

## РЕФЕРАТ

ПОЧВЕННЫЕ МИКРООРГАНИЗМЫ, ТАКСОНОМИЧЕСКАЯ ИДЕНТИФИКАЦИЯ, БИОТЕХНОЛОГИЯ, СЕЛЬСКОЕ ХОЗЯЙСТВО, ПЛОДОРОДИЕ ПОЧВ, PGPB, БИОРЕМЕДИАЦИЯ, БИОИНСЕКТИЦИДЫ, ФИТОПАТОГЕНЫ, ПОЛНОГЕНОМНОЕ СЕКВЕНИРОВАНИЕ, МЕТАГЕНОМИКА, ГРАЖДАНСКАЯ НАУКА, ОБРАЗОВАТЕЛЬНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ, УСТОЙЧИВОЕ РАЗВИТИЕ, ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ, МИКРОБНЫЕ КОНСОРЦИУМЫ

Проект «Гражданская наука и генетические технологии для сельского хозяйства» направлен на создание комплексной системы поиска, анализа и применения микроорганизмов с полезными свойствами для устойчивого развития агросферы с участием широкого круга образовательных организаций и гражданских ученых. В рамках проекта реализовано пять основных научных направлений: разработка микробных биостимуляторов роста растений (PGPB), создание биотехнологий для ремедиации загрязненных почв, разработка альтернативных кормовых добавок, поиск биологических средств защиты растений от фитопатогенов и создание экологически безопасных биоинсектицидов.

В ходе реализации первого этапа проекта была проведена организационная и практическая работа по мобилизации гражданских ученых. Для участия в проекте поступило 878 заявок от школьных команд со всей территории РФ. Суммарно отобрано 100 команд под руководством наставников, число школьников, принявших участие в реализации проекта в 2025 году, составило 576 человек. Объектом исследования гражданских ученых являлись микроорганизмы, изолированные из образцов почвы. Каждая исследовательская команда обучающихся получила разработанный и протестированный научными сотрудниками исследовательский набор, включающий необходимые материалы, реагенты и инструкцию для поиска микроорганизмов, потенциально способных осуществлять биоремедиацию почвы (продукция поверхностно-активных веществ, способность к деградации полициклических ароматических углеводов, способность к деструкции гербицидов, устойчивость к тяжелым металлам), либо для поиска микроорганизмов, перспективных в качестве кормовых добавок (обладающие лакказной, протеазной, амилазной, липазной, целлюлазной и фитазной активностями). В ходе реализации проекта в 2025 году совместно с Соисполнителем проекта Фондом "Поддержка проектов в области образования" были изготовлены и отправлены в образовательные организации 100 исследовательских наборов для сбора и

первичного скрининга почвенных микроорганизмов. С помощью данных исследовательских наборов реагентов, обучающимися были культивированы микроорганизмы и получены колонии микроорганизмов, которые были проанализированы на целевую активность. Сбор всех образцов был проведен в соответствии с разработанным порядком сбора образцов. Общее число исследованных образцов почвы за отчетный период составило 604. Кроме того, в рамках реализации проекта в 2025 году исполнителями проекта также были собраны 125 образцов пораженных растений, что позволило выделить 448 изолятов потенциальных фитопатогенных микроорганизмов, характерных для Сибири, в том числе 260 изолятов бактерий и 188 изолятов низших грибов.

За отчетный период в ходе поиска микроорганизмов, повышающих плодородие почвы и оказывающих положительное влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур, проведен скрининг 912 штаммов на фосфатмобилизирующую активность, способность к азотфиксации и продукции сидерофоров и ауксина. Отобран 61 штамм, обладающий фосфатмобилизирующей активностью, 35 штаммов, способных к азотфиксации, 46 штаммов, продуцирующих сидерофоры, 16 штаммов, продуцирующих ауксин. Соисполнителем проекта Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН проведена оценка агрохимических показателей почвы и учет морфофизиологических показателей трех сельскохозяйственно важных культур (пшеница, соя и томат), выращиваемых в контролируемых условиях микроклимата с использованием отобранных штаммов микроорганизмов. Полученные результаты выявили важность изучения межвидовых взаимодействий в ризосфере для разработки эффективных биотехнологических решений в растениеводстве, а обнаруженная культуроспецифичность открывает новые направления для создания персонализированных микробных консорциумов.

С целью поиска микроорганизмов в качестве кормовой добавки, повышающей питательные свойства кормов, проведен скрининг 680 микроорганизмов на амилазную, целлюлазную, хиназную, липазную и протеазную активность. Для дальнейшего анализа отобрано 136 штаммов: 72 штамма с протеазной активностью, 22 – с амилазной, 8 – с целлюлазной, 18 – с хитиназной и 14 – с липазной активностями. Следует отметить, что для разработки эффективных микробиологических кормовых добавок совместно с Соисполнителем проекта ФИЦ Якутский научный центр СО РАН было проведено исследование 102 штаммов рода *Bacillus*, выделенных из мерзлотных почв Арктической зоны (Нижнеколымский, Верхоянский, Усть-Янский, Булунский районы) и мерзлотных почв Субарктической зоны (Хангаласский район), а также из микробиоты кишечника диких копытных животных, сельскохозяйственных животных (симментальский и якутский скот,

табунные лошади). Выявлено 11 перспективных изолятов, продуцирующих биосурфактанты и обладающих амилазной, липазной и протеазной активностями для последующего углублённого анализа и оценки их биотехнологического потенциала для применения в составе пробиотических кормовых добавок.

Для поиска микроорганизмов, обладающих антагонистической активностью в отношении фитопатогенных низших грибов, проведено культивирование и исследование фунгицидных свойств 1193 штаммов. В ИХБФМ СО РАН из 543 штаммов отобран 61 штамм, обладающий антагонистической активностью в отношении пяти видов фитопатогенных низших грибов. При этом выявлено 17 штаммов, обладающих суммарным индексом ингибирования существенно выше коммерческих контрольных препаратов. Кроме того, коллективом Соисполнителя проекта Сколковским институтом науки и технологий проведен скрининг 650 штаммов и выявлено 16 штаммов, проявивших различные паттерны антагонистической активности по отношению к фитопатогенным микроорганизмам.

Проведен скрининг 560 микроорганизмов, выделенных из техногенно-загрязненных почв на способность к деструкции полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), устойчивости к тяжелым металлам, продукции биосурфактантов и ферментов класса лакказ. Отобраны 165 штаммов: 63 штамма с лакказной активностью, 14 штаммов, способных расти на среде с высокой концентрации тяжелых металлов, 28 штаммов, способных расти на среде с ПАУ, и 60 штаммов, продуцирующих биосурфактанты. Кроме того, на основании биоинформатического анализа путей деградации ПАУ и микотоксинов из созданной коллекции микроорганизмов были отобраны представители, несущие целевые гены-мишени, что позволило создать 10 рекомбинантных штаммов микроорганизмов, продуцирующих различные оксидазы, обладающие способностью к деструкции как некоторых тестовых соединений (например ABTS, кверцетин и др.), так и разрушению ряда микотоксинов. В отчетном периоде Получателем и Соисполнителем проекта Научно-технологическим университетом "Сириус" проведено метагеномное (300 образцов почвы) и полногеномное (34 микроорганизма) секвенирование. Соисполнителем проекта Новосибирским государственным аграрным университетом проведен отбор и комплексный анализ 224 штаммов микроорганизмов. Определены морфофизиологические свойства 121 штамма микроорганизмов, изучено ростостимулирующее действие 48 штаммов микроорганизмов, выделен и охарактеризован 31 изолят бактерий из погибших насекомых, проведен расширенный анализ 24 бактериальных штаммов в отношении фитопатогенных грибов *Fusarium poae*, *Alternaria alternata* и *Didymella applanata*.

В рамках реализации проекта создана образовательная программа повышения квалификации объемом 72 академических часа, которую прошли 33 наставника из 15 регионов России.

Таким образом, в ходе реализации первого этапа были полностью выполнены все поставленные задачи и достигнуты целевые показатели проекта. Результаты реализации проекта имеют высокую научную и практическую значимость для развития устойчивого сельского хозяйства в России. Созданная технологическая платформа и методологические подходы могут быть адаптированы для различных агроэкологических условий и сельскохозяйственных культур.

## ВВЕДЕНИЕ

Современное сельское хозяйство стоит перед серьезными вызовами, связанными с необходимостью обеспечения продовольственной безопасности в условиях растущего населения планеты, изменения климата и деградации почвенных ресурсов. Традиционные методы интенсификации сельскохозяйственного производства, основанные на широком применении минеральных удобрений и пестицидов, показывают снижение эффективности и приводят к негативным экологическим последствиям. В этих условиях особое значение приобретает развитие биотехнологических подходов, основанных на использовании природного потенциала микроорганизмов.

Почвенные микроорганизмы представляют огромный неисчерпаемый ресурс для создания экологически безопасных технологий повышения продуктивности агроценозов. Микробные сообщества почвы участвуют во всех ключевых биогеохимических процессах: круговороте азота, фосфора и других элементов питания, формировании почвенной структуры, подавлении фитопатогенов и детоксификации загрязняющих веществ. Целенаправленное использование полезных свойств микроорганизмов открывает перспективы создания устойчивых агроэкосистем нового поколения.

Актуальность настоящего исследования определяется необходимостью разработки комплексного подхода к поиску и использованию микроорганизмов с полезными для сельского хозяйства свойствами. Традиционные методы поиска перспективных штаммов ограничены относительно небольшими коллекциями и локальными экосистемами. Привлечение широкого круга участников через механизмы гражданской науки позволяет существенно расширить географический охват исследований и увеличить разнообразие изучаемых микробных сообществ.

Проект «Гражданская наука и генетические технологии для сельского хозяйства» представляет собой инновационную междисциплинарную программу, объединяющую фундаментальные и прикладные исследования в области микробиологии, молекулярной биологии, биоинформатики и агротехнологий с образовательными технологиями и принципами гражданской науки.

Целью настоящего проекта является создание комплексной технологической платформы для поиска, анализа и практического применения микроорганизмов с полезными свойствами для устойчивого развития сельского хозяйства с широким привлечением образовательных организаций и гражданских ученых.

Для достижения поставленной цели в рамках выполнения первого этапа работ сформулированы следующие основные задачи:

1. Создание образовательной программы для подготовки наставников и организация всероссийской сети гражданских ученых для проведения массовых экспериментов;
2. Разработка и методическое обеспечение исследовательских наборов для массового скрининга микроорганизмов гражданскими учеными в рамках образовательной программы;
3. Комплексный поиск и анализ штаммов микроорганизмов с высокими показателями свойств, полезных для растений (PGPB);
4. Оценка эффективности отобранных штаммов в контролируемых условиях и анализ их влияния на микробные сообщества почвы;
5. Поиск и характеристика микроорганизмов для биоремедиации почв, загрязненных полициклическими ароматическими углеводородами и тяжелыми металлами;
6. Отбор штаммов-продуцентов ферментов для создания альтернативных кормовых добавок;
7. Поиск и анализ фитопатогенов и микроорганизмов-антагонистов для создания биологических средств защиты растений;
8. Отбор и оптимизация энтомопатогенных бактерий для создания экологически безопасных биоинсектицидов против колорадского жука;
9. Проведение полногеномного секвенирования и биоинформатического анализа перспективных штаммов микроорганизмов.

Инновационность проекта заключается в интеграции современных методов геномики и биоинформатики с принципами гражданской науки для создания масштабной исследовательской сети, способной эффективно изучать микробное разнообразие на всей территории Российской Федерации. Использование стандартизированных методических подходов и единой информационной платформы обеспечивает высокое качество получаемых данных и их сопоставимость.

Практическая значимость проекта определяется созданием технологической базы для разработки новых биопрепаратов для сельского хозяйства, основанных на использовании природных микроорганизмов. Результаты исследований имеют непосредственное применение для решения задач повышения урожайности сельскохозяйственных культур, восстановления деградированных почв, создания экологически безопасных средств защиты растений и кормовых добавок.

## **Достигнутые результаты исследовательской программы (проекта) и оценка их востребованности**

Проект «Гражданская наука и генетические технологии для сельского хозяйства» представляет собой комплексное междисциплинарное исследование, направленное на создание технологической платформы для поиска и практического применения микроорганизмов с полезными свойствами для устойчивого развития агросферы. В ходе выполнения первого этапа исследовательской программы успешно реализованы все мероприятия по организации масштабных исследований с привлечением методов гражданской науки и получен большой массив новой информации для перспективных разработок на основе генетических технологий.

В рамках реализации первого этапа проекта можно отметить следующие основные результаты.

С первых дней реализации проекта была начата организационная и практическая работа по мобилизации гражданских ученых. В течение двух первых месяцев после начала информационной кампании для участия в проекте поступило 878 заявок от школьных команд со всей территории РФ. Для участия в реализации проекта в 2025 году суммарно было отобрано 100 команд под руководством наставников, а число обучающихся-участников проекта составило 576 человек. Объектом исследования гражданских ученых являлись микроорганизмы, изолированные из образцов почвы. Каждая исследовательская команда обучающихся получила разработанный и протестированный научными сотрудниками исследовательский набор, включающий необходимые материалы, реагенты и инструкцию для поиска микроорганизмов, потенциально способных осуществлять биоремедиацию почвы (продукция поверхностно-активных веществ, способность к деградации полициклических ароматических углеводородов, способность к деструкции гербицидов, устойчивость к тяжелым металлам), либо для поиска микроорганизмов, перспективных в качестве кормовых добавок (обладающие лакказной, протеазной, амилазной, липазной, целлюлазной и фитазной активностями). В ходе реализации проекта в 2025 году совместно с Соисполнителем проекта Фондом "Поддержка проектов в области образования" были изготовлены и отправлены в образовательные организации 100 исследовательских наборов для сбора и первичного скрининга почвенных микроорганизмов. Ключевую роль в разработке и совершенствовании методических материалов для гражданской науки сыграло сотрудничество с индустриальным партнером проекта ООО "Живые системы" – специализированной биотехнологической компанией, выступившей в качестве индустриального партнера проекта. Компания обеспечила экспертную поддержку в адаптации лабораторных протоколов для использования

неспециалистами, включая разработку упрощенных алгоритмов пробоподготовки, оптимизацию состава реактивов с повышенной стабильностью при хранении и транспортировке, а также создание визуальных инструкций и методических рекомендаций для самостоятельного проведения экспериментов. С помощью данных исследовательских наборов реагентов обучающимися были культивированы микроорганизмы и получены колонии микроорганизмов, которые были проанализированы на целевую активность. Сбор всех образцов был проведен в соответствии с разработанной инструкцией по сбору образцов. Общее число исследованных образцов почвы за отчетный период составило 604. Кроме того, в рамках реализации проекта в 2025 году исполнителями проекта также были собраны 125 образцов пораженных растений, что позволило выделить 448 изолятов потенциальных фитопатогенных микроорганизмов, характерных для Сибири, в том числе 260 изолятов бактерий и 188 изолятов низших грибов.

За отчетный период в ходе поиска микроорганизмов, повышающих плодородие почвы и оказывающих положительное влияние на рост и развитие сельскохозяйственных культур, проведен скрининг 912 штаммов на фосфатмобилизирующую активность, способность к азотфиксации и продукции сидерофоров и ауксина. Отобран 61 штамм, обладающий фосфатмобилизирующей активностью, 35 штаммов, способных к азотфиксации, 46 штаммов, продуцирующих сидерофоры, 16 штаммов, продуцирующих ауксин. Соисполнителем проекта Институтом почвоведения и агрохимии СО РАН проведена оценка агрохимических показателей почвы и учет морфофизиологических показателей трех сельскохозяйственно важных культур (пшеница, соя и томат), выращиваемых в контролируемых условиях микроклимата с использованием отобранных штаммов микроорганизмов. Полученные результаты выявили важность изучения межвидовых взаимодействий в ризосфере для разработки эффективных биотехнологических решений в растениеводстве, а обнаруженная культуроспецифичность микроорганизмов открывает новые направления для создания персонализированных микробных консорциумов. В рамках данного блока исследовательской программы было организовано сотрудничество с ООО «Алтайская Бурёнка», выступающим индустриальным партнером проекта и специализирующимся на производстве молочной продукции для проработки вопросов промышленного применения созданной микробной коллекции. В ходе переговоров были определены конкретные области применения результатов проекта: отбор в собранной в ходе проекта коллекции и поиск новых лактобактерий с антагонистической активностью для создания природных биоконсервантов молочного производства, получение рекомбинантных штаммов-продуцентов ферментов, которые могут служить альтернативой микробной транслугминазе в технологических процессах, применение штаммов из

коллекции ИХБФМ СОРАН для разработки микробных консорциумов пролонгированного действия в качестве биоудобрений кормовых культур, а также использование выявленных антагонистов фитопатогенов для создания средств биозащиты растений. В ИХБФМ СОРАН совместно с ООО «Алтайская Бурёнка» была разработана концептуальная схема поэтапной валидации отобранных в проекте штаммов в реальных производственных условиях индустриального партнера с определением критериев эффективности и экономического обоснования внедрения результатов реализации исследовательской программы.

С целью поиска микроорганизмов в качестве кормовой добавки, повышающей питательные свойства кормов проведен скрининг 680 микроорганизмов на амилазную, целлюлазную, хиназную, липазную и протеазную активность. Для дальнейшего анализа отобраны 136 штаммов: 72 штамма с протеазной активностью, 22 – с амилазной, 8 – с целлюлазной, 18 – с хитиназной и 14 – с липазной активностями. Следует отметить, что для разработки эффективных микробиологических кормовых добавок совместно с Соисполнителем проекта ФИЦ Якутский научный центр СО РАН было проведено исследование 102 штаммов рода *Bacillus*, выделенных из мерзлотных почв Арктической зоны (Нижнеколымский, Верхоянский, Усть-Янский, Булунский районы) и мерзлотных почв Субарктической зоны (Хангаласский район), а также из микробиоты кишечника диких копытных животных, сельскохозяйственных животных (симментальский и якутский скот, табунные лошади). Выявлено 11 перспективных изолятов, продуцирующих биосурфактанты и обладающих амилазной, липазной и протеазной активностями для последующего углублённого анализа и оценки их биотехнологического потенциала для применения в составе пробиотических кормовых добавок. Поскольку антагонистическая активность микроорганизмов против патогенных бактерий является важным свойством для применения в качестве пробиотических добавок, в созданной коллекции штаммов дополнительно проводили поиск микроорганизмов, способных подавлять рост патогенной микрофлоры в желудочно-кишечном тракте животных. Параллельно с поиском штаммов-продуцентов с целью определения качества кормового сырья было проведено комплексное изучение видового разнообразия плесневых грибов в образцах корма и кормового сырья, используемых в птицеводстве, и выполнена оценка потенциального риска микотоксикогенной опасности. Объектом исследования послужили 74 образца корма или кормового сырья, используемых в сельском хозяйстве. Установлено, что к наиболее широко распространенным видам плесневых грибов, за осенне-зимний период 2025 года можно отнести *Lichtheimia corymbifera* (9,3%). Данный вид обладает и инвазивным и токсигенным потенциалом, и был обнаружен в образцах гороха, ячменя, тритикале,

подсолнечникового и рапсового жмыхов, комбикорма. Ареал распространения данного плесневого гриба широк и встречался в образцах кормового сырья из Тюменской области, Республики Мордовии и Ростовской области. К наиболее опасным выявленным видам грибов следует отнести *A. fumigatus*, 5,3% образцов кормов и кормового сырья содержали данный микроорганизм. Следует отметить, что часть работ в рамках этого блока исследовательской программы, связанную с определением таксономических характеристик азотфиксирующих микроорганизмов, а также изучение данных штаммов на способность к инаktivации ряда микотоксинов, синтезируемых плесневелыми грибами, была выполнена за счет внебюджетного финансирования работ индустриальным партнером проекта ООО «СИБАФ».

Для поиска микроорганизмов, обладающих антагонистической активностью в отношении фитопатогенных низших грибов проведено культивирование и исследование фунгицидных свойств 1193 штаммов. В ИХБФМ СО РАН из 543 штаммов отобран 61 штамм, обладающий антагонистической активностью в отношении пяти видов фитопатогенных низших грибов. При этом выявлено 17 штаммов, обладающих суммарным индексом ингибирования существенно выше коммерческих контрольных препаратов. Кроме того, коллективом Соисполнителя проекта Сколковским институтом науки и технологий проведен скрининг 650 штаммов и выявлено 16 штаммов, проявивших различные паттерны антагонистической активности по отношению к фитопатогенным микроорганизмам.

Проведен скрининг 560 микроорганизмов, выделенных из техногенно-загрязненных почв на способность к деструкции полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), устойчивости к тяжелым металлам, продукции биосурфактантов и ферментов класса лакказ. Отобраны 165 штаммов: 63 штамма с лакказной активностью, 14 штаммов, способных расти на среде с высокой концентрации тяжелых металлов, 28 штаммов, способных расти на среде с ПАУ, 60 штаммов, продуцирующих биосурфактанты. Кроме того, на основании биоинформатического анализа путей деградации ПАУ и микотоксинов из созданной коллекции микроорганизмов были отобраны представители, несущие целевые гены-мишени, что позволило создать 10 рекомбинантных штаммов микроорганизмов, продуцирующих различные оксидазы, обладающие способностью к деструкции как некоторых тестовых соединений (например ABTS, кверцетин и др.), так и разрушению ряда микотоксинов. Следует отметить, что важную роль в обеспечении высокого качества работ по конструированию рекомбинантных штаммов сыграло сотрудничество с индустриальным партнером ООО "СибЭнзайм". Компания ООО "СибЭнзайм" в период с июня по декабрь 2025 г. безвозмездно предоставляла исполнителям проекта набор

высококачественных ферментов для молекулярного клонирования, включающий широкий спектр эндонуклеаз рестрикции различной специфичности, ДНК-лигазы T4, ДНК-полимеразы, а также вспомогательные ферменты для обработки нуклеиновых кислот.

В отчетном периоде Получателем и Соисполнителем проекта Научно-технологическим университетом "Сириус" проведено метагеномное (300 образцов почвы) и полногеномное (34 микроорганизма) секвенирование. Соисполнителем проекта Новосибирским государственным аграрным университетом (ФГБОУ ВО «Университет биотехнологий») проведен отбор и комплексный анализ 224 штаммов микроорганизмов. Определены морфофизиологические свойства 121 штамма микроорганизма, изучено ростостимулирующее действие 48 штаммов микроорганизмов, выделен и охарактеризован 31 изолят бактерий из погибших насекомых, проведен расширенный анализ 24 бактериальных штаммов в отношении фитопатогенных грибов *Fusarium poae*, *Alternaria alternata* и *Didymella applanata*.

В рамках реализации проекта создана образовательная программа повышения квалификации объемом 72 академических часа, которую успешно освоили 33 наставника из 15 регионов России. Кроме того, ряд исполнителей проекта успешно прошли курсы повышения квалификации и получили 11 сертификатов/удостоверений о повышении квалификации.

Таким образом, в ходе реализации первого этапа были полностью выполнены все поставленные задачи и достигнуты целевые показатели проекта. Результаты реализации проекта имеют высокую научную значимость и создают прочную основу для разработки коммерческих биопрепаратов нового поколения для устойчивого развития сельского хозяйства в России. В 2025 году коллектив исполнителей проекта провел переговоры с профильными компаниями фармацевтического, биотехнологического или сельскохозяйственного профиля и разработал план проведения исследований в интересах промышленных партнеров. На следующих этапах работы будет подготовлен комплект документов, необходимый для регистрации РИД по ряду выявленных в 2025 году перспективных разработок и будет подготовлена техническая документация, требуемая промышленным партнерам проекта для практической апробации и внедрения результатов проекта. Выполнение мероприятий в рамках плана-графика по внедрению результатов проекта позволит внести существенный вклад в достижение целей и показателей Федеральной программы «Генетические технологии для развития сельского хозяйства» и позволит внедрить продукцию, отвечающую требованиям технологической независимости Российской Федерации.

Сведения о ходе выполнения исследовательской программы размещены на сайте ИХБФМ СО РАН (<http://www.niboch.nsc.ru/doku.php/ru/science/grants/gk/075-15-2025-473>).

### **Создание и развитие лабораторий и центров, осуществляющих исследования в области генетических технологий**

В процессе реализации проекта был издан комплекс организационно-распорядительных документов, обеспечивающих эффективное управление научным коллективом и кадровым составом. Приказом № 203 от 02.06.2025 г. был сформирован научный коллектив для выполнения работ по проекту № 075-15-2025-473 "Гражданская наука и генетические технологии для сельского хозяйства" в составе 6 подразделений ИХБФМ СОРАН: лаборатории молекулярной микробиологии, лаборатории исследования модификации биополимеров, лаборатории генетических технологий, лаборатории фармакогеномики, лаборатории ферментов репарации и группы молекулярной генетики, включающих 50 специалистов различных квалификаций от лаборантов до ведущих научных сотрудников. Приказами № 333 от 05.08.2025 г. и № 511 от 01.12.2025 г. были внесены кадровые изменения в связи с завершением работы и включении в коллектив отдельных исполнителей. Также, для расширения научного потенциала проекта были заключены договоры подряда с ведущими специалистами сторонних организаций. Коллектив исполнителей включает 55% сотрудников в возрасте до 39 лет, сбалансированно распределенных между всеми блоками исследовательской программы. Данные организационно-штатные мероприятия обеспечили оптимальную структуру научного коллектива и гибкость кадрового планирования в соответствии с этапами выполнения проекта.

Для обеспечения высокого качества исследований и расширения экспериментальных возможностей в рамках проекта была проведена масштабная модернизация лабораторного оборудования подразделений, участвующих в реализации исследовательской программы. Приобретенное оборудование включает современные системы пробоподготовки и анализа: амплификатор реального времени DTLite 4s1 для проведения ПЦР-анализа, спектрофотометр Navi для количественного определения ДНК при подготовке библиотек для метагеномного и полногеномного секвенирования, высокоскоростные центрифуги с охлаждением для качественного разделения клеточных культур и супернатантов. Для работы с фитопатогенными микроорганизмами установлены боксы микробиологической безопасности БМБ-II-"Ламинар-С"-1,5, обеспечивающие требуемый уровень биозащиты при выделении и характеристике патогенов растений. Комплекс культивационного оборудования, включающий шейкер-инкубаторы с программируемыми режимами

температуры и аэрации, термостаты с охлаждением и гомогенизатор, позволили значительно расширить возможности скрининга микроорганизмов на различные типы биологической активности и оптимизировать условия культивирования перспективных штаммов-продуцентов. Установка лиофильной сушилки SJLA-12N обеспечила возможность долгосрочного хранения штаммов коллекции в стабильном состоянии.

В рамках проекта было организовано систематическое повышение квалификации научных сотрудников по профильным направлениям исследований. Ведущие специалисты лабораторий прошли курсы повышения квалификации в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по программам современных биотехнологических методов: Миронова Т.Е. (удостоверение ПК МГУ №061495), Яковлева А.М. (удостоверение ПК МГУ №061509), Ан К.В. (удостоверение ПК МГУ №061479) – курс «Редактирование генома микроорганизмов для биотехнологии», Семикина А.Д. (удостоверение ПК МГУ №061604) и Демьяненко К.В. (удостоверение ПК МГУ №061583) – курс «Генетические и эпигенетические технологии в биологии и медицине», что обеспечило освоение передовых методов геномного анализа и биоинформатики. Сотрудник лаборатории генетических технологий Демьяненко К.В. прошел программу дополнительной переподготовки при НГУ «Технологии управления свойствами биологических объектов: методы биоинформатики и молекулярной биологии» (диплом № 542420508746). Лаборант лаборатории ферментов репарации Мартюшова В.Г., прошла обучение в рамках Международной школы по синтетической биологии в рамках Форума генетических технологий «Сириус. Техногенетика». Воронина Е.Н. завершила обучение по программе дополнительного образования от ООО «Бластим» «Применение искусственного интеллекта в биологических исследованиях», а Хлистун И.В. – «Питон для анализа данных в науке». Соколова Е.А. прошла подготовку по программе дополнительного образования «Анализ NGS-данных» (удостоверение № 773500001207). Дополнительно Семикина А.Д. получила сертификат практической школы «Биотехнология: белковая хроматография и культивирование продуцентов». В общей сложности 9 ключевых сотрудников проекта повысили квалификацию по критически важным направлениям, что обеспечило соответствие научного потенциала команды современным требованиям биотехнологических исследований.

#### **Достижение значений целевых показателей, установленных проектом или исследовательской программой**

*Количество выявленных и охарактеризованных генов-мишеней в геномах организмов (растений, животных, микроорганизмов), пригодных для последующей разработки*

генетических технологий и создания новых сортов растений, кроссов, типов и пород животных или штаммов-продуцентов

Значение целевого показателя - 1, фактическое значение - 3.

Для достижения показателя проведен биоинформатический анализ метаболических путей деградации полициклических ароматических углеводородов и построена схема биodeградации низко и высоко ароматических ПАУ. Проведен скрининг 560 микроорганизмов, выделенных из техногенно-загрязненных почв на способность деструкции полициклических ароматических углеводородов (ПАУ), устойчивости к тяжелым металлам, продукции биосурфактантов и ферментов класса лакказ. Отобраны 165 штаммов: 63 штамма с лакказной активностью, 14 штамма, способных расти на среде с высокой концентрации тяжелых металлов, 28 штаммов, способных расти на среде с ПАУ, 60 штаммов, продуцирующих биосурфактанты. Результаты скрининга и биоинформатического анализа путей биodeградации данных соединений позволили отобрать ряд ферментов класса оксидаз, участвующих в деградации данных соединений. В связи с большим разнообразием деградирующих ферментов в 2025 году коллективом было отобрано семь типов моносубъединичных немембранных ферментов (лакказа, 1,2-дигидроксинафталин диоксигеназа, катехол 1,2-диоксигеназа, гентизат 1,2-диоксигеназа, кверцетин 2,3-диоксигеназа, 2,5-дигидроксипиридин 5,6-диоксигеназа и галлат диоксигеназа). Анализ массивов геномных данных в базе данных NCBI позволил отобрать ряд геномных последовательностей, кодирующих данные ферменты, у микроорганизмов, депонированных в коллекциях микроорганизмов КЭМТК и ГМГ ИХБФМ СО РАН. Природные штаммы, проявившие целевые свойства по отношению к типовым субстратам, таким как пирокатехин, гваякол, ABTS, рост на среде с нафталином в качестве единственного источника углерода, были использованы для клонирования генов оксидаз. Было получено 10 векторных конструкций, содержащих целевые гены оксигеназ. Векторные конструкции трансформировали в клетки штамма-продуцента *E. coli* Rosetta 2 (DE3) и проводили индукцию целевых генов и последующий анализ ферментативной активности экстрактов *E. coli* Rosetta 2, содержащих индуцированные рекомбинантные белки. Среди исследованных рекомбинантных ферментов наиболее перспективной является лакказа lac2561 из *P. monteilii* 2561, поскольку она показала высокую активность по отношению к ABTS, который является классическим субстратом для ферментов этого семейства. Кроме того, lac2561 проявляла значительную активность по отношению к кверцетину. Среди исследованных ферментов также можно выделить кверцетин-2,3-диоксигеназу QDO2561, которая проявляет высокую окислительную активность по отношению к своему природному субстрату кверцетину, но также обладала высокой

активностью по отношению к ABTS, сопоставимую с активностью другой лакказы, lac3369. Таким образом, в отчетный период обнаружено и охарактеризовано три гена-мишени. Обнаруженные целевые гены и их белковые продукты будут использованы на следующих этапах работы для углубленного анализа ферментативных свойств и определения параметров эффективности деградации низко и высоко ароматических ПАУ штаммами-продуцентами как индивидуальных ферментов, так и одновременно нескольких ферментов, входящих в путь деградации ПАУ.

*Количество образцов, исследованных в целях достижения результатов направлений реализации Федеральной программы*

Значение целевого показателя – 600, фактическое значение – 4744.

С помощью подхода гражданской науки осуществлен сбор и анализ 604 образцов почвы. Обучающимися выполнен бактериальный посев и скрининг микроорганизмов с использованием селективных питательных сред из исследовательских наборов. Выявлены изоляты, обладающие продукцией поверхностно активных веществ, способностью к деградации полициклических ароматических углеводородов, способностью к деструкции гербицидов, устойчивостью к тяжелым металлам, а также лакказной, протеазной, амилазной, липазной, целлюлазной и фитазной активностями.

Выполнено высокопроизводительное секвенирование вариабельных районов V3-V4 гена 16S рРНК в 300 образцах почвы и проведен статистический анализ изменения микробных сообществ при внесении микробных удобрений.

Собрано 125 образцов пораженных растений: 65 образцов от пораженных растений, дающих овощную продукцию (картофель, томаты, перец, огурец, тыква и др.), 38 образцов от пораженных растений плодового-ягодного профиля (яблони, сливы, малина, клубника и др.), 15 образцов от пораженных декоративных садовых растений (роза, флокс, шиповник и др.) и 7 образцов от деревьев (береза, липа, сосна и лиственница). Из этих образцов выделено 448 изолятов потенциальных фитопатогенных микроорганизмов, характерных для Сибири, в том числе 260 изолятов бактерий, и 188 изолятов низших грибов.

Проведено полногеномное секвенирование 34 индивидуальных бактериальных штаммов.

Выполнен скрининг 912 микроорганизмов на фосфатмобилизирующую активность, способность к азотфиксации и продукции сидерофоров и ауксина. Отобрано 61 штаммов, обладающих фосфатмобилизирующей активностью, 35 штаммов, способных к азотфиксации, 46 штаммов, продуцирующих сидерофоры, 16 штаммов, продуцирующих ауксин.

Выполнен скрининг 680 микроорганизмов на амилазную, целлюлазную, хиназную, липазную и протеазную активность. Отобрано 136 штаммов: 72 штамма с протеазной активностью, 22 – с амилазной, 8 – с целлюлазной, 18 – с хитиназной и 14 – с липазной активностями.

Выполнен скрининг 1193 микроорганизмов, обладающих антогонистической активностью в отношении фитопатогенных низших грибов. В ИХБФМ СО РАН из 543 штаммов отобран 61 штамм, обладающий антагонистической активностью в отношении пяти видов фитопатогенных низших грибов. 17 штаммов показали суммарный индекс ингибирования существенно выше коммерческих контрольных препаратов. В Сколковском институте науки и технологий из 650 штаммов отобрано 16 штаммов, проявивших различные паттерны антагонистической активности.

Выполнен скрининг 560 микроорганизмов на способность к деструкции полициклических ароматических углеводородов, устойчивости к тяжелым металлам, продукции биосурфактантов и ферментов класса лакказ. Отобраны 165 штаммов: 63 штамма с лакказной активностью, 14 штаммов, способных расти на среде с высокой концентрации тяжелых металлов, 28 штаммов, способных расти на среде с ПАУ, 60 штаммов, продуцирующих биосурфактанты.

Выполнен скрининг 102 микроорганизмов рода *Bacillus*, выделенных из мерзлотных почв Арктической зоны (Нижнеколымский, Верхоянский, Усть-Янский, Булунский районы) и мерзлотных почв Субарктической зоны (Хангаласский район), а также из микробиоты кишечника диких копытных животных, сельскохозяйственных животных (симментальский и якутский скот, табунные лошади) на эффективность продукции биосурфактантов, а также амилазную, липазную и протеазную активность. Отобрано 11 перспективных штаммов и изолятов для углублённого анализа и оценки их биотехнологического потенциала для применения в составе пробиотических кормовых добавок.

Проведен отбор и комплексный анализ 224 штаммов микроорганизмов, который позволил определить морфофизиологические свойства 121 штамма микроорганизмов, изучить ростостимулирующее действие 48 штаммов микроорганизмов, выделить и охарактеризовать 31 изолят бактерий из погибших насекомых, провести расширенный анализ 24 бактериальных штаммов в отношении фитопатогенных грибов *Fusarium poae*, *Alternaria alternata* и *Didymella applanata*.

Получены векторные конструкции, содержащие 10 генов оксигеназ, которые использованы для трансформации штамма *E. coli* Rosetta 2(DE3) и последующего анализа целевой активности.

*Количество обучающихся, принявших участие в реализации исследовательской программы*

Значение целевого показателя – 250, фактическое значение – 576.

В ходе реализации первого этапа проекта была проведена организационная и практическая работа по мобилизации гражданских ученых. Для участия в проекте поступило 878 заявок от школьных команд со всей территории РФ. Суммарно отобрано 100 команд под руководством наставников, число школьников, принявших участие в реализации проекта в 2025 году, составило 576 человек.

*Количество статей, опубликованных в высокорейтинговых журналах входящих в "Белый список", и описывающих оригинальные результаты исследований, полученные с помощью генетических технологий*

Значение целевого показателя – 3, фактическое значение – 4.

1. Chernyshova, A.P.; Marina, V.I.; Tereshchenkov, A.G.; Sagitova, V.E.; Kryakvin, M.A.; Dagaev, N.D.; Yurchenko, E.G.; Arzamazova, K.A.; Guglya, E.B.; Belozerova, O.A.; et al. Characterization of *Bacillus velezensis* EV17 and K-3618 and Their Polyketide Antibiotic Oxydifficidin, an Inhibitor of Prokaryotic Translation with Low Cytotoxicity. *Int. J. Mol. Sci.* 2025, 26, 11777.

<https://doi.org/10.3390/ijms262411777>

2. Sokolova, E.A.; Smirnova, N.V.; Fedorets, V.A.; Khlistun, I.V.; Mishukova, O.V.; Tromenschleger, I.N.; Savenkov, O.A.; Saprikin, O.I.; Rogaev, E.I.; Buyanova, M.D.; et al. Microbial Consortium Application Under Temperature Stress: Effects on the Rhizosphere Microbiome and Plant Growth. *Int. J. Mol. Sci.* 2025, 26, 11814.

<https://doi.org/10.3390/ijms262411814>

3. Sokolova, E.A.; Khlistun, I.V.; Mishukova, O.V.; Tromenschleger, I.N.; Chumanova E.V.; Voronina E.N. Strain-Specific Phosphate Mobilization in Enterobacter: Organic Acid Production and Genomic Architecture of Solubilization Mechanisms. *Int. J. Mol. Sci.* 2026, 27, 322.

<https://doi.org/10.3390/ijms27010322>

4. Цветкова, В.П.; Масленникова, В.С.; Шелихова, Е.В.; Круговых, А.А.; Якимчук, Е.А.; Мирошник, М.И.; Табанюхов К.А. Эффективность биопрепаратов на подсолнечнике в Новосибирской области. Вестник НГАУ (Новосибирский государственный аграрный университет). 2025, № 4 (77), 129.

<https://doi.org/10.31677/2072-6724-2025-77-4-129-137>.

*Количество человек, прошедших обучение по разработанным в рамках Программы образовательным программам*

Значение целевого показателя – 30, фактическое значение – 33.

В рамках реализации проекта создана образовательная программа повышения квалификации объемом 72 академических часа, которую успешно освоили 33 наставника из 15 регионов Российской Федерации. Обучающиеся получили удостоверения о повышении квалификации установленного образца (удостоверения № 542423425772 – № 542423425815). Среди выпускников программы – педагоги из Новосибирской, Омской, Пензенской, Свердловской, Красноярской областей, Республики Тыва, Донецкой народной республики и других регионов страны.

*Количество штаммов и (или) микробных консорциумов, в том числе продуцентов незаменимых аминокислот, ферментов и витаминов, разработанных для практического использования в различных отраслях экономики Российской Федерации*

Значение целевого показателя – 2, фактическое значение – 7.

1. В рамках реализации блока исследовательской программы, направленного на разработку перспективных микробиологических удобрений, стимулирующих рост и развитие растений, обнаружен и охарактеризован штамм микроорганизма *Bacillus pumilus* (коллекция ИХБФМ СО РАН ГМГ-630), проявляющий выраженное стимулирующее действие на рост и развитие трех тестовых сельскохозяйственных культур (пшеница, соя, томаты).
2. В рамках реализации блока исследовательской программы, направленного на разработку перспективных микробиологических удобрений, стимулирующих рост и развитие растений, обнаружен и охарактеризован штамм микроорганизма *Enterobacter ludwigii AF137-NNB1* (коллекция ИХБФМ СО РАН ГМГ-278), проявляющий высокую фосфатмобилизирующую активность.
3. В рамках реализации блока исследовательской программы, направленного на разработку кормовой добавки, повышающей качество кормов путем инактивации микотоксинов, обнаружен и охарактеризован штамм микроорганизма *Bacillus pumilus 3AG* (коллекция ИХБФМ СО РАН ГМГ-2466), обладающий способностью деградировать ряд микотоксинов.
4. В рамках реализации блока исследовательской программы, направленного на разработку кормовой добавки, повышающей питательные свойства кормов за счет продукции биосурфактантов, протеаз, амилаз и липаз, обнаружен и охарактеризован штамм

микроорганизма *Bacillus subtilis* изолят 13 (коллекция ИХБФМ СО РАН ГМГ-2220), проявляющий способность эффективно расщеплять белки, жиры и полисахариды.

5. В рамках реализации блока исследовательской программы, направленного на разработку микробиологических средств борьбы с фитопатогенами, обнаружен и охарактеризован штамм микроорганизма *Paenibacillus polymyxa* (коллекция ИХБФМ СО РАН КЭМТК 7361), проявляющий антагонизм по отношению к фитопатогенным грибам.

6. В рамках реализации блока исследовательской программы, направленного на разработку микробиологических средств борьбы с фитопатогенами, обнаружен и охарактеризован штамм микроорганизма *Paenibacillus chitinolyticus* (коллекция ИХБФМ СО РАН КЭМТК 8072), проявляющий антагонизм по отношению к фитопатогенным грибам рода *Fusarium*.

7. В рамках реализации блока исследовательской программы, направленного на разработку микробиологических и/или ферментных препаратов для деградации полиароматических соединений, создан и охарактеризован рекомбинантный штамм микроорганизма *Escherichia coli* Rosseta 2(DE3)/pET28c-lac2561 (коллекция ИХБФМ СО РАН ГМГ-2465), проявляющий высокую активность по отношению к АВТС и кверцетину.

*Объем средств из внебюджетных источников, направленных на реализацию проекта или исследовательской программы*

Значение целевого показателя – 15%, фактическое значение – 16,06%.

Общий объем внебюджетных средств, привлеченных для реализации исследовательской программы проекта в 2025 г. составил более 14,4 млн. руб., что составляет 16,06% от размера субсидии.

### **Подготовка высококвалифицированных кадров по направлениям реализации Федеральной программы**

В рамках реализации проекта создана образовательная программа повышения квалификации объемом 72 академических часа, которую успешно освоили 33 наставника из 15 регионов Российской Федерации. Обучающиеся получили удостоверения о повышении квалификации установленного образца (удостоверения № 542423425772 – № 542423425815). Среди выпускников программы – педагоги из Новосибирской, Омской, Пензенской, Свердловской, Красноярской областей, Республики Тыва, Донецкой народной республики и других регионов страны.

Кроме того, в 2025 г. было организовано систематическое повышение квалификации исполнителей проекта по профильным направлениям исследований. Ведущие специалисты

лабораторий прошли курсы повышения квалификации в Московском государственном университете имени М.В. Ломоносова по программам современных биотехнологических методов: Миронова Т.Е. (удостоверение ПК МГУ №061495), Яковлева А.М. (удостоверение ПК МГУ №061509), Ан К.В. (удостоверение ПК МГУ №061479) – курс «Редактирование генома микроорганизмов для биотехнологии», Семикина А.Д. (удостоверение ПК МГУ №061604) и Демьяненко К.В. (удостоверение ПК МГУ №061583) – курс «Генетические и эпигенетические технологии в биологии и медицине», что обеспечило освоение передовых методов геномного анализа и биоинформатики. Сотрудник лаборатории генетических технологий Демьяненко К.В. прошел программу дополнительной переподготовки при НГУ «Технологии управления свойствами биологических объектов: методы биоинформатики и молекулярной биологии» (диплом № 542420508746). Лаборант лаборатории ферментов репарации Мартюшова В.Г., прошла обучение в рамках Международной школы по синтетической биологии в рамках Форума генетических технологий «Сириус. Техногенетика». Воронина Е.Н. завершила обучение по программе дополнительного образования от ООО «Бластим» «Применение искусственного интеллекта в биологических исследованиях», а Хлистун И.В. – «Питон для анализа данных в науке». Соколова Е.А. прошла подготовку по программе дополнительного образования «Анализ NGS-данных» (удостоверение № 773500001207). Дополнительно Семикина А.Д. получила сертификат практической школы «Биотехнология: белковая хроматография и культивирование продуцентов». В общей сложности 9 ключевых сотрудников проекта повысили квалификацию по критически важным направлениям, что обеспечило соответствие научного потенциала команды современным требованиям биотехнологических исследований.