
ПАМЯТИ УЧЕНЫХ

УДК 37;579.2

НАУЧНАЯ ШКОЛА ПРОФЕССОРА Б. Б. НАМСАРАЕВА

Работа выполнена при финансовой поддержке бюджетного проекта ФАНО № 0337-2016-0004.

© **Лаврентьева Елена Владимировна**

кандидат биологических наук,
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН,
Бурятский государственный университет
E-mail: lena_l@mail.ru

© **Банзаракцаева Туяна Геннадьевна**

кандидат биологических наук, лаборатория микробиологии,
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
E-mail: tuyana_banz@mail.ru

© **Бархутова Дарима Дондоковна**

кандидат биологических наук,
Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН
E-mail: darima_bar@mail.ru

Показано формирование в Бурятском научном центре СО РАН и Бурятском государственном университете школы микробной экологии экстремальных экосистем под руководством Заслуженного деятеля науки Российской Федерации, Почетного работника высшего образования, доктора биологических наук, профессора Намсараева Баира Бадмабазаровича. Представлены основные научные результаты по изучению экстремальных микробных сообществ.

Ключевые слова: микробиология, Б. Б. Намсараев, научная школа, экстремальные системы.

Бурятская микробиологическая научная школа широко известна в российской и мировой науке своими фундаментальными исследованиями в области экологии микробных сообществ экстремальных систем Центральной Азии.

Основы научной школы были заложены в 1993 г. благодаря усилиям профессора Баира Бадмабазаровича Намсараева — талантливого ученого и организатора, возглавившего новое направление в Сибирском отделении РАН по изучению структурно-функциональной организации микробных сообществ водных и наземных экосистем Центральной Азии. В 1995 г. Б. Б. Намсараев возглавил новую лабораторию микробиологии в Институте общей и экспериментальной биологии, а в 2008 г. кафедру экспериментальной биологии в Бурятском государственном университете.

Стратегия исследований была обусловлена, в первую очередь, научным интересом к малоизученным уникальным объектам водных и наземных экосистем в Байкальском регионе. Под руководством Б. Б. Намсараева проведены исследования в озере Байкал, содовых, соленых и пресных озерах, болотах, термальных и холодных источниках Забайкалья, Тывы, Хакасии, Монголии и Китая.

Основные научные направления отражали различные аспекты:

- Изучение структуры и функционального разнообразия микробных сообществ;
- Оценка геохимической роли прокариот водных и наземных экосистем;
- Выявление и учет культивируемых и некультивируемых микроорганизмов;
- Выделение и описание экстремофильных микроорганизмов;
- Изучение экофизиологии и биохимии микроорганизмов;
- Оценка биотехнологического потенциала.

Современные исследования микробных сообществ экстремальных экосистем ведутся по ряду направлений: изучение биологического разнообразия микробных сообществ с использованием молекулярно-генетических методов, в том числе методов секвенирования нового поколения (NGS), выявление закономерностей функционирования и роли микробных сообществ в глобальных биогеохимических циклах, выделение и характеристика экстремофильных микроорганизмов как компонентов трофической цепи микробного сообщества и как продуцентов ферментных систем, перспективных для использования в биотехнологиях [1].

Основные научные результаты:

Горячие источники

С 1995 г. исследованы микробные сообщества азотных гидротерм на территории Бурятии (Курумканский, Баргузинский, Прибайкальский, Кабанский, Северобайкальский и Баунтовский районы) и Монголии (Увер Хангай, Ар Хангай, Баян Хонгор аймаки), метановой гидротермы Сухая (Кабанский район Бурятии) и углекислых гидротерм Восточного Саяна (Бурятия, Окинский район) и Жойгон (Тыва).

В азотных и углекислых гидротермах Забайкалья, Восточных Саян и Монголии с температурой воды до 90°C и pH 10 впервые были проведены исследования функциональной активности и структуры термофильного микробного сообщества. Установлено, что деятельность микробного сообщества термальных источников зависит от поступления с подземными водами биогенных элементов и субстратов для биохимических реакций и от абиотических факторов, таких как температура, химического состава вод и пород. Высокая температура, щелочные значения и присутствие сульфидов создают особые условия для развития экстремофильных микроорганизмов [2].

Микробные сообщества наземных щелочных гидротерм Байкальской рифтовой зоны отличаются высокой продуктивностью, о чем свидетельствует формирование в них микробных матов толщиной до 13 см. В зависимости от доминирующих групп — продуцентов выявлены циано-бактериальные, зеленые, пурпурные и серные маты. Общей чертой разнообразия сообществ микробных матов является присутствие бактерий, участвующих на разных этапах, как продукции,

так и деструкции органического вещества, что характеризует микробный мат как автономное кооперативное сообщество с тесным взаимодействием трофических групп.

Методами молекулярной биологии были изучены состав и структура микробных сообществ, развивающихся в гидротермах Байкальской рифтовой зоны. Наличие филогенетически разнообразных, метаболически разнонаправленных групп свидетельствует о сбалансированном сложном сообществе, где каждая группа занимает свою экологическую нишу. Кроме того, большое количество последовательностей имело низкий уровень гомологии с культивируемыми представителями, не имеющих близких гомологов в мировой базе данных.

В гидротермах развиваются микробные сообщества, активно участвующее в биогеохимических циклах. На основе количественных данных составлена схема резервуаров и потоков углерода в гидротермах Прибайкалья. Автономное функционирование термофильного микробного сообщества связано с тесной кооперацией продуцентов и анаэробных деструкторов. Большая часть органического вещества (более 65%) образуется в процессе оксигенного фотосинтеза. Аноксигенные фотосинтетика для синтеза органического вещества используют образованный в ходе сульфатредукции сероводород. На терминальных этапах деструкции основная часть органического вещества (до 97%) используется в процессе сульфатредукции, тогда как на образование метана расход органического вещества не превышает 3%. Активность алкалотермофильного микробного сообщества зависит от температуры воды. При снижении температуры (до 50–40°C) скорость продукции увеличивается на 1–2 порядка.

Таким образом, микробные сообщества гидротерм Центральной Азии характеризуются высокой продуктивностью и тесными кооперативными связями. Оксигенные и аноксигенные фототрофы и хемолитотрофы водной толщи, донных осадков и микробных матов участвуют в синтезе органического вещества. Высоко- и низкомолекулярные органические вещества используются в многоступенчатом процессе аэробной и анаэробной деструкции. Фототрофные и хемотрофные, аэробные и анаэробные прокариоты принимают активное участие в биогеохимических циклах углерода и серы, синтезе и разрушении минералов, формировании химического состава и лечебного фактора вод и илов в минеральных источниках Байкальской рифтовой зоны.

Содовые и соленые озера

Планомерные гидрохимические и микробиологические исследования соленых и содовых озер Бурятии (Кяхтинский, Селенгинский, Джидинский, Курумканский районы), Забайкальского края (Агинский район), Монголии (Дорнод аймаг, Тов аймаг и Овор Хангай аймаг), Внутренней Монголии (пустыня Бадаин Жаран) — территорий, относящихся к Центрально-Азиатскому региону, проводятся с 1990-х гг. по настоящее время [3].

Переменный температурный режим криоаридных условий Забайкалья и Монголии создает особый режим существования гало-алкалофильных микробных сообществ. В солоноватых и соленых озерах выявлены основные компоненты микробного сообщества, отвечающие за его функционирование в экстремальных и изменяющихся условиях окружающей среды. На изменения условий среды микробные сообщества данных экосистем реагируют сменой морфологического

разнообразия микроорганизмов. Следовательно, происходит изменение структуры отдельных трофических звеньев. Сезонные изменения состояния самого микробного сообщества и определяют интенсивность бактериальных процессов. В разное время года скорость бактериальных процессов микроорганизмов в осадках содово-соленых озер подвержена взаимному влиянию множества факторов среды обитания.

Основными физико-химическими параметрами, влияющими на активность и распространение микроорганизмов, являются температура, концентрация и компонентный состав ОВ, минерализация и окислительно-восстановительный потенциал. С использованием методов молекулярной биологии проведена оценка разнообразия микробного сообщества содово-соленых озер. Впервые с помощью высокопроизводительного секвенирования фрагментов генов 16S рРНК проведена качественная и количественная характеристика состава бактериальных сообществ донных осадков озер, различающихся по минерализации и значениям рН. Установлено, что в высокоминерализованных озерах (более 200г/л) доминируют археи в микробных сообществах.

Микробное сообщество озер реагирует на колебания физико-химических условий изменением численности бактерий, скорости разложения ОВ и составляющих его биополимеров. При этом интенсивность бактериальных процессов на протяжении года варьируется в пределах 1-2 порядков.

Первичное фотосинтезирующее звено в этих озерах составляют цианобактерии наряду с аноксигенными фототрофными бактериями. Именно благодаря цианобактериям, являющимся основными компонентами микробных матов, продукция, создаваемая этими сообществами, не уступает по значениям продукции, создаваемой эукариотными фототрофами других систем. Установлено, что максимальная скорость общего фотосинтеза в микробных матах содовых озер Забайкалья и Монголии составила 3860 мгС/м² сут. В микробных матах и донных осадках содово-соленых озер выявлены два пика продуктивности: в слабоминерализованных (до 12г дм⁻³) и в высокоминерализованных озерах (165-215г дм⁻³). Второй максимум, предположительно, обуславливается деятельностью гаолоалкалофильного сообщества.

Изотопный состав органического углерода цианобактериальных матов соленых озер указывает на то, что углекислота, потребляемая в ходе фотосинтеза, является продуктом деструкции органического вещества фитопланктона озера и растительного опада, сносимого в озерную котловину с водосборной площади. Автохтонное и аллохтонное органическое вещество разлагается аэробными и анаэробными органотрофными прокариотами с образованием углекислоты в качестве конечного продукта. Роль растительного опада и эукариотического фитопланктона в формировании карбонатной системы озера становится более значимой в засушливый период, на что указывают существенные различия соотношений ¹²С/¹³С углерода органического вещества во влажный и засушливый периоды.

Количественная оценка активности микробных процессов показывает, что основным процессом анаэробной деструкции органического вещества в озерах является сульфатредукция. Был обнаружен различный характер поведения зависимостей продукционных и деструкционных процессов от минерализации. Если в слабоминерализованных водоемах скорости процессов относительно велики и

процессы, скорее всего, сбалансированы, то в высокоминерализованных водоемах продуктивность высока, а сульфатредукция — основной процесс анаэробной терминальной деструкции — минимальна. Возможно, благодаря этому дисбалансу в высокоминерализованных озерах может происходить накопление органического вещества. Этому процессу также может способствовать захоронение органического вещества в результате сезонного выпадения солей в высокоминерализованных озерах.

Озеро Байкал

Своеобразие экологических условий озера — большие глубины, низкая температура воды, низкая минерализация, высокое содержание кислорода, богатство биотопов — обеспечивают особые условия для жизнедеятельности микроорганизмов. Установлено, что колебания численности микроорганизмов в воде и осадках озера тесно связаны с гидрологическим, гидрохимическим и гидробиологическим режимами. Общая численность бактерий в водной толще варьирует от сотен тысяч клеток в мл воды до нескольких миллионов. В развитии бактерий отмечается два максимума: весенний подо льдом и летне-осенний. Общая численность микроорганизмов в донных осадках озера Байкал достигает нескольких миллиардов клеток на грамм грунта (максимум — до 3,5 млрд клеток/г).

Среди байкальских микроорганизмов отмечено наличие практически всех филогенетических групп. К настоящему времени планктонные микроорганизмы озера Байкал представлены 11 таксономическими группами: цианобактерии, альфа, бета, гамма и дельта — протеобактерии, флавобактерии, актинобактерии, планктомицеты, нитроспира, веррукомикробии. В поверхностных водах доминируют цианобактерии, на глубине 400 м — актинобактерии, в глубинных слоях — протеобактерии. Следует отметить, что выявлен далеко не полный спектр обитающих в озере Байкал видов микроорганизмов, использование новых методов ежегодно расширяет наши знания о разнообразии мира микробов. К настоящему времени в водной толще обнаружено 138 некультивируемых видов бактерий, в донных отложениях — 260 некультивируемых видов. В донных осадках районов разгрузки газонасыщенных флюидов формируются особые микробные сообщества, которые в процессе жизнедеятельности используют энергию восстановленных газов, препятствуя их поступлению в водную толщу озера. Применение комплекса молекулярных методов позволило значительно расширить наши знания о мельчайших обитателях озера Байкал. Отличительной особенностью разнообразия микроорганизмов озера Байкал является наличие микроорганизмов, отличающихся по структуре гена 16 S рРНК от известных в мировых базах данных. Большинство байкальских последовательностей имеют среди ближайших гомологов некультивируемые микроорганизмы, в глубинных слоях воды и донных осадков широко распространены некультивируемые бактерии с неясным филогенетическим положением, которые могут рассматриваться как эндемичные виды.

Установлено, что в процессе микробной деструкции органического вещества в донных осадках озера Байкал большая часть органического вещества используется для бактериального образования метана. Впервые измерена скорость бактериальных процессов по глубине осадка в районе приповерхностного залегания газогидратов, а также в фоновых районах озера. Максимальная скорость авто-

трофного метаногенеза составляет $241,2 \text{ мкл } \text{CH}_4 \text{ дм}^{-3} \text{ сут}^{-1}$, ацетокластического метаногенеза — $8,4 \text{ мкл } \text{CH}_4 \text{ дм}^{-3} \text{ сут}^{-1}$. Скорость сульфатредукции составляет $0,038 \text{ мг S кг}^{-1} \text{ сут}^{-1}$. Вторым по значимости процессом является ацетокластический метаногенез. В синтезе ацетата участвуют анаэробные целлюлолитики, бродильщики, сульфатредукторы и ацетогены. Дальнейшая судьба биогенного метана может быть следующей: часть метана окисляется аэробными метанотрофами или потребляется анаэробными прокариотами, другая часть — диффундирует в водную толщу и далее в атмосферу, третья часть — входит в состав метаногидратов. Количественная оценка активности прокариот показывает, что метаногенное сообщество играет важную роль в круговороте веществ и энергии, участвует в процессах деструкции органического вещества, регуляции газового режима в озере и формировании химического состава воды и донных отложений озера Байкал [4].

Холодные источники

Микробиологические исследования холодных сероводородных источников Бахлайта (Кижингинский район, Республика Бурятия) показали, что в деструкции органического вещества участвуют бактерии различных физиологических групп, связанные между собой тесными трофическими отношениями. Распространение и активность этих микроорганизмов зависит от физико-химических условий источника. В этих микробных сообществах метаболиты одной группы микроорганизмов служат питательным субстратом для организмов последующих групп. На начальных стадиях деструкции органического вещества участвуют аэробные и анаэробные гидролитические микроорганизмы, разлагающие высокополимерные соединения. Об этом свидетельствует высокая численность (до $1000\text{-}560000$ клеток/мл) аэробных сапрофитов, протеолитиков, целлюлолитиков в сероводородных источниках. Количество анаэробных гидролитиков в исследуемых источниках составляло $10\text{-}10000$ клеток/мл. Численность бактерий-деструкторов в холодных сероводородных источниках увеличивается по изливу ручья из-за повышения температуры и поступления значительных количеств автотонного и аллотонного органического вещества в донные осадки.

Количественная оценка скорости микробного разложения белка и целлюлозы показала, что процесс деструкции полимерных органических веществ холодных сероводородных источниках идет интенсивно как в аэробных, так и в анаэробных условиях. Продукты гидролиза биополимеров служат субстратом для микроорганизмов конечных этапов деструкции — сульфатредукторов и метаногенов, численность и активность которых зависит от активности бактерий-деструкторов предыдущих этапов минерализации органического вещества и физико-химических условий среды.

Высокое содержание сульфатов ($474\text{-}555 \text{ мг/л}$) в воде скважины Бахлайта 4 объясняет активную деятельность сульфатредукторов в донных отложениях и микробных матах этого источника. Увеличение содержания сульфида до $16\text{-}18 \text{ мг/л}$ выявлено в ручье Бахлайта 2 на расстоянии $6\text{-}8 \text{ м}$ от излива. Это связано с образованием сероводорода за счет деятельности сульфатредуцирующих и, возможно, сапрофитных гнилостных бактерий. Количественная оценка скорости бактериальной деструкции органического вещества на терминальных его этапах показала, что активность сульфатредукторов в этих источниках выше, чем мета-

ногенных бактерий, о чем свидетельствуют данные об использовании органического углерода.

В настоящее время начаты исследования по изучению разнообразия, таксономии и физиолого-биохимических особенностей психрофильных и психротрофных анаэробов из холодных источников Северного Прибайкалья.

Проведенные сезонные исследования показали, что в экосистеме холодных источников Северного Прибайкалья круглогодично функционирует микробное сообщество, которое является ключевым агентом в процессах деструкции органического вещества. Молекулярно-генетический анализ микробных сообществ холодных источников Северного Прибайкалья показал распространение психрофильных и мезофильных прокариот, среди которых доминировали протеобактерии (до 70%) и присутствовали археи (1%).

Культуры микроорганизмов, выделенные из экстремальных местообитаний Центральной Азии

Активные исследования микробных сообществ термальных и холодных источников, содовых и содово-соленых озер, ультрапресного озера Байкал сопровождались открытием новых видов и родов микроорганизмов, обладающих рядом уникальных свойств.

Термофильные, алкалофильные, алкалотолерантные и галоалкалофильные бактерии подобно другим экстремофилам привлекали значительное внимание исследователей как продуценты промышленно-значимых ферментов. Различные виды хемолитотрофных и органотрофных прокариот могут быть использованы для производства биоэлектричества и биогаза. Цианобактерии могут синтезировать водород и алканы. Метаногенное сообщество можно использовать для производства биогаза. Использование вод озер со специфичным гидрохимическим составом позволяет получить накопительные и чистые культуры алкалофилов, которые могут представлять интерес для биотехнологий.

В коллекции экстремофильных микроорганизмов лаборатории микробиологии ИОЭБ СО РАН представлены около 200 штаммов термофильных, алкалофильных, галофильных и психрофильных аэробных и анаэробных бактерий из экстремальных экосистем Байкальского региона: термальных источников Республики Бурятия и Монголии, содовых и содово-соленых озер, озера Байкал. В том числе, 56 штаммов термофильных и алкалотермофильных бактерий, 110 штаммов алкалофильных, галофильных и галоалкалофильных бактерий различных физиологических групп, 10 штаммов фототрофных бактерий.

В 2017 г. ученики Б. Б. Намсараева опубликовали статью «*Alkaliphilus namsaraevii* sp. nov., an alkaliphilic iron- and sulfur-reducing bacterium isolated from a steppe soda lake» в престижном международном журнале *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology* [5]. Авторы статьи А. Г. Захарюк и Л. П. Козырева и др. выделили новый вид бактерии из озера Хилганта (Забайкальский край) и назвали в честь основателя бурятской микробиологической научной школы — Б. Б. Намсараева.

Современный уровень исследований в лаборатории микробиологии Института общей и экспериментальной биологии СО РАН поддерживается благодаря тесному сотрудничеству с ведущими отечественными и зарубежными научными учреждениями. С 1996 г. лаборатория микробиологии участвует в конкурсах

научных проектов международных организаций, российских научных фондов и государственных учреждений. Результаты научной деятельности Б. Б. Намсараева опубликованы в 19 монографиях и 400 статьях, которые широко цитируются отечественными и иностранными учеными.

Большое внимание Б. Б. Намсараев уделял подготовке научных кадров, под его руководством Б.Б. подготовлено 36 кандидатов наук и 1 доктор наук, которые работают в научных и учебных учреждениях Улан-Удэ, Иркутска, Читы, Москвы, Агинского округа, Якутии и Ярославской области. Б. Б. Намсараев многие годы возглавлял кафедру экспериментальной биологии, являлся членом Диссертационных советов по защите кандидатских и докторских диссертаций Бурятского государственного университета, возглавлял Бурятское отделение Российского микробиологического общества.

Научные взгляды и системный подход Баира Бадмабазаровича Намсараева дали его ученикам импульс к самостоятельному поиску и развитию актуальных направлений современной микробиологии.

Литература

1. Микробиология в Бурятии: этапы становления и развития / отв. ред. В. М. Горленко. Улан-Удэ: Изд-во БНЦ СО РАН, 2013. 238 с.
2. Геохимическая деятельность микроорганизмов гидротерм Байкальской рифтовой зоны. Новосибирск: Академическое изд-во «Гео», 2011. 302 с.
3. Солончатые и соленые озера Забайкалья: гидрохимия, биология / отв. ред. Б. Б. Намсараев. Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2009. 340 с.
4. Намсараев Б. Б., Земская Т. И. Микробиологические процессы круговорота углерода в донных осадках озера Байкал. Новосибирск: Издательство СО РАН, 2000. 160 с.
5. Zakharyuk A., Kozyreva L., Ariskina E., Troshina O., Kopitsyn D., Shcherbakova V. *Alkaliphilus namsaraevii* sp. nov., an alkaliphilic iron- and sulfur-reducing bacterium isolated from a steppe soda lake // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2017. № 67. P. 1990–1995.

THE SCIENTIFIC SCHOOL OF PROFESSOR B. B. NAMSARAEV

Elena V. Lavrentyeva

cand. Sci. (Bio), Institute of general and experimental biology SB RAS
Buryat State University
E-mail: lena_l@mail.ru

Tuyana G. Banzaraktsaeva

cand. Sci. (Bio), Institute of general and experimental biology SB RAS
E-mail: tuyana_banz@mail.ru

Darima D. Barkhutova

cand. Sci. (Bio), Institute of general and experimental biology SB RAS
E-mail: darima_bar@mail.ru

The formation of the School of Microbial Ecology of Extreme Ecosystems under the direction of the Honored Worker of Science of the Russian Federation, Honored Worker of Higher Education, Doctor of Biological Sciences, Professor Namsaraev Bair Badmabazarovich is shown

at the Buryat Scientific Center of the SB RAS and the Buryat State University. The main scientific results on the study of extreme microbial communities are presented.

Keywords: microbiology, B. B. Namsaraev, scientific school, extreme ecosystems.

References

1. Microbiology in Buryatia: stages of formation and development / edited by V. M. Gorklenko. Ulan-Ude: Izd-vo BNC SO RAN, 2013. 238 s.
2. Geochemical activity of microorganisms of the hydrotherm of the Baikal rift zone. Novosibirsk: Akademicheskoye izd-vo "Geo", 2011. 302 s.
3. Brackish and saline lakes of Transbaikalia: hydrochemistry, biology / edited by B. B. Namsaraev. Ulan-Ude: Izd-vo BGU, 2009. 340 s.
4. Namsaraev B. B., Zemskaya T. I. Microbial processes of carbon cycle in bottom sediments of Lake Baikal. Novosibirsk: SO RAN, 2000. 160 s.
5. Zakharyuk A., Kozyreva L., Ariskina E., Troshina O., Kopitsyn D., Shcherbakova V. *Alkaliphilus namsaraevii* sp. nov., an alkaliphilic iron- and sulfur-reducing bacterium isolated from a steppe soda lake // Int. J. Syst. Evol. Microbiol. 2017. № 67. P. 1990–1995.