



Андреева Диана Валерьевна

В 2007 г. окончила биолого-химический факультет Дальневосточного государственного гуманитарного университета. Тогда же поступила в аспирантуру ИВЭП ДВО РАН по специальности «экология», научный руководитель – проф., д.б.н. Л.М. Кондратьева. В настоящее время завершает диссертационную работу «Функциональные особенности сульфатредуцирующих бактерий в различных компонентах экосистемы реки Амур». Область научных интересов связана с изучением биогеохимических процессов формирования качества поверхностных и подземных вод. Результаты исследований были представлены на конференциях различного уровня, в том числе международных – во Франции (г. Ренн) и Германии (г. Ландау). Имеет 36 научных публикаций.

УДК 543.39+282.252.1

Д.В. АНДРЕЕВА

Сульфатредуцирующие бактерии из различных местообитаний реки Амур

Обсуждаются результаты микробиологических исследований численности сульфатредуцирующих бактерий из воды, донных отложений и льда р. Амур. Особое внимание уделяется трансграничному участку, где качество воды формируется под влиянием стока р. Сунгари с территории КНР. Показано, что высокая численность и активность сульфатредуцирующих бактерий из различных компонентов экосистемы р. Амур определяется влиянием комплекса экологических факторов: условиями местообитания, гидрологическим режимом, составом органических веществ, поступающих со стоком крупных притоков (реки Зeya, Буряя, Сунгари, Уссури).

Ключевые слова: сульфатредуцирующие бактерии, вода, донные отложения, лед, река Амур.

Sulphate-reducing bacteria from different habitats of the Amur River. D.V. ANDREEVA (Institute of Water and Ecological Problems, FEB RAS, Khabarovsk).

The article discusses the results of microbiological studies of the quantity of sulphate-reducing bacteria from water, bottom sediments and ice of the Amur River. Particular attention is paid to the cross-border section where the Amur River quality is affected by the Songhua River flow from the People's Republic of China. The article shows that the high quantity and activity of sulphate-reducing bacteria from different components of the Amur River ecosystem is determined by the influence of a complex of environmental factors: habitat conditions, hydrological regime, composition of organic substances carried with the large tributaries flow (Zeya, Bureya, Sungari, Ussuri Rivers).

Key words: sulphate-reducing bacteria, water, bottom sediments, ice, the Amur River.

АНДРЕЕВА Диана Валерьевна – научный сотрудник (Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, Хабаровск). E-mail: freckles2008@yandex.ru

Многие экологические проблемы Приамурья можно объединить вокруг общего фактора – качество воды, которое обусловлено загрязнением р. Амур органическими веществами различного строения и происхождения. Качество и вторичное загрязнение водной среды, возможность биоаккумуляции различных элементов и их передача по трофическим цепям, поведение токсичных элементов в контактных зонах вода–дно и вода–лед напрямую связаны с динамикой биогеохимических процессов разложения органических веществ, поступающих с поверхностным стоком и в составе сточных вод [9].

При оценке экологического состояния р. Амур важное место отводится изучению трансграничного загрязнения с территории Китая, в том числе поступлению разнообразных поллютантов со стоком р. Сунгари [5–7, 10, 16, 18]. Загрязнение р. Сунгари существенно влияет на качество воды в р. Амур. Взвешенные вещества, выносимые со стоком р. Сунгари, определяют сезонное качество воды в р. Амур.

Известно, что в донных осадках имеют место различные этапы практически всех природных циклов: углерода, азота, фосфора и серы. Степень завершенности этих циклов и вероятность накопления тех или иных промежуточных продуктов зависят от окислительно-восстановительных условий. Серьезные нарушения в балансе круговорота веществ, обеспечивающего самоочищение водных экосистем, происходят под влиянием антропогенных факторов, при поступлении большого количества органических веществ различного строения и токсичных элементов.

Вовлечение органических веществ во внутриводоемные процессы сопровождается активным потреблением кислорода и его дефицитом в придонных слоях воды и донных отложениях. При лимите кислорода в донных отложениях активизируется процесс сульфатредукции, который является одним из показателей эвтрофирования водных экосистем [11, 15, 21, 22].

Процесс сульфатредукции может происходить в контактной зоне вода–дно, толще донных осадков и во льдах при участии сульфатредуцирующих бактерий (СРБ). В результате активизации процессов сульфатредукции из-за дефицита кислорода изменяются окислительно-восстановительные условия, выделяется токсичный для гидробионтов сероводород и, как следствие, ухудшается санитарно-экологическая обстановка на отдельных участках реки. Поэтому изучение биогеохимических процессов на разных участках



Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды, донных отложений и льда

р. Амур можно отнести к приоритетным направлениям исследования механизмов формирования качества природных вод в Приамурье.

В работе представлены результаты определения численности и активности сульфатредуцирующих бактерий, участвующих в биогеохимических процессах трансформации органических веществ в различных компонентах экосистемы р. Амур.

Материалы и методы

В качестве объектов исследования использовали микробные комплексы из различных местообитаний (вода, лед, донные отложения), отобранные на разных участках р. Амур – в зоне влияния крупных притоков Зея, Буряя, Сунгари, Усури и в районе городов Хабаровск, Амурск и Комсомольск-на-Амуре.

Во время исторического наводнения в 2013 г. пробы воды отбирали на четырех створах р. Амур: I створ – Амурская протока; II створ – 3 км Среднего Амура; III створ – Пемзенская протока; IV створ – р. Амур ниже железнодорожного моста. Пробы донных отложений (ДО) отбирали летом 2009 г. в зоне влияния крупных притоков Зея, Буряя, Сунгари (рис. 1).

Исследования льда проводили в нижнем течении р. Амур в окрестностях Хабаровска на четырех створах в зимние периоды 2012–2016 гг. (рис. 1). Керна льда отбирали кольцевым буром (внутренний диаметр 16 см) по поперечному профилю водотока. Распил кернов льда на слои проводили с учетом его неоднородной структуры на очищенном от снега льду, затем хранили в морозильной камере при температуре -18°C .

Микробиологические исследования осуществляли с использованием стандартных методов культивирования микроорганизмов на твердых (агаризованных) и жидких питательных средах [4, 13, 14]. Учет численности сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) проводили путем посевов инокулята на агаризованную селективную среду Морриса методом глубинного посева с последующим пересчетом на 1 мл воды, расплава льда или 1 г ДО и выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ/мл или КОЕ/г).

Активность роста СРБ оценивали фотометрически по изменению оптической плотности (ОП) культуральной жидкости при 600 нм на КФК-3-01. Для определения устойчивости сульфатредуцирующих бактерий к ионам ртути *in vitro* использовали водорастворимую соль HgNO_3 в двух концентрациях: 0,0005 и 0,001 мг/л. Содержание ртути определяли в Хабаровском инновационно-аналитическом центре на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) фирмы «Perkin Elmer» (США) методом Total Quant.

Результаты и обсуждение

Планктонные сульфатредуцирующие бактерии. Специфика природных условий бассейна р. Амур – сезонные изменения гидрологического режима под влиянием крупных притоков. Особое место занимают наводнения, охватывающие значительные пространства и имеющие частую повторяемость [12]. В это время основными показателями качества воды выступают изменения содержания органических веществ различного происхождения [6, 7], ионов биогенных элементов [17, 18] и тяжелых металлов [3].

При этом активизируются биогеохимические процессы деструкции различных органических веществ, входящих в состав затопленных почв и растительных остатков, и изменяется качество воды.

Для оценки окислительно-восстановительной обстановки в период наводнения использовали численность индикаторной группы СРБ (рис. 2).

В июне 2013 г. на начальном этапе формирования наводнения на р. Амур численность СРБ у правого берега в районе г. Хабаровск составляла 342,3 КОЕ/мл. В августе 2013 г.,

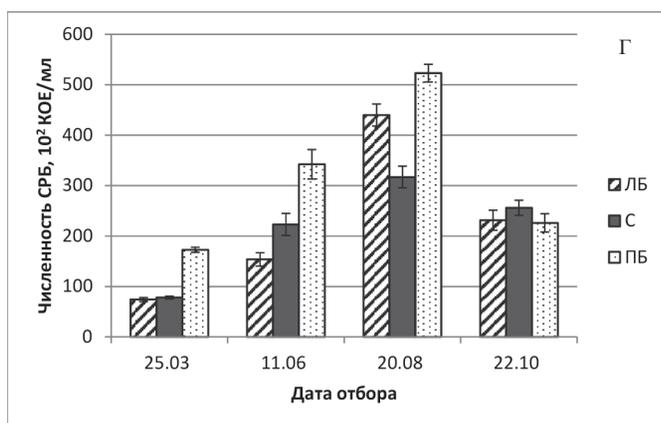
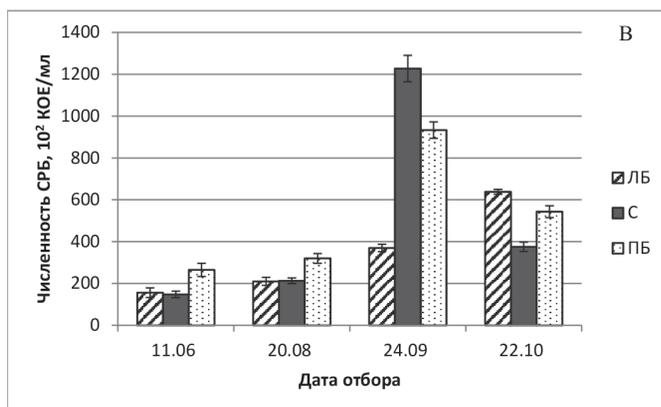
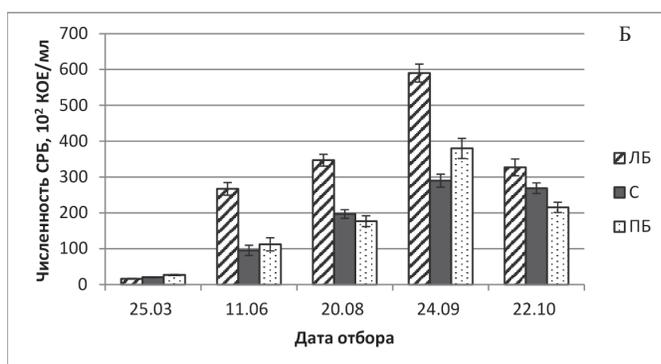
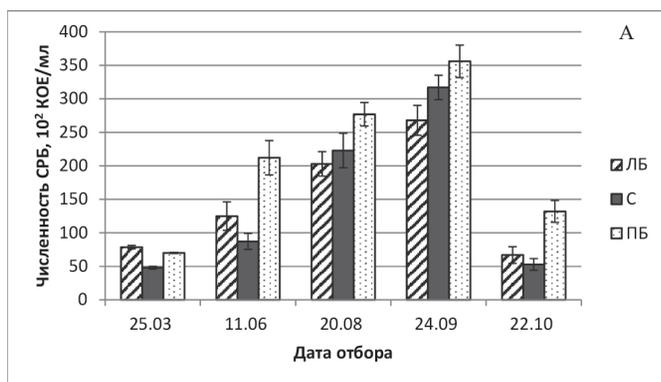


Рис. 2. Численность сульфатредуцирующих бактерий в 2013 г.: А – р. Амур, район г. Хабаровск; Б – р. Амур ниже железнодорожного моста; В – Амурская протока; Г – Пемзенская протока. Здесь и на рис. 6, 7 ЛБ – левый берег, С – середина, ПБ – правый берег

когда уровень воды в р. Амур у г. Хабаровск составлял 673 см, численность СРБ продолжала увеличиваться у правого берега и ниже железнодорожного моста. Это свидетельствует о распределении органических веществ различного происхождения вдоль правого берега. В сентябре, когда уровень воды в р. Амур у г. Хабаровск понизился до 508 см, зарегистрирована максимальная численность СРБ в р. Амур ниже г. Хабаровск – на середине и у правого берега (рис. 2). В период наводнения при поступлении с поймы в речную воду органических веществ растительного генезиса происходили процессы их микробиологической деструкции, которые сопровождались увеличением численности СРБ. Согласно гидрохимическим исследованиям [16] в период катастрофического наводнения 2013 г. зарегистрирован максимальный сток сульфатов (2700 т/сут).

Бентосные сульфатредуцирующие бактерии. По результатам микробиологических исследований донных отложений, отобранных на Среднем Амуре в зоне влияния крупных притоков (реки Зея, Буряя, Сунгари), максимальная численность СРБ обнаружена ниже устья р. Сунгари (рис. 3). Это свидетельствует об интенсивной сульфатредукции на участке со значительным эвтрофированием за счет поступления органических веществ и сульфатов с китайской стороны (поверхностный сток, промышленные и бытовые сточные воды).

В модельном эксперименте для определения активности бентосных МК в качестве различных источников углерода использовали лактат кальция, ацетат натрия, пептон и глюкозу. Эти субстраты быстро вовлекаются в микробиологические процессы и оказывают существенное влияние на формирование качества воды. При деструкции растительных остатков (целлюлозы) в результате отмирания затопленной растительности происходит поступление органических веществ в водную среду и активизация микробиологических процессов трансформации органических веществ, в том числе процесса сульфатредукции.

Установлено, что на участке р. Амур наибольшей потенциальной активностью обладали бентосные МК на лактате кальция, максимум отмечен в зоне влияния стока р. Сунгари (рис. 4). Высокая активность микробных комплексов отмечена и при росте на глюкозе в качестве единственного источника углерода (рис. 4). На третьи сутки культивирования во всех пробах наблюдали интенсивное выделение CO_2 . Повышенная активность бактериобентоса была отмечена ниже устьев рек Буряя и Сунгари. Органические вещества растительного происхождения могли поступать с вышерасположенных участков со стоком р. Буряя из Бурейского водохранилища.

Исследования показали, что в донных отложениях, отобранных ниже устья р. Сунгари, происходят разнообразные биогеохимические процессы трансформации и деструкции

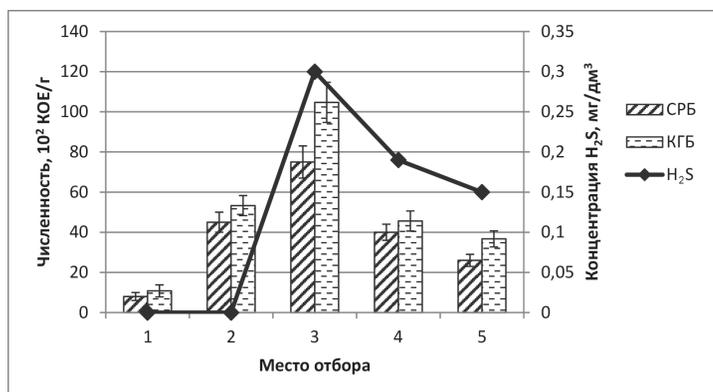


Рис. 3. Численность сульфатредуцирующих (СРБ), культивируемых гетеротрофных бактерий (КГБ) и содержание сероводорода в донных отложениях, отобранных на Среднем Амуре (июль 2009 г.): 1 – ниже устья р. Зея, 2 – ниже устья р. Буряя, 3 – ниже устья р. Сунгари, 4 – 0,5 км выше г. Фуюань, 5 – 0,5 км ниже г. Фуюань

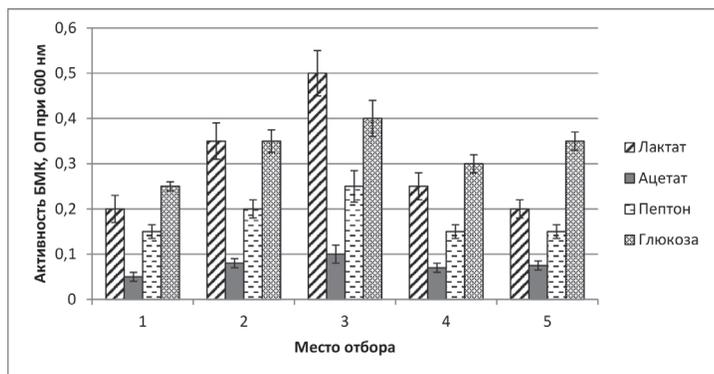


Рис. 4. Активность бентосных микробных комплексов (БМК) при использовании различных источников углерода: 1 – ниже устья р. Зея, 2 – ниже устья р. Буряя, 3 – ниже устья р. Сунгари, 4 – 0,5 км выше г. Фуюань, 5 – 0,5 км ниже г. Фуюань

органических веществ различного происхождения. Продукты метаболизма бентосных микробных комплексов вносят существенный вклад в загрязнение водных масс, что оказывает большое влияние на органолептические показатели и качество воды в районе г. Хабаровск, создавая трудности при водоподготовке.

Устойчивость бентосных сульфатредуцирующих бактерий к ртути. Ранее при исследовании загрязнения донных отложений р. Амур тяжелыми металлами в зоне влияния крупных притоков (реки Зея, Буряя и Сунгари) максимальные концентрации трех приоритетных токсичных элементов (ртуть, свинец, кадмий) были выявлены ниже устья р. Буряя. В результате исследований на Нижнем Амуре в районе крупных городов Хабаровск, Амурск, Комсомольск-на-Амуре установлено максимальное загрязнение ртутью донных отложений, отобранных вдоль правого берега выше г. Хабаровск [6].

Исследования устойчивости бентосных СРБ к ртути проводили в донных отложениях р. Амур в районе г. Хабаровск летом 2014 г. Повышенное содержание ртути (0,0012 мг/кг) обнаружено в ДО р. Амур, отобранных у правого берега в районе г. Хабаровск. Установлено,

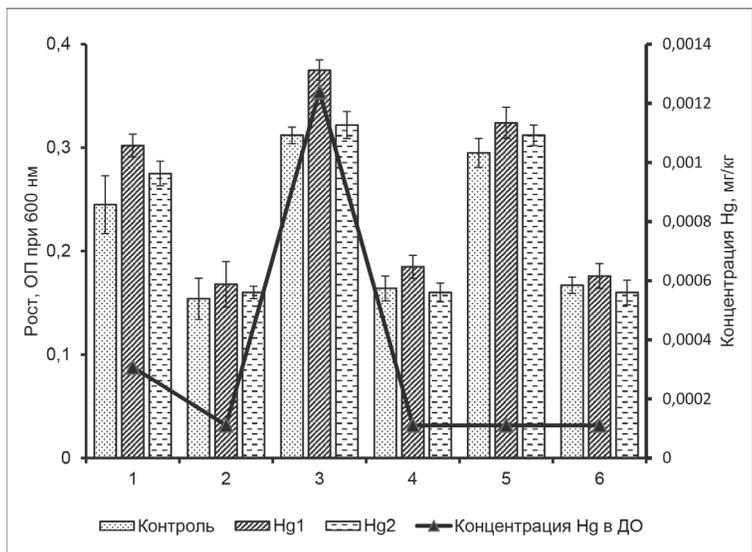


Рис. 5. Влияние ртути (Hg1 – 0,0005, Hg2 – 0,001 мг/л) на рост сульфатредуцирующих бактерий на лактате и ее содержание в донных отложениях р. Амур: 1, 2 – выше г. Хабаровск; 3, 4 – район г. Хабаровск; 5, 6 – ниже г. Хабаровск. Нечетные цифры – правый, четные – левый берег

что СРБ из этого местообитания проявляли максимальную устойчивость к ртути при концентрации 0,0005 и 0,001 мг/л (рис. 5). Это может быть связано с непосредственным участием СРБ в образовании метилртути. Китайскими исследователями [23] выделены два вида СРБ (*Desulfobulbus propionicus* и *Desulfovibrio vulgaris*) из пресноводных донных отложений. Их культивирование проводили в течение 30 сут при разных концентрациях сульфатов и солей ртути. Результаты показали, что во всех вариантах эксперимента концентрация метилртути увеличивалась. Поэтому наличие солей ртути и СРБ в водной среде или донных отложениях является важной предпосылкой для образования более токсичной метилртути.

Наиболее активный рост зарегистрирован у СРБ из донных отложений, отобранных у правого берега р. Амур в районе г. Хабаровск. Эти данные согласуются с более ранними исследованиями [1, 7] и свидетельствуют о локальном загрязнении воды и донных отложений ртутью, поступающей со стоком рек Уссури, Сунгари и сточными водами г. Хабаровск.

Сульфатредуцирующие бактерии во льдах. В последнее время появилось много работ, посвященных изучению механизмов метилирования ртути. Многие исследователи доказали, что сульфатредуцирующие бактерии являются ключевыми микроорганизмами, участвующими в процессах метилирования ртути [19, 20, 23]. Основные предпосылки для формирования условий для процессов метилирования ртути во льдах – наличие органических веществ, присутствие ртути и высокая численность культивируемых гетеротрофных и сульфатредуцирующих бактерий во льдах.

Для определения роли СРБ в формировании окислительно-восстановительных условий в период ледостава проведены микробиологические исследования структуры криомикробоценозов во льдах р. Амур. Распределение сульфатредуцирующих микроорганизмов в толще льда основного русла р. Амур существенно изменялось по поперечному профилю

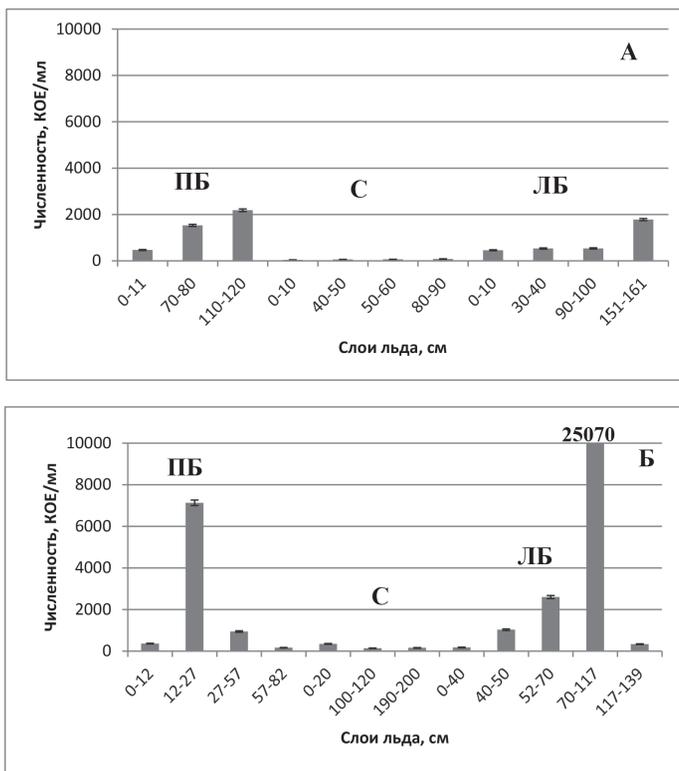


Рис. 6. Численность сульфатредуцирующих бактерий в разных слоях льда р. Амур в зимние периоды 2012/13 г. (А) и 2013/14 г. (Б)

в зависимости от содержания детрита (рис. 6). Зимой 2012/13 г. повышенная численность СРБ зарегистрирована у берегов в нижних слоях льда (в пределах 2000 КОЕ/мл), а на середине реки их численность была минимальной (80 КОЕ/мл).

В 2013–2014 гг. после катастрофического наводнения в керне льда, отобранном у правого берега р. Амур, наблюдали увеличение численности СРБ до 7130 КОЕ/мл. В слое льда толщиной 70–117 см с высоким содержанием детрита, отобранном у левого берега, кроме высокой численности культивируемых гетеротрофных бактерий зарегистрирована максимальная численность СРБ (25070 КОЕ/мл).

Согласно результатам исследований [2] содержание ртути во льдах существенно изменялось в течение всего периода наблюдений (2010–2014 гг.). Так, в основном русле

р. Амур максимальное содержание ртути (0,47 мкг/л) зафиксировано в нижних слоях льда у правого берега зимой 2010/11 г. В последующие зимние периоды отмечена тенденция снижения концентрации ртути до 0,02 мкг/л.

В Амурской протоке экстремально высокое содержание ртути (0,71 мкг/л) зарегистрировано в нижнем слое льда, отобранном у правого берега зимой 2011/12 г. Это может быть обусловлено ее поступлением с поверхностным стоком р. Усури. В следующие периоды наблюдений концентрация ртути в толще льда Амурской протоки была ниже предела обнаружения (<0,001 мкг/л).

В пробах льда из Пемзенской протоки максимальное содержание ртути (0,83 мкг/л) обнаружено в период ледостава 2012/13 г. в нижнем слое льда (92–102 см), отобранного у левого берега. Стоит отметить, что в послепаводковый период в 2013/14 г. установлены минимальные концентрации ртути (<0,001–0,02 мкг/л), и они были сопоставимы во всех трех пунктах отбора проб льда. Несмотря на низкие концентрации ртути во льдах в 2013/14 г. были обнаружены устойчивые к этому элементу сульфатредуцирующие бактерии [8].

Присутствие ртути в отдельных слоях льда Пемзенской протоки связано с периодическими

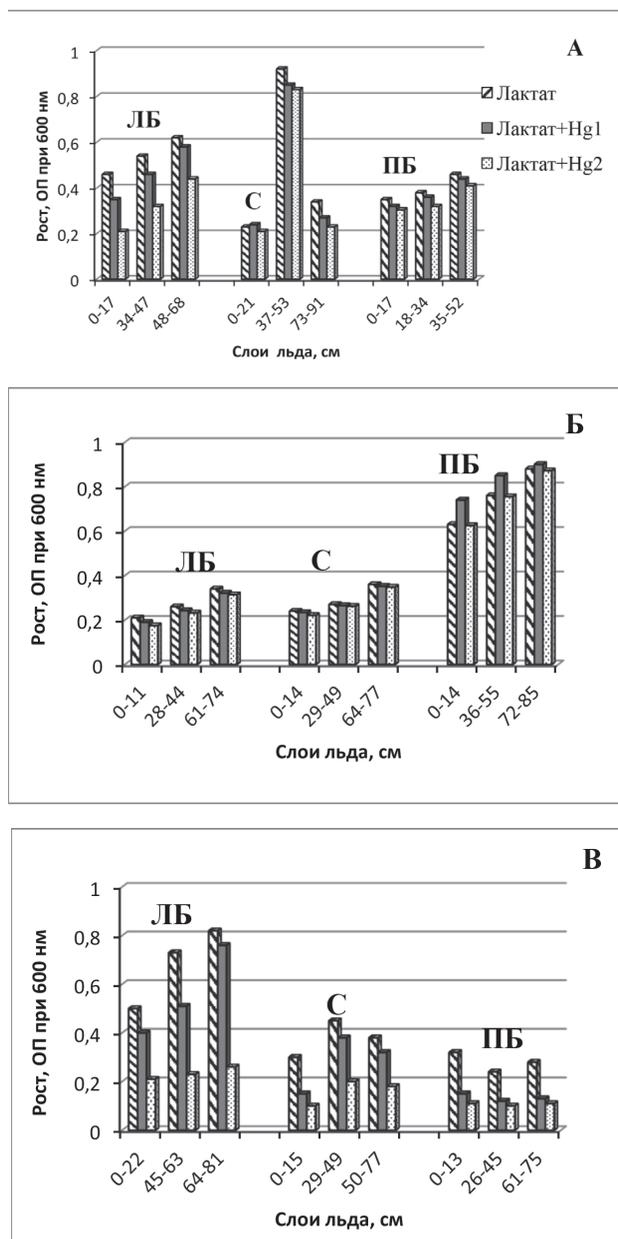


Рис. 7. Влияние ртути на активность роста сульфатредуцирующих бактерий из льда р. Амур (А), Амурской (Б) и Пемзенской (В) про-ток

сбросами водных масс из водохранилищ, о чем свидетельствует присутствие детрита в расплавах льда. Известно, что активная миграция ртути из почв происходит при создании водохранилищ. Ртуть может вступать во взаимодействие с фульвокислотами или поверхностью бактериальных мембран, которые способствуют ее переходу в подвижную метилированную форму.

Дальнейшие исследования устойчивости СРБ к ртути были проведены в 2016 г. В зависимости от местообитания криомикробоценозы оказались в различной степени устойчивыми к выбранному диапазону концентраций ртути 0,0005–0,001 мг/л (рис. 7). Повышенной устойчивостью к загрязнению ртутью обладали СРБ из кернов льда, отобранных у правого берега и на середине р. Амур. Максимальная устойчивость к ртути в концентрации 0,001 мг/л была характерна для СРБ из слоя льда 37–53 см в керне, отобранном на середине реки (рис. 7А). В этом же слое льда была максимальная численность разных физиологических групп микроорганизмов – активных деструкторов органических веществ и формировались условия для метилирования ртути.

Стимулирование роста СРБ при концентрации ртути 0,0005 и 0,001 мг/л зарегистрировано в слоях льда из керна, отобранного у правого берега Амурской протоки (рис. 7Б). Качество воды в Амурской протоке во многом определяется условиями формирования стока р. Уссури, в которой неоднократно фиксировали повышенное содержание ртути в воде и донных отложениях. СРБ из льда, отобранного в Пемзенской протоке, проявляли меньшую степень устойчивости к концентрации ртути 0,0005 мг/л (рис. 7В), чем СРБ из основного русла р. Амур и Пемзенской протоки.

Заключение

Таким образом, установлено, что характер загрязнения льдов ртутью существенно изменяется по годам. Это связано с различным уровнем загрязнения водных масс, распространяющихся по основному руслу р. Амур и протокам в период формирования ледового покрова. Главными предпосылками для активизации процесса сульфатредукции в р. Амур являются повышенные концентрации сульфатов и органических веществ, поступающих в составе неочищенных сточных вод, с поверхностным стоком и при регулярных попусках водной массы при контроле уровня воды в водохранилищах.

Экспериментально установлено, что ртуть стимулировала рост сульфатредуцирующих бактерий на лактате – продукте трансформации растительных остатков. В значительной степени этот эффект был характерен для СРБ из воды, донных отложений и льда, отобранных в районе Хабаровского водного узла. Загрязнение Амурской протоки ртутью определяется стоком р. Уссури, а Пемзенской протоки – сбросами с водохранилищ на реках Зея и Буря.

Устойчивость СРБ к ртутному загрязнению определяет возможность их участия в метилировании ртути в донных отложениях и льдах. К важным факторам, обеспечивающим процесс метилирования ртути в период ледостава, относятся растворенные и входящие в состав детрита органические вещества, обеспечивающие функционирование криомикробоценозов. Поэтому можно прогнозировать ухудшение качества воды во время весеннего ледохода в связи с активизацией биогеохимических процессов и поступлением продуктов трансформации органических веществ в р. Амур, а затем и в прибрежные акватории дальневосточных морей.

Автор выражает искреннюю признательность за постоянную помощь при выполнении работы научному руководителю – д.б.н., профессору Л.М. Кондратьевой, а также благодарит сотрудников ИВЭП ДВО РАН за отбор проб воды, донных отложений и льда, сотрудников Хабаровского инновационно-аналитического центра (ИТиГ ДВО РАН) за определение содержания ртути в различных компонентах экосистемы р. Амур.

ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева Д.В. Микробиологические исследования процесса сульфатредукции в р. Амур // Вода: химия и экология. 2015. № 8. С. 3–10.
2. Голубева Е.М., Кондратьева Л.М., Кипер Р.Н. Послойное распределение ртути во льдах реки Амур // Всерос. конф. «Водные и экологические проблемы, преобразование экосистем в условиях глобального изменения климата», Хабаровск, 29 сент. – 3 окт. 2014 г.: сб. докл. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2014. С. 58–61.
3. Голубева Е.М. Экосистемный подход к оценке загрязнения реки Амур токсичными элементами: автореф. дис. ... канд. биол. наук. Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2012. 22 с.
4. Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. Экология водных микроорганизмов. М.: Наука, 1977. 289 с.
5. Иванова Е.Г. Опыт совместных российско-китайских исследований рек Амур и Сунгари // Наука и природа Дальнего Востока. 2004. № 1. С. 40–42.
6. Кондратьева Л.М., Андреева Д.В., Голубева Е.М. Влияние крупных притоков на биогеохимические процессы в реке Амур // География и природные ресурсы. 2013. № 2. С. 36–43.
7. Кондратьева Л.М., Шуныкова Н.Н., Андреева Д.В. Особенности трансформации органических веществ в донных отложениях реки Амур // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: материалы Третьей Всерос. конф. с междунар. участием, Барнаул, 24–28 августа 2010 г. Барнаул: Изд-во АРТ, 2010. С. 146–149.
8. Кондратьева Л.М., Андреева Д.В., Голубева Е.М. Факторы, влияющие на процессы сульфатредукции и метилирования ртути во льдах реки Амур // Лед и снег. 2018. Т. 58, № 1. С. 105–116.
9. Кондратьева Л.М. Экологический риск загрязнения водных экосистем. Владивосток: Дальнаука, 2005. 299 с.
10. Кот Ф.С. Рассеянные металлы в донных отложениях р. Амур и зоны смешения в Охотском море. Оценка антропогенной составляющей // Геохимические и биогеохимические процессы в экосистемах Дальнего Востока. Вып. 9. Владивосток: Дальнаука, 1999. С. 80–91.
11. Леонов А.В., Чичерина О.В. Сульфатредукция в природных водоемах. 1. Влияние факторов среды и измеренные скорости процесса // Водные ресурсы. 2008. Т. 35, № 4. С. 438–455.
12. Махинов А.Н., Ким В.И., Воронов Б.А. Наводнение в бассейне Амура 2013 года: причины и последствия // Вестн. ДВО РАН. 2014. № 2. С. 5–14.
13. Методы общей бактериологии: в 3 т.; пер. с англ. / под ред. Ф. Герхардта, Р. Мюррея, Р. Костилоу, Е. Нестер, В. Вуд, Н. Крейг, Г. Филлипс. М.: Мир, 1983. Т. 1. 536 с.
14. Намсараев Б.Б., Бархутова Д.Д., Хасинов В.В. Полевой практикум по водной микробиологии и гидрохимии: метод. пособие. М.; Улан-Удэ: Изд-во БГУ, 2006. 68 с.
15. Соколова Е.А. Влияние температуры на развитие сульфатредуцирующих бактерий в экспериментальных и полевых условиях в зимний период // Сибир. экол. журн. 2010. № 6. С. 865–869.
16. Шестеркин В.П. Изменение содержания и стока сульфатов в водах Среднего Амура в зимнюю межень 1996–2015 гг. // Экология и безопасность жизнедеятельности города: проблемы и решения: материалы 5-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, Хабаровск, 23–24 августа 2016 г. / под ред. проф. С.А. Кудрявцева, проф. Л.И. Никитиной. Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2016. С. 297–301.
17. Шестеркин В.П. Изменение химического состава вод Амура в период исторического наводнения в 2013 году // Водные ресурсы. 2016. Т. 43, № 3. С. 287–296.
18. Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. Пространственная и сезонная изменчивость химического состава воды Среднего Амура // Водное хозяйство России. 2012. № 5. С. 18–28.
19. Achá D., Hintelmann H., Yee J. Importance of sulfate reducing bacteria in mercury methylation and demethylation in periphyton from Bolivian Amazon region // Chemosphere. 2011. Vol. 82, N 6. P. 911–916.
20. Achá D., Hintelmann H., Pabón C. Sulfate reducing bacteria and mercury methylation in the water column of the Lake 658 of the Experimental Lake Area // Geomicrobiol. J. 2012. Vol. 29, N 7. P. 667–674.
21. Barton L., Hamilton W. Sulphate-reducing bacteria: environmental and engineered systems. Cambridge: Univ. Press, 2007. 533 p.
22. Muyzer G., Stams A. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria // Nat. Rev. Microbiol. 2008. Vol. 6. P. 441–454.
23. Shao D., Kang Y., Wu S., Wong H. Effects of sulfate reducing bacteria and sulfate concentrations on mercury methylation in freshwater sediments // Sci. Total Environ. 2012. Vol. 424. P. 331–336.