

## **Сортовые особенности структуры тонких корней томата при дефиците азота: накопление азота и ризобактериальное разнообразие**

Бетехтина А.А.\*, Малева М.Г., Тугбаева А.С., Малахеева А.В.

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н.*

*Ельцина, г. Екатеринбург, Россия*

*\*E-mail: betechtina@mail.ru*

Неуклонный рост численности народонаселения приводит к увеличению спроса на продовольствие, однако активное использование синтетических удобрений и пестицидов, увеличивающих продуктивность сельскохозяйственных культур, в конечном счёте вызывает нарушение экологического равновесия, ухудшает состояние сельскохозяйственных почв и увеличивает пищевые риски. Кроме того, проблема эффективности использования азотных удобрений стимулирует поиск новых генотипов сельскохозяйственных культур, обеспечивающих стабильную урожайность в условиях низкого плодородия (Lynch, 2024). При этом растения за счёт поступления углерода с корневыми выделениями, прижизненным опадом и растительными остатками могут детерминировать обилие, разнообразие и функциональную активность микроорганизмов — агентов азотфиксации, аммонификации и нитрификации, трансформирующих азот в доступную для растений форму. С другой стороны, они могут влиять на активность и разнообразие денитрификаторов, деятельность которых приводит к уменьшению запасов общего азота в почве (Henry et al., 2008).

Цель исследования — оценка влияния дефицита азота на особенности структуры тонких поглощающих корней разных сортов томата (*Solanum lycopersicum* L.), накопление азота в растениях и почве, а также изучение ризобактериального разнообразия. Три детерминантных сорта — «Балконное чудо» (БЧ), «Комнатный Сибиряк» (КС) и «Вороний глаз» (ВГ) — выращивали в горшечном эксперименте в течение 10 недель (апрель-июнь) при естественном освещении и комнатной температуре на малопродуктивном субстрате, приготовленном из дерново-подзолистой почвы, торфа, глины и песка (1:1:1:2, по объёму). В половину опытных образцов двукратно вносили азот (30 мг N/кг почвы) в форме раствора аммиачной селитры. Исследованные сорта показали сходную внутреннюю структуру тонких поглощающих корней, однако различались по комплексу количественных признаков. Выявлено, что внесение азота оказалось незначимым фактором для структуры тонких корней ( $F = 0.97$ ;  $p = 0.46$ ), в то время как сортовые отличия оказались значимы ( $F = 9.29$ ;  $p < 0.001$ ). Наибольшие изменения отмечены у сорта ВГ: более толстые поглощающие корни с большим диаметром стелы и толщины паренхимы, наличие барьерных тканей (экзодерма, эндодерма), хорошо развита аэренхима. Отмечено, что внесение азота в почву положительно влияло на количество и биоразнообразие азотфиксаторов.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда № 24-26-00248, <https://rscf.ru/project/24-26-00248>.*

## **Микробиомный ответ на преобразование тундровых экосистем в агроценозы и процесс постагрогенного восстановления (на примере Ямала)**

Васильченко А.С.\*, Тесля А.В., Пошвина Д.В., Степанов А.А., Дилбарян Д.С.,  
Яшников А.В., Шмидт Э.

*Лаборатория антимикробной резистентности, Институт экологической и сельскохозяйственной биологии (X-Bio), Тюменский государственный университет*

*\*Заведующий лабораторией, Тюмень, Россия, E-mail: [avasilchenko@gmail.com](mailto:avasilchenko@gmail.com)*

**Актуальность.** Активное освоение Арктики и Субарктики, на фоне климатических изменений, приводит к преобразованию нетронутых экосистем в агроландшафты. Это влечёт за собой риск потери почвенного углерода и нарушения хрупкого экологического баланса. Изучение трансформации микробных сообществ при освоении и последующем восстановлении тундровых почв критически важно для прогнозирования последствий таких изменений.

**Материалы и методы.** Исследование проведено в Надымском районе ЯНАО. Образцы отобраны с трёх типов объектов: активное сельскохозяйственное поле (агроценоз), заброшенные залежные земли (17–29 лет восстановления) и ненарушенные природные ландшафты. Для характеристики микробиома применено высокопроизводительное секвенирование полных генов 16S рРНК и ITS (PacBio), оценка активности гидролитических ферментов и эмиссии CO<sub>2</sub>.

**Результаты.** Освоение тундры под агроценозы с внесением органических удобрений (компосты, навоз) привело к формированию плодородных почв (Hortic Podzols) с нейтральным pH. Это вызвало радикальную перестройку микробного сообщества: возросла доля протеобактерий — рудеральных r-стратегов, способных к быстрому росту и минерализации легкодоступного органического вещества, что подтверждается высокой базальной дыхательной активностью. После прекращения сельхозиспользования (залежные земли, Plaggic Podzols) начался процесс восстановления, направленный в сторону свойственной тундре подзолообразования. Наблюдается подкисление почвы, увеличение доли Acidobacteriota и базидиомицетов, специализирующихся на разложении сложных органических соединений. Альфа-разнообразие бактерий сохраняется, но меняется состав редких таксонов, а разнообразие грибов значительно снижается.

Восстановление экосистемных функций на залежи идёт медленно. Несмотря на накопление органического вещества, его качество меняется в сторону более устойчивых форм. Это приводит к снижению метаболической активности микробной биомассы и эффективности утилизации углерода. Активность ферментов, связанных с циклом азота и фосфора, меняется, отражая сдвиги в доступности питательных элементов.

Вывод. Преобразование тундровых почв в агроценозы коренным образом меняет структуру и функцию микробных сообществ. После прекращения хозяйственной деятельности начинается процесс восстановления, однако даже через 30 лет микробное сообщество не полностью возвращается к исходному (природному) состоянию, демонстрируя значительную инерционность. Полученные данные важны для разработки стратегий устойчивого землепользования и прогнозирования последствий антропогенного воздействия в Арктике.

Ключевые слова: Криогенные экосистемы; Плаггенное сельское хозяйство; Plaggic Anthrosols; Почвенный микробиом; Вечная мерзлота.

*Исследование выполнено при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (соглашение № 075-15-2024-563).*

### **Сезонная и возрастная динамика фотосинтетических и секвестрационных характеристик хвойных древесных растений карбонового полигона «УРАЛ-КАРБОН»**

Киселёва И.С.\*, Малева М.Г., Патрикеева А.А.

*Уральский федеральный университет, г. Екатеринбург, Россия*

*\*E-mail: [irina.kiseleva@urfu.ru](mailto:irina.kiseleva@urfu.ru)*

Ключевые слова: *Picea obovata*, *Abies sibirica*, *Pinus sylvestris*, ассимиляция CO<sub>2</sub>, лигнин

Показана высокая изменчивость ассимиляции CO<sub>2</sub> в течение суток и разные месяцы года у основных лесообразующих пород полигона «Урал-Карбон». Показатель варьировал от 2,5 до 3,5 мг CO<sub>2</sub>/кг хвои\*час. Используя данные В.А. Усольцева (2007, 2022) для таёжных лесов Урала рассчитана ассимиляция CO<sub>2</sub> в объёме 6–7 кг/га\*час или 10–12 т/га за весь вегетационный сезон. Хлорофильный индекс составил от 1,5 до 6 кг/га хвойного леса в разные годы и разные месяцы. Потенциальную способность секвестрировать углерод оценивали по накоплению биомассы и соотношению фотосинтетических (хвоя) и гетеротрофных (стволики) тканей. В первый год жизни масса хвои была больше, чем стволиков. По мере старения масса гетеротрофных

органов росла сильнее, чем автотрофных. За четыре года большую биомассу накапливали побеги сосны. У ели они формировали в 1,25 раза меньшую биомассу, в сравнении с пихтой. Из всех компонентов биомассы лигнин наиболее устойчив к биodeградации. Его содержание в побегах разного возраста составляло от 30 % до 50 %. Наименьшая доля лигнина обнаружена в междоузлиях сосны, наибольшая — в побегах ели. У пихты и сосны уже со второго года жизни доля лигнина в биомассе практически не меняется, однако при пересчёте на массу у ели лигнина будет меньше в 1,7 раз (40 мг), чем у пихты (67,5 мг) и в 2,8 раза, в сравнении с сосной (112,5 мг).

*Исследование поддержано Министерством науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания FEUZ-2025-0011.*

### **Бактериальный ризобиом *Epipactis atrorubens* (Orchidaceae) как фактор колонизации техногенного субстрата и накопления углерода**

Малева М.Г.\*, Борисова Г.Г., Тугбаева А.С., Воропаева О.В., Филимонова Е.И.

*Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, г. Екатеринбург*

*\*E-mail: maria.maleva@mail.ru*

Для разработки эффективных мер по сохранению локальных популяций редких видов орхидей особую актуальность представляет изучение их консортивных связей с почвенными микроорганизмами. К настоящему времени доказана положительная роль микоризы в адаптации орхидных к малоплодородным субстратам, почвам с избыточным количеством металлов и другим неблагоприятным эдафическим условиям (Smith, Read, 2008). Почвенные бактерии, наряду с микромицетами, являются важнейшими компонентами системы симбиотических отношений растений сем. Orchidaceae с микроорганизмами (Herrera et al., 2022). Известно, что многие бактерии обладают способностью стимулировать рост растений (PGP — от англ. «Plant Growth Promoting») с помощью различных механизмов, таких как производство фитогормонов, хелатирование железа сидерофорами, образование органических кислот, солюбилизация фосфатов и др. (Kumar et al., 2021). Проведены комплексные исследования *Epipactis atrorubens* (дремлик темно-красный), колонизирующего серпентинитовые субстраты (естественный лес и отвал вскрышных пород после добычи асбеста): метагеномный анализ бактериального ризобиома, включая выделение и скрининг отдельных культур по PGP-характеристикам; морфометрический и физиолого-биохимический анализ растений в зависимости от условий произрастания. Выявлены особенности фотосинтетического аппарата орхидеи, способствующие

поддержанию продукционного процесса. Изучены редокс-реакции, отражающие устойчивость вида к техногенному субстрату. В ризосфере орхидеи на обоих участках выявлено 67 видов бактерий, из которых 9 встречались на отвале и лишь 2 были общими. Выделено 75 изолятов, из которых отобрано 27 PGPR и определена их принадлежность к родам *Buttiauxella*, *Pseudomonas*, *Bacillus* и *Yersinia*. На отвале выявлено лишь 2 рода: *Buttiauxella* и *Pseudomonas*. Показано, что, несмотря на неблагоприятные условия отвала (сильная каменистость, низкая влагоёмкость и обеспеченность азотом и фосфором с одновременно повышенным количеством Mg, Ni, Cr и Co), содержание органического углерода как в подстилке, так и в ризосферной почве, изменялось незначительно, по сравнению с лесом, что может свидетельствовать о положительной роли ризо-бактериома орхидеи. В целом, проведённые исследования показали, что несмотря на низкое видовое разнообразие ризобактерий на техногенном субстрате, доля PGPR составляла 89 %. Это позволяет предположить высокую значимость этих бактерий в натурализации орхидеи в трансформированном местообитании.

*Исследования выполнены при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект FEUZ-2024-0011).*

### **Экологические ингибиторы гидратообразования: разработка реагента на основе целлюлозы**

Сергеева Д.В.<sup>1,2</sup>, Тулегенов Т.Б.<sup>1</sup>, Семёнов А.П.<sup>1</sup>, Морозова С.М.<sup>3</sup>, Стопорев А.С.<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup> РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

<sup>2</sup> Сколковский институт науки и технологий, Сколтех, г. Москва

<sup>3</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

*E-mail: d.sergeeva@skoltech.ru*

Неконтролируемое образование газовых гидратов в нефтегазовых трубопроводах приводит к авариям и выбросам метана — мощного парникового газа. В современном контексте при разработке реагентов для контроля этих процессов следует учитывать, что они должны быть не только эффективными, но и экологичными.

Решение вопроса о влиянии состава реагентов на кинетические параметры нуклеации и роста гидратов позволит создавать ингибиторы из природного сырья.

В данной работе проводилась разработка экологически безопасных ингибиторов на основе природного материала (целлюлозы) для предотвращения образования гидратов. Систематическое изучение влияния нанофибриллярной целлюлозы (как исходной, так и модифицированной) на кинетику нуклеации и роста гидратов метана и природного газа в условиях, моделирующих транспортировку углеводородных флюидов по трубопроводам, позволило выявить, что некоторые формы целлюлозы демонстрируют свойства кинетических ингибиторов, эффективно предотвращая нуклеацию гидратов, что напрямую снижает риски аварий и выбросов парниковых газов. Наиболее перспективными оказались натриевая форма нанофибриллярной целлюлозы и нанофибриллярная целлюлоза с привитыми цепями поли (N-изопропилакриламида).

Разработка и внедрение «зелёных» ингибиторов гидратообразования на основе биосовместимых материалов позволит достичь целей ресурсосберегающей энергетики и снизить углеродный след нефтегазовой отрасли.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10328).*

**Смесевые реагенты для контроля стабильности клатратных гидратов:  
синтетические эффекты для снижения экологической нагрузки в нефтегазовой  
отрасли**

Стопорев А.С.<sup>1,2</sup>, Семёнов А.П.<sup>1</sup>

<sup>1</sup> РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва

<sup>2</sup> Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный

*E-mail: a.stoporev@mipt.ru*

Газовые (клатратные) гидраты представляют собой глобальную проблему для нефтегазовой и экологической отраслей, являясь причиной аварий и выбросов парниковых газов, и одновременно — основу для перспективных технологий (хранение газа, секвестрация CO<sub>2</sub>). Управление их образованием и разложением — ключевой

вызов, решение которого позволит преобразовать клатратные гидраты из угрозы в ресурс для устойчивого развития.

В нашей группе проводится разработка физико-химических основ применения смесевых нефтепромысловых реагентов для контроля газовых гидратов: исследование стабильности гидратов в присутствии изучаемых веществ (например, метанол, моноэтиленгликоль, бутоксиэтанол, толуол, циклопентан, солевые системы) и кинетики протекающих процессов. Экспериментально подтверждён синергетический эффект в смесях метанола и моноэтиленгликоля, также метанола и хлоридов металлов первой и второй группы. Антигидратная активность смеси превышает сумму активностей индивидуальных компонентов, что позволяет снизить общий расход реагентов, минимизировать токсичное воздействие метанола, оптимизировать физико-химические свойства ингибитора и сократить эксплуатационные затраты. Выявлен уникальный эффект некоторых низкомолекулярных амфифилов одновременного влияния на термодинамику, кинетику нуклеации, роста и агрегации гидратных частиц.

Разрабатываемые составы обеспечивают двухстороннее снижение экологической нагрузки за счёт понижения потребления метанола и выбросов парниковых газов при добыче углеводородов. Полученные результаты вносят вклад в фундаментальное понимание процессов стабилизации гидратов и предлагают практические инструменты для перехода к более безопасным и устойчивым технологиям в условиях изменения климата.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 25-19-00284).*

## **Технологии термической переработки биомассы для снижения негативного антропогенного воздействия на окружающую среду**

Шаненков И.И., Табакаев Р.Б.

*Национальный исследовательский Томский политехнический университет, г. Томск*

Рост антропогенной нагрузки на окружающую среду, обусловленный, главным образом, энергетической отраслью и сжиганием традиционных ископаемых углеводородных источников, обуславливает необходимость поиска альтернативных технологий получения энергии. Перспективным и динамично развивающимся направлением среди возобновляемых источников энергии является энергетика на основе биомассы. Её разнообразные ресурсы распространены практически повсеместно и обладают большим потенциалом в количественном эквиваленте

запасаемой энергии. Кроме того, наблюдается постоянный рост объёмов за счёт повышения производительности агропромышленного и лесоперерабатывающего комплексов. Термическая переработка такого сырья позволяет получать энергетически ценные продукты с меньшим воздействием на окружающую среду. Однако сам процесс существенно зависит от механизма воздействия на сырьё и его характеристик. В данном исследовании приводится сравнение двух типов пиролиза: традиционного с нагревом всего объёма реактора и микроволнового с локальным воздействием электромагнитных волн на образец для топлив с различной степенью метаморфизма. Результаты сравнительной серии экспериментов свидетельствуют о том, что традиционный пиролиз наиболее предпочтителен для получения твёрдых продуктов пиролиза (биоуголь), которые можно эффективно использовать, например, в сельском хозяйстве. Такой подход обеспечивает не только рост производительности, но и может рассматриваться как вариант изъятия углерода из углеродного цикла с долгосрочным захоронением в почвенных слоях. Микроволновый пиролиз демонстрирует преимущества с позиции получения высококалорийных газообразных продуктов с низким содержанием балластной составляющей – CO<sub>2</sub>-компонента (<10%), а применение интенсифицирующих каталитических добавок способно существенно понизить энергозатраты на реализацию самого процесса. Представленные результаты также демонстрируют высокие перспективы в части могут служить основой для выбора способа переработки органического сырья в зависимости от назначения конечных продуктов.

*Работа выполнена при финансовой поддержке Российского научного фонда (проект № 24-79-10113) <https://rscf.ru/en/project/24-79-10113/>*

### **Изучение влияния микросфер агарозы на нуклеацию гидрата метана**

**Ярахмедов М.Б.<sup>1</sup>, Сизиков А.А.<sup>1,2</sup>, Стопорев А.С.<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup> *РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина, г. Москва*

<sup>2</sup> *Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет), г. Долгопрудный*

*E-mail: murtazali99@bk.ru*



Изменения температуры и давления во время добычи, транспортировки и переработки газа могут привести к конденсации воды, образованию льда и/или газогидратов — нестехиометрических кристаллических соединений, способных накапливаться в промысловых и трубопроводных системах, вызывая аварийные остановки и рост операционных затрат. Возможность управления процессами нуклеации, роста и агломерации гидратов может снизить риск формирования гидратных пробок и перенаправить процесс в нужное русло, что критически важно для промышленности.

В данной работе проводилась оценка влияния химической модификации агарозных микросфер на вероятность формирования гидрата метана. Для этого к микросферам диаметром ~50–150 мкм из сшитой агарозы прививали сульфопропильные и четвертичные аммониевые группы. Построение экспериментальных функций распределения вероятностей нуклеации гидрата в 0,25 % мас. суспензии микросфер агарозы проводили на основе данных термического анализа при контролируемом охлаждении (12 °С/мин) и интенсивном перемешивании (500 об/мин) под давлением метаном (8,5 МПа при комнатной температуре). В докладе будет рассмотрено влияние типа функциональных групп агарозы на скорость нуклеации и роста гидрата метана.

*Исследование выполнено за счёт гранта Российского научного фонда (проект № 24-79-10328).*