранной благодаря усилиям гражданских ученых, особый интерес вызывают *энтеробактерии* (род *Enterobacter*), хотя виды из этой группы традиционно считаются скорее медицинскими, чем сельскохозяйственными объектами. Настоящей «звездой» стал штамм *E. coli* AF-22b-4245, обнаруженный в Брянской области. В лабораторных



### «БОЛЬШАЯ ОХОТА» ЗА НЕВИДИМКАМИ

Проект создания атласа почвенных микроорганизмов начался с простой идеи: привлечь школьников к сбору образцов почвы для научных исследований. Но за четыре года работы он превратился в крупнейшую в России программу так называемой *гражданской науки* (*citizen science*) в области микробиологии, охватившую территорию от Калининграда до Владивостока.

Более 500 школьников и учителей из 85 российских регионов собрали свыше 2 тыс. образцов из самых разных экосистем. Метод сбора напоминал геологическую разведку: в каждой точке отбирались пять проб методом «конверта» на расстоянии 3–5 м друг от друга. Такой подход обеспечил репрезентативность выборки и позволил охватить огромные территории с минимальными затратами.

«Урожай» оказался поистине богатым: за три последних года из собранных образцов удалось выделить сотни штаммов бактерий, обладающих самыми разными полезными для растений свойствами

условиях он активно рос в безазотной среде, эффективно растворял фосфаты и производил сидерофоры.

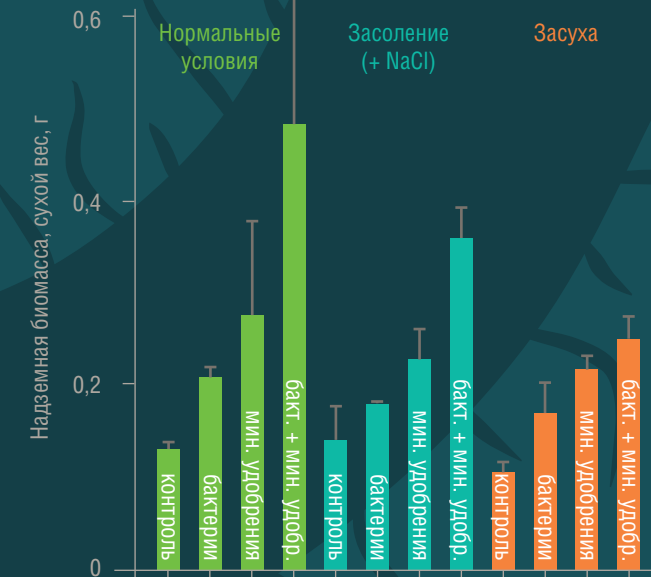
Но самое удивительное – в лабораторных тестах штамм сохранял активность даже при добавлении в питательную среду достаточно большого (до 5%) количества поваренной соли, а также при моделировании недостатка влаги путем добавления *полиэтиленгликоля*, удерживающего воду. Эти результаты указывали на высокий потенциал штамма при использовании в засушливых регионах с засоленными почвами, что и было подтверждено в натуральных экспериментах.

Как выяснилось, наилучший эффект дает обработка растений бактериями с одновременным внесением минеральных удобрений. В обычных условиях такая комбинация увеличивала высоту растений пшеницы на 66%, а сухую надземную биомассу – более чем в два раза по сравнению с контролем. Впечатляющими оказались и результаты комбинированной обработки в стрессовых условиях, негативно влияющих на рост пшеницы. При засолении почвы и при засухе она значительно

Важной площадкой проекта по созданию атласа почвенных микроорганизмов стал региональный центр «Альтаир» (Новосибирская область), цель которого – выявление, поддержка и развитие способностей одаренных детей.

*Слева* – школьники на образовательных сменах «Охотники за бактериями» в «Альтаире».

Под руководством специалистов из ИХБФМ СО РАН они осваивают методы микробиологии и участвуют в поиске перспективных штаммов бактерий



При выращивании растений пшеницы в теплице максимальный эффект на их рост, в том числе в условиях засоления и засухи, оказала комбинированная обработка штаммом *E. soli* AF-22b-4245 и минеральным удобрением

(на 35–40%) повышала высоту растений и более чем в два раза – массу надземной части.

Важно, что в засушливых условиях в растениях, обработанных бактериями, менялось соотношение разных видов пигментов, отвечающих за преобразование световой энергии в химическую. В листьях таких растений увеличилось содержание *хлорофилла В* – помощника основного *хлорофилла А*, напрямую участвующего в процессе фотосинтеза. Также у них вдвое повысился уровень аминокислоты *пролина*, которую растения накапливают для защиты от обезвоживания.

Таким образом, штамм AF-22b-4245 не только стимулирует рост растений в благоприятных условиях, но и помогает им адаптироваться к неблагоприятным факторам среды, усиливая их собственные защитные механизмы.

Чтобы понять принцип этого действия, была проанализирована активность ключевых генов пшеницы, участвующих в ответе на стресс. В этот список вошли гены, кодирующие белки-рецепторы стрессовых сигналов, сигнальные белки, факторы транскрипции, регуляторы биосинтеза защитных метаболитов, а также ферменты антиоксидантной защиты.

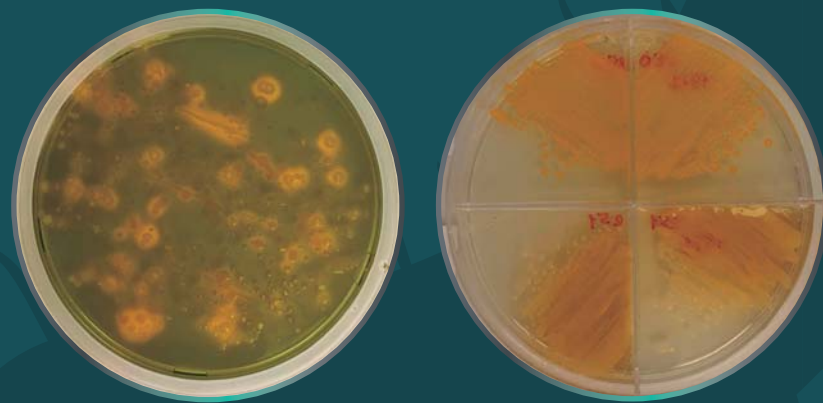
Результаты оказались неожиданными. В обычных условиях добавление бактерий активировало

антистрессовую защиту растений – бактерии словно «предупреждали» растение о возможных неприятностях, помогая ему заранее подкорректировать обмен веществ. Но при реальном стрессе (засолении или засухе) картина менялась на противоположную: присутствие бактерий, напротив, снижало активность всех стрессовых генов. Растения выглядели так, будто условия среды были в норме.

Возможно, что предварительная «подготовка» оказалась настолько эффективной, что растение уже не воспринимало неблагоприятные условия как критическую угрозу. Другое объяснение – сама бактерия способна менять свои химические сигналы в зависимости от внешних условий.

### Извилист путь от генотипа к фенотипу

Еще одна перспективная группа рода *Enterobacter* – представители вида *E. ludwigii*. Из собранной коллекции были отобраны четыре наиболее активных штамма этого вида, которые демонстрировали в лабораторных тестах «профессиональную специализацию»: штамм GMG\_291 эффективно мобилизовал фосфор; штаммы GMG\_G336 и GMG\_378 синтезировали ауксин – гормон,



Для выявления бактерий, производящих сидерофоры (молекулярные «захваты» железа), используется специальная питательная среда, меняющая цвет в присутствии этих молекул. Чем активнее штамм производит сидерофоры, тем больше зона желтого окрашивания вокруг колонии (вверху слева). Для дальнейшей работы отбираются колонии с максимально большими светлыми зонами. Справа вверху – чистые культуры отобранных штаммов, готовые к молекулярной идентификации и геномному секвенированию

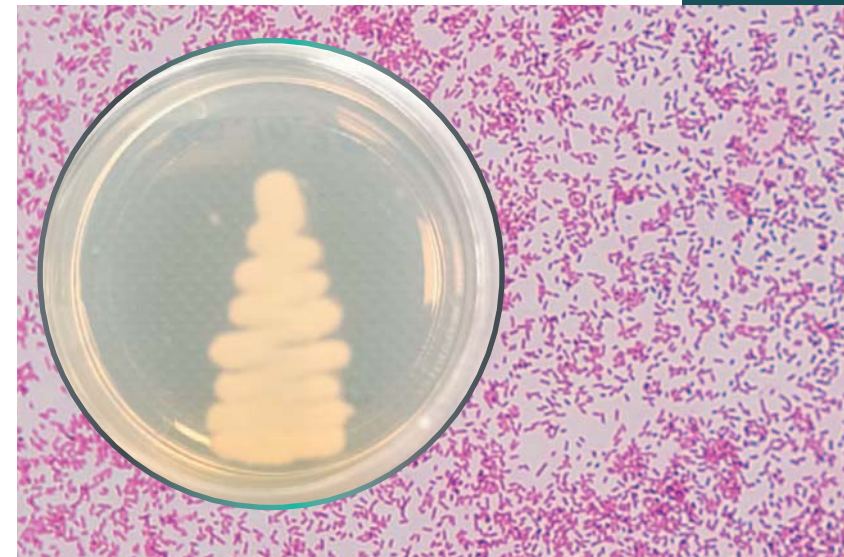
стимулирующий рост и ветвление корневой системы, а штамм GMG\_278 специализировался на производстве гормона гибберелина, ускоряющего прорастание семян и растяжение стеблей, а также салициловой кислоты – сигнальной молекулы, запускающей защитные механизмы растения против патогенов и абиотических стрессов.

Такой «разброс» функциональных свойств внутри одного вида потребовал углубленного генетического анализа. Логичным объяснением казалось, что все эти штаммы различаются набором генов, отвечающих за взаимодействие с растениями.

Для проверки гипотезы было проведено полногеномное секвенирование всех четырех штаммов. Каждый геном размером около 4,5–4,7 тыс. генов должен был содержать подробную «инструкцию» – весь набор генов, отвечающих за известные метаболические пути синтеза фитогормонов, мобилизации фосфора и фиксации азота в конкретных условиях. Однако в реальности все оказалось намного сложнее.

Самым интригующим открытием стали парадоксы соотношения «генотип – фенотип», т. е. взаимоотношения между наследственностью

Для оценки жизнеспособности бактерий в различных стрессовых условиях (засуха, засоление и др.) применяется резазуриновый тест. Синий краситель резазурин в присутствии продуктов жизнедеятельности бактерий восстанавливается до резорурфина (розового/красного цвета), что служит показателем метаболической активности и роста микроорганизмов. Слева – результаты резазуриновой пробы на планшете с колониями бактерий, культивируемых в разных условиях. Розовая окраска говорит о перспективности штамма для использования на практике



Бактерия *Enterobacter ludwigii* GMG\_278, выделенная из образцов почвы, собранных в рамках проекта

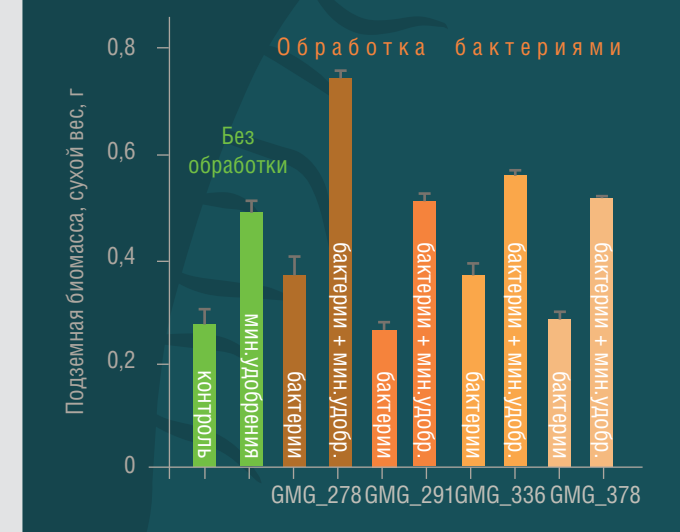
При комбинированном применении разных штаммов бактерии *E. ludwigii* и минеральных удобрений практически все показатели биомассы пшеницы, как надземной, так и подземной, увеличились (внизу). При этом в лидерах оказался штамм GMG\_278

и ее конкретным воплощением. Так, хотя штамм GMG\_291 и содержал полный генетический набор, необходимый для производства ауксинов, в реальности он синтезировал их в минимальных количествах. Все четыре штамма демонстрировали способность разрушать молекулярный предшественник этилена – газообразного «стрессового гормона» растений, который вырабатывается у них в ответ на повреждения и другие неблагоприятные воздействия. Однако классический ген *acdS*, отвечающий за эту функцию, не был обнаружен ни в одном бактериальном геноме!

Все найденные несоответствия указывают на сложность регуляции генной активности у почвенных микроорганизмов. Наличие гена еще не гарантирует его работу – для активации могут потребоваться специфические сигналы от растений, определенные условия среды или взаимодействие с другими микроорганизмами. Возможно, существуют пока неизвестные, альтернативные ферментативные пути или взаимодействия между разными генами, которые и приводят к неожиданным внешним проявлениям.

К примеру, штамм GMG\_278 на первый взгляд выделялся лишь своей способностью производить рекордные количества гибберелинов и салициловой кислоты. В других лабораторных тестах он показывал скромные результаты: продукция ауксинов у него была средней, а способность к мобилизации фосфора – не выдающейся. Однако когда дело дошло до реальных экспериментов с пшеницей, добавление именно этого штамма в почву обеспечило максимальный прирост биомассы.

И в этот раз самые впечатляющие результаты дало комбинированное применение бактерий и минеральных удобрений. Так, масса надземной части растений увеличилась на 261%, а их высота – на 87%. И это не простое сложение эффектов, а настоящая синергия:

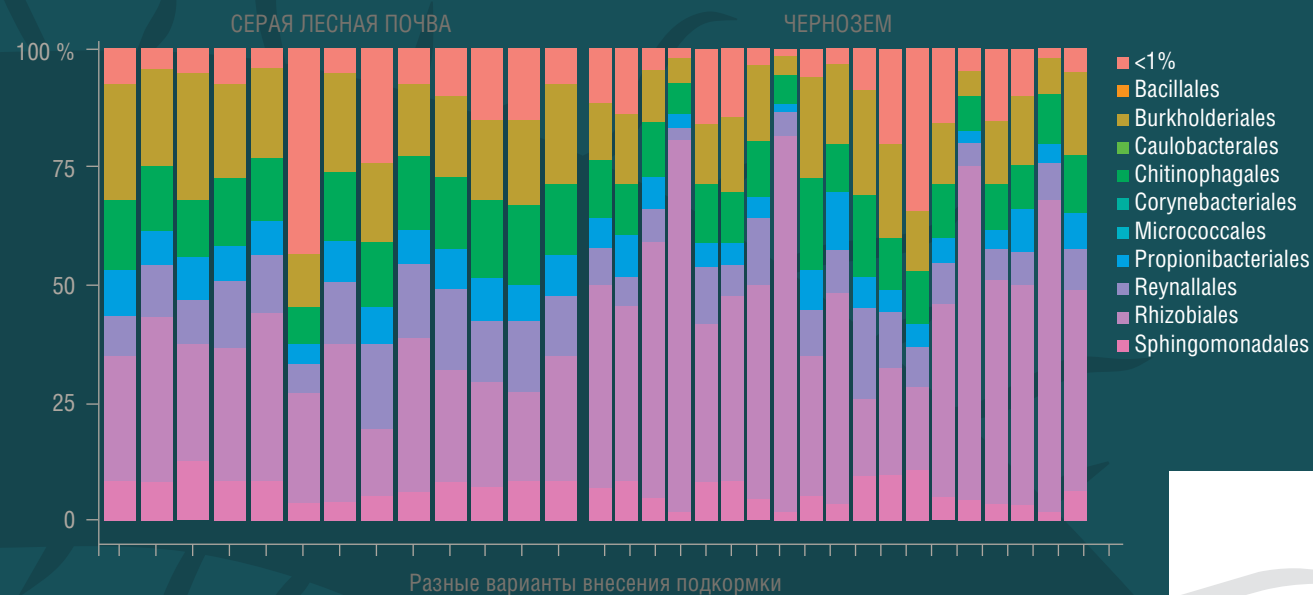


бактерии и минеральные удобрения усиливают действие друг друга, работая, по-видимому, через разные физиологические механизмы. Удобрения обеспечивают растение элементами питания напрямую, а бактерии помогают мобилизовать ресурсы почвы, синтезируют гормоны роста и активируют защитные системы самого растения.

## Экологичность против универсальности

Интуитивно нам кажется, что в мире микробов должны существовать свои «супергерои» – «супербактерии», обладающие всеми полезными для растений свойствами. Но природа выбрала иную стратегию.

Математический анализ с использованием метода главных компонент убедительно показал: выделенные



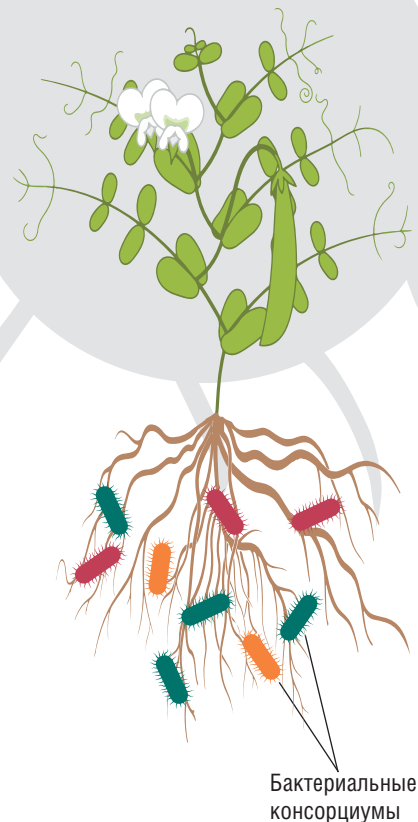
Диаграмма, иллюстрирующая таксономический состав почвенных микробных сообществ (представленность различных групп бактерий) в образцах, собранных в разных экспериментальных условиях. Группа Proteobacteria включает многих азотфиксаторов и фосфатмобилизаторов, Actinobacteria – продуцентов антибиотиков, Acidobacteria – разрушителей органики, Bacteroidetes – специалистов по разложению сложных полисахаридов и т. д. Изменения в соотношении этих групп показывают, как микробное сообщество перестраивается в ответ на внесения бактериальных консорциумов

полезные почвенные бактерии естественным образом разделяются на функциональные «гильдии». В первую – гильдию питания – входят бактерии, специализирующиеся на азотфиксации, фосфатмобилизации и синтезе фитогормонов. Вторая – гильдия защиты – объединяет продуцентов сидерофоров и антимикробных веществ.

Причин такого разделения несколько. Во-первых, энергетика: фиксация атмосферного азота сопряжена с колоссальными затратами энергии (16 молекул АТФ на каждую молекулу N<sub>2</sub>). Так что одновременная реализация всех метаболических специальностей потребовала бы огромных энергетических ресурсов, что сделало бы организм неконкурентоспособным.

Во-вторых, некоторые процессы физиологически несовместимы. Активная выработка антибиотиков бактериями может подавлять их собственный рост, что мешает эффективной колонизации корней растений. А синтез сидерофоров конкурирует с производством ауксинов, так как у этих веществ есть общий предшественник – ароматические аминокислоты.

Ризосфера – узкий (2–5 мм) слой почвы, прилегающий к корням растения, который попадает под непосредственное действие корневых выделений и почвенных микроорганизмов. Бактерии в ризосфере обычно сосуществуют в виде сложных динамичных сообществ (консорциумов) из разных видов, взаимодействующих между собой и с растением-хозяином. © CC BY-SA 4.0. /G/ Santoyo, P. Guzmán-Guzmán, F.I. Parra-Cota, S. de los Santos-Villalobos, M. C. Orozco-Mosqueda, B. R. Glick



Бактериальные консорциумы

## От теории – к полевым испытаниям

Математическое моделирование микробных взаимодействий, выполненное разными исследовательскими группами, свидетельствует, что кооперация специализированных организмов более эффективна, чем конкуренция универсальных (Kong, Lu, 2018). Азотфиксаторы и фосфатмобилизаторы взаимно обеспечивают друг друга своей продукцией, а производители сидерофоров снабжают железом все микробное сообщество, получая взамен защиту от продуцентов антибиотиков (Varea, Pozo, Azcon *et al.*, 2005). Такие взаимовыгодные «контракты» служат основой устойчивых консорциумов, превосходящих по эффективности любой отдельно взятый бактериальный штамм.

Эту теорию подтверждают и результаты метагеномного анализа природных почвенных сообществ, полученные в ряде зарубежных лабораторий: наиболее продуктивные ризосферные микробиомы характеризуются не максимальным разнообразием, а оптимальным соотношением функциональных групп: примерно 40% «производителей питания», 30% «защитников» и 30% «вспомогательного персонала» (Ofek-Lalzar, Sela, Goldman-Voronov *et al.*, 2014; Breidenbach, Pump, Dumont *et al.*, 2016). Это фундаментальное открытие полностью изменило стратегию создания биопрепаратов: вместо поиска «суперштаммов» ученые сосредоточились на конструировании синтетических микробных консорциумов.

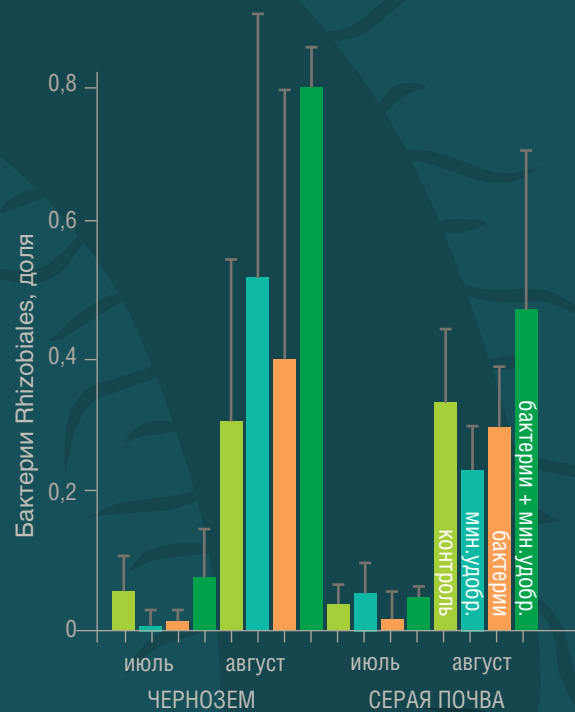
После изучения отдельных штаммов почвенных бактерий перед новосибирскими учеными встала задача объединить лучших «специалистов» в функциональную команду. Для создания синтетического микробного консорциума нужно было не только учесть свойства всех участников, но и предсказать их совместное поведение в сложных природных условиях.

Для полевых испытаний был составлен пятикомпонентный консорциум из представителей различных функциональных групп бактерий из разных семейств. Штамм *Rahnella aquatilis* GMG\_294 должен был взять на себя функции фосфатмобилизации, *R. endophytica* GMG\_009 – азотфиксации. В консорциум также вошли «специалист» по биологической защите *Stenotrophomonas indicatrix* GMG\_165.2, производитель сидерофоров *Burkholderia contaminans* GMG\_664, а также бактериальный штамм *Lelliottia amnigena* GMG\_355, продуцирующий фитогормоны.

Выбор именно этих штаммов основывался на результатах предварительных лабораторных экспериментов, где различные комбинации микробов показали разную эффективность. Стало очевидно, что не существует универсального алгоритма для создания консорциумов – каждая комбинация требует индивидуального тестирования.



Растения пшеницы, обработанные разными бактериальными штаммами, после 30 дней выращивания в теплице



При внесении в почву микробного консорциума наиболее выраженные изменения в ризосфере произошли у гречихи: к сентябрю доля бактерий порядка Rhizobiales в этой почвенной зоне значительно выросла. Максимум наблюдался при одновременном применении минеральных удобрений и бактериального препарата

Переход от условий теплицы к открытому грунту должен был стать критическим испытанием для нового консорциума. Полевые эксперименты проводились на двух типах почв, черноземе и серой лесной, и с тремя основными культурами: пшеницей, гречихой и рапсом. Микробный консорциум в виде раствора вносился однократно при посеве.

Для отслеживания судьбы внесенных микроорганизмов пробы почвы отбирались через три недели после посадки и во время сбора урожая. Изменения в структуре почвенных микробных сообществ оценивали методом метагеномного анализа, нацеленного на изменчивые участки молекулы бактериальной РНК (16S рРНК), составляющей основу бактериальных рибосом – клеточных фабрик белка.

Анализ биоразнообразия микробных сообществ почвы выявил интересные закономерности. Оказалось, что их видовое богатство оставалось достаточно

стабильным, что говорит об отсутствии негативного воздействия «чужаков» на местную микрофлору.

Однако в результате внесения консорциума формировались специфические микробные сообщества, отличавшиеся по составу от контрольных. Особенно ярко это проявилось на участках с посевами гречихи, где к сентябрю увеличилась доля представителей клубеньковых бактерий (порядок Rhizobiales), фиксирующих атмосферный азот, которая была наибольшей в случае сочетанного применения бактерий и минеральных удобрений.

Функциональный анализ генетических данных с использованием базы данных FAPROTAX показал, что при внесении консорциума доля азотфиксирующих бактерий возросла с 7–9 до 12–14%. Усиливалась и активность фосфатмобилизирующих микроорганизмов, в первую очередь в прикорневой зоне.

Что касается генеральной оценки – урожайности, то прибавка составила 15–25% в зависимости от культуры и типа почвы. Наиболее отзывчивой оказалась гречиха, у которой повысилась не только урожайность, но и качество зерна.

### Бег с препятствиями

Результаты полевых испытаний микробных консорциумов пока, конечно, далеки от сенсационных и скорее демонстрируют принципиальную возможность их применения в реальных условиях. Хотя экономический анализ показал приемлемую рентабельность этой технологии, особенно для менее плодородных почв.

Что дальше? К сожалению, путь от лабораторного открытия до широкого практического применения в биотехнологии напоминает полосу препятствий, где преодоление каждого барьера требует изобретательности и упорства. Микробные биотехнологии не исключение: их внедрение сталкивается с целым комплексом научно-технических, регуляторных и экономических вызовов.

Главная научная головоломка – это непредсказуемость поведения микроорганизмов «в поле». В отличие от химических удобрений, действие которых основано на простых физических процессах, микробные препараты вступают в сложные биологические взаимодействия, результат которых может зависеть от сотен факторов.

Численность почвенных микроорганизмов, которая может различаться на порядки в пределах нескольких метров, температура и кислотность почвы, содержание в ней органического вещества – каждый из этих параметров влияет на эффективность биопрепаратов. Так что создать универсальную «инструкцию по применению» практически невозможно.

Для России с ее суровым климатом особенно болезненны температурные ограничения: большинство

полезных бактериальных штаммов активны лишь при температуре 10–35 °С. Это накладывает сезонные рамки и, более того, исключает из сферы их применения огромные территории.

Еще одна болевая точка – совместимость с химическими средствами защиты растений. Многие фунгициды, инсектициды и гербициды обладают широким антимикробным спектром, уничтожая не только вредителей, но и полезную микрофлору. Разработка схем интегрированного применения разных групп препаратов требует тщательной координации их действия, что в конечном итоге может снизить их эффективность.

Дополнительные препятствия создают регуляторные барьеры. Регистрация биопрепаратов в России занимает 3–5 лет и обходится в 50–100 млн рублей. Такие расходы кажутся непропорциональными рискам применения природных микроорганизмов и отпугивают инновационные компании.

Усугубляет ситуацию и отсутствие стандартизированных методов контроля качества. Ведь если для химических препаратов достаточно просто определить рабочую концентрацию действующего вещества, то для биопрепаратов критичны параметры, для оценки которых пока нет общепринятых стандартов: таксономическая принадлежность, жизнеспособность и функциональная активность микроорганизмов.

История, начавшаяся с простой идеи привлечь школьников к сбору почвенных образцов, превратилась в масштабный научный проект, изменивший наше понимание взаимодействия растений и микроорганизмов.

Сотни юных исследователей со всех концов России помогли создать уникальную коллекцию почвенных бактерий, среди которых обнаружили настоящие «звезды» – штаммы, способные не только стимулировать рост растений, но и защищать их от засухи, засоления и других стрессов. Некоторые из этих бактерий уже показали впечатляющие результаты в виде повышения урожайности сельскохозяйственных культур, активации собственных защитных систем растений и снижения их потребности в химических удобрениях. Эти открытия доказывают, что решение глобальных проблем деградации почв и продовольственной безопасности может лежать буквально у нас под ногами.

При этом путь от лаборатории к «полю» оказался сложнее, чем ожидалось. Геномный анализ показал, что наличие «правильных» генов еще не гарантирует эффективность штамма – важна тонкая настройка их активности в ответ на сигналы растений и условия среды. Но именно это открытие привело к пониманию, что вместо поиска универсальных «супербактерий» нужно заниматься созданием специализированных микробных сообществ, где каждый штамм выполняет

свою функцию, подобно тому как происходит в здоровой почве. Такие синтетические консорциумы будут объединять наиболее эффективные и подходящие друг к другу микроорганизмы, что обеспечит синергетический эффект.

#### Литература

Седых С.Е., Воронина Е.Н., Галямова М.Р. и др. Наука в руках школьника: сибирские «охотники за микробами» // НАУКА из первых рук. 2021. № 5/6 (90). С. 152–161.

Sokolova E.A., Mishukova O.V., Hlistun I.V. et al. Phenotypic and Genomic Analysis of *Enterobacter ludwigii* Strains: Insights into Mechanisms Enhancing Plant Growth Both Under Normal Conditions and in Response to Supplementation with Mineral Fertilizers and Exposure to Stress Factors // Plants. 2024. V. 13. P. 3551.

Sokolova E.A., Mishukova O.V., Hlistun I.V. et al. *Enterobacter soli* Strain AF-22b-4245: Study of the Genome and the Effect on Wheat Growth // Microbiol. Res. 2025. V. 16. P. 34.

Sokolova E.A., Mishukova O.V., Hlistun I.V. et al. The Effectiveness of Co-Inoculation by Consortia of Microorganisms Depends on the Type of Plant and the Soil Microbiome // Plants. 2024. V. 13. P. 116.

Voronina E., Sokolova E., Tromenschleger I. et al. Properties of Potential Plant-Growth-Promoting Bacteria and Their Effect on Wheat Growth Promotion (*Triticum aestivum*) and Soil Characteristics // Microbiol. Res. 2024. V. 15. P. 20–32.

Исследование поддержано Федеральной научно-технической программой развития генетических технологий на 2019–2030 годы (Соглашение № 075-15-2025-473)

