

**СУЛЬФАТРЕДУЦИРУЮЩИЕ БАКТЕРИИ – ИНДИКАТОРЫ
ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕКИ АМУР**

Д.В. Андреева, Л.М. Кондратьева

*Институт водных и экологических проблем ДВО РАН, ул. Дикопольцева, 56,
г. Хабаровск, 680000, Россия. E-mail: freckles2008@yandex.ru*

В работе представлены результаты исследования численности и активности сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) из различных компонентов экосистемы р. Амур (вода, донные отложения, лед), и их устойчивости к тяжелым металлам. Высокая численность СРБ зарегистрирована в придонных слоях воды, донных отложениях и льдах, отобранных у правого берега р. Амур в районе г. Хабаровск, где проявляется влияние стока рек Уссури и Сунгари (КНР). На численность СРБ у левого берега р. Амур оказывали влияние гумифицированные природные воды, поступающие из Зейского и Бурейского водохранилищ. Планктонные и бентосные сульфатредуцирующие бактерии выступают индикаторами загрязнения экосистемы р. Амур сероводородом и метилртутью.

**SULPHATE REDUCING BACTERIA - INDICATORS
OF THE ECOLOGICAL CONDITION OF THE AMUR RIVER**

D.V. Andreeva, L.M. Kondrateva

*Institute of Water and Ecology Problems FEB RAS, 56 Dikopoltsev st.,
Khabarovsk, 680000, Russia. E-mail: freckles2008@yandex.ru*

The paper presents the results of a study of the number and activity of sulfate-reducing bacteria (SRB) from various components of the Amur River (water, bottom sediments, ice), and their resistance to heavy metals. A high number of SRB was recorded in the bottom layers of the water, bottom sediments and ice collected from the right bank of the Amur River near the city of Khabarovsk, where the impact of the discharge of the Ussuri and Sungari rivers (PRC) is manifested. The number of SRB at the left bank of the Amur River was influenced by humified natural waters coming from the Zeya and Bureya reservoirs. Planktonic and benthic sulfate-reducing bacteria act as indicators of pollution of the Amur River by hydrogen sulfide and methylmercury.

Качество и вторичное загрязнение водных экосистем, 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 (ОВ), поступающих с речным, поверхностным стоком и в составе сточных вод (Кондратьева, 2005). При оценке экологического состояния р. Амур важное место отводится влиянию крупных притоков (реки Зeya, Бурeya, Сунгари, Уссури) и трансграничному поступлению разнообразных поллютантов с территории Китая (Кондратьева и др., 2013; Шестеркин, Шестеркина, 2012).

Вовлечение ОВ в биогеохимические процессы, происходящие при евтрофировании водных экосистем, сопровождается активным потреблением кислорода и процессом сульфатредукции в придонных слоях воды и донных отложениях, в котором принимают участие сульфатредуцирующие бактерии (Леонов, Чичерина, 2008; Соколова, 2010; Muyzer, Stams, 2008). В результате активизации процессов сульфатредукции ухудшается санитарно-экологическая обстановка на отдельных участках реки за счет образования сероводородных зон, что оказывает негативное влияние на жизнедеятельность гидробионтов, часто приводя к их массовой гибели (Титова и др., 2017).

Кроме участия в глобальных биогеохимических циклах серы и углерода, сульфатредуцирующие микроорганизмы играют существенную роль в изменении биодоступности и повышении токсичности ртути при ее переходе в метилированную форму. На примере штаммов, представляющих два рода *Desulfovibrio* и *Desulfomicrobium*, было показано, что продукция метилртути в природных экосистемах зависит от присутствия у бактерий генов, кодирующих восстановление сульфата (Roh et al., 2006). Микроорганизмы, участвующие в метилировании ртути, занимают разнообразные экологические ниши, обуславливая глобальные масштабы метилирования ртути как в аэробных условиях, так и при лимите кислорода (Shao et al., 2012; Petrus et al., 2015; Podar et al., 2015). В результате биогеохимических процессов, включая микробиологическую деструкцию растительных остатков и гуминовых веществ почв, ртуть переходит в метилированную форму, что увеличивает её миграционную способность, поступление в толщу воды и накопление гидробионтами.

В связи с этим, исследования биогеохимических процессов с участием сульфатредуцирующих бактерий, происходящих в контактных зонах вода–донные отложения и вода–лед чрезвычайно актуальны для оценки экологического состояния водных экосистем в периоды открытого русла и ледостава.

Цель исследования: показать индикаторную роль сульфатредуцирующих бактерий в оценке экологического состояния р. Амур для прогнозирования формирования локальных сероводородных зон и метилирования ртути.

Материалы и методы

Во время комплексных экспедиций ИВЭП ДВО РАН в 2009–2014 гг. в зоне влияния крупных притоков (рек Зеи, Буреи, Сунгари) и в районе городов Хабаровска, Амурска и Комсомольска-на-Амуре были отобраны пробы воды, донных осадков и льда. Пробы поверхностных и придонных слоев воды отбирали батометром Молчанова ($V = 2$ л), а пробы донных отложений – штанговым дночерпателем с захватом слоя 0–15 см. Керны льда отбирали кольцевым буром (внутренний диаметр 16 см) по поперечному профилю реки. 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 .

Численность культивируемых гетеротрофных бактерий (КГБ) и СРБ определяли на агаризованных питательных средах согласно традиционным методам (Горленко и др., 1977; Методы..., 1983) и выражали в колониеобразующих единицах (КОЕ) в 1 г донных отложений или в 1 мл воды (расплава льда). В качестве источников углерода вносили лактат кальция (3,5 г/л), ацетат натрия (3,5 г/л), растворы пептона (2 г/л) и глюкозы (2 г/л). Активность бактериобентоса оценивали фотометрически по изменению оптической плотности (ОП) водной среды на фотоэлектроколориметре КФК-3-01 (Россия, «ЗОМЗ») при длине волны 600 нм.

Результаты и обсуждение

Численность сульфатредуцирующих бактерий в районе г. Хабаровск

В пробах воды, отобранных в районе железнодорожного моста (ж/д) и отличающихся по генезису распространяющихся ОВ, максимальная численность КГБ и СРБ зарегистрирована у правого и левого берегов (табл. 1).

Таблица 1

Численность различных физиологических групп микроорганизмов и содержание растворенных ОВ в р. Амур в районе г. Хабаровск

Место отбора проб		Численность микроорганизмов, 10 ² КОЕ/мл		Содержание Н ₂ S, мг/дм ³	РОВ, единицы абсорбции
		КГБ	СРБ		
Р. Амур в районе г. Хабаровск					
Правый берег	ПВ	827,7 ± 30,1	140 ± 18	Не обн.	0,304
	ДВ	606,7 ± 21,1	332,4 ± 72	0,013	0,411
Середина	ПВ	711,7 ± 30,4	123,3 ± 12,5	Не обн.	0,306
	ДВ	628,3 ± 17,5	278,6 ± 17,3	0,009	0,350
Левый берег	ПВ	725 ± 28,0	154,8 ± 12,0	Не обн.	0,390
	ДВ	513,3 ± 25,1	322,7 ± 15,6	0,015	0,419
Р. Амур в районе ж/д моста г. Хабаровск					
Правый берег	ПВ	895,2 ± 73,7	240 ± 12	Не обн.	0,322
	ДВ	621 ± 28,5	373,2 ± 86,2	0,019	0,441
Середина	ПВ	768,5 ± 22,6	187,3 ± 52,7	Не обн.	0,304
	ДВ	535,2 ± 43,7	363,6 ± 48,2	0,010	0,470
Левый берег	ПВ	971 ± 58,2	225,2 ± 54,0	Не обн.	0,356
	ДВ	764,5 ± 62,6	356,2 ± 68,7	0,021	0,461

Примечание. ПВ – поверхностная вода, ДВ – придонная вода

Вдоль правого берега р. Амур распространяется сток крупных притоков (реки Уссури и Сунгари) и происходит сброс хозяйственно-бытовых сточных вод предприятиями г. Хабаровск. Вдоль левого берега регистрируется влияние Зейского и Бурейского водохранилищ, которые выступают в качестве поставщиков большого количества растворенных гуминовых веществ и детрита растительного происхождения.

Сероводород регистрировали во всех пробах, отобранных из придонных слоев воды. Это свидетельствует о формировании восстановительных условий, благоприятных для развития СРБ. Поэтому здесь в зимний период может усиливаться риск образования сероводородных зон, связанный с дефицитом кислорода в подледной воде, наличием ОВ и активизацией сульфатредуцирующих бактерий.

Численность сульфатредуцирующих бактерий в реке Амур в период наводнения 2013 г.

Микробиологические исследования, проведенные в период катастрофического наводнения 2013 г. на р. Амур показали закономерную связь между численностью микробных сообществ и гидрологическим режимом. Во время наводнения в результате поступления ОВ растительного генезиса с затопленной поймы в р. Амур происходили активные процессы их микробиологической деструкции. В июне 2013 г. на начальном этапе формирования наводнения численность индикаторной группы СРБ в исследуемых местообитаниях увеличилась в 2–16 раз, по сравнению

с весенним периодом. На спаде паводка (сентябрь–октябрь) в основном русле р. Амур и в Пемзенской протоке на фоне максимального содержания РОВ резко увеличивалась численность СРБ.

В Амурской протоке в зоне влияния р. Усури численность СРБ была минимальной в течение всего периода наблюдений. Высокая численность СРБ сохранялась в р. Амур в послепаводковый период 2014 г.

Сравнительный анализ корреляционных связей между численностью сульфатредуцирующих бактерий, содержанием РОВ и их ароматической составляющей (АОВ) показал, что они существенно изменялись на различных створах в течение формирования наводнения (табл. 2). В основном русле р. Амур в июне и августе связь между парами СРБ-РОВ и СРБ-АОВ была отрицательной. Это могло быть связано с доминированием трудно минерализуемых АОВ и насыщением водных масс кислородом при высоких расходах воды. На спаде уровня воды (сентябрь–октябрь) установлена тесная положительная связь между этими парами. При затоплении поймы на глубину 2–3 м создавались условия для развития СРБ за счет дефицита кислорода при деструкции растительных остатков.

Таблица 2

Корреляционные связи между численностью сульфатредуцирующих бактерий и содержанием органических веществ в р. Амур и протоках в 2013 г.

Место/ Дата	СРБ/РОВ				
	25.03.2013	11.06.2013	20.08.2013	24.09.2013	22.10.2013
Р. Амур, р-н г. Хабаровск	0,96	-0,93	-0,81	–	-0,53
Р. Амур, ниже моста	–	-0,97	-0,93	0,99	0,87
Пр. Амурская	0,44	-0,67	-0,98	0,99	-0,84
Пр. Пемзенская	-0,82	0,71	0,87	0,61	0,77
Место/ Дата	СРБ/АОВ				
	25.03.2013	11.06.2013	20.08.2013	24.09.2013	22.10.2013
Р. Амур, р-н г. Хабаровск	0,99	-0,93	-0,84	–	-0,43
Р. Амур ниже моста	–	-0,98	-0,94	0,99	0,45
Пр. Амурская	0,12	-0,63	-0,98	0,98	-0,87
Пр. Пемзенская	-0,34	0,78	0,88	0,60	0,73

Примечание. Жирным прямым шрифтом выделены сильные положительные (прямые) связи; курсивом – сильные отрицательные (обратные) связи.

Численность и активность сульфатредуцирующих бактерий на Среднем и Нижнем Амуре

В летний период 2009 г. были проведены микробиологические исследования донных отложений (ДО), отобранных на Среднем Амуре из поверхностного слоя (0–10 см) в зоне влияния крупных притоков (реки Зея, Буряя, Сунгари). Ниже устья р. Сунгари была зарегистрирована высокая численность СРБ, КГБ (рис. 1) и максимальная концентрация сероводорода (0,3 мг/дм³). Это свидетельствует о том, что на данном участке реки происходит значительное евтрофирование за счет поступления ОВ и сульфатов с китайской территории (поверхностный сток, промышленные и бытовые сточные воды), приводящее к активизации сульфатредукции.

Для оценки влияния ОВ различного строения на активность бентосных СРБ проведен модельный эксперимент с разными источниками углерода: лактат кальция, ацетат натрия, пептон и глюкоза. Эти субстраты быстро вовлекаются в микробиологические процессы и оказывают существенное влияние на формирование качества воды. Ранее было установлено (Pikuta et al., 2003), что в пресноводных экосистемах

преобладают СРБ, потребляющие лактат и менее широко распространены бактерии, метаболизирующие ацетат.

Высокой потенциальной активностью при росте на лактате кальция обладали бентосные МК из зоны влияния стока р. Сунгари (рис. 2). На третьи сутки культивирования на этом субстрате наблюдали интенсивное выделение CO_2 . Повышенная активность СРБ из донных отложений, отобранных ниже устьев рек Бурея и Сунгари, была отмечена на глюкозе и пептоне. Активность бактериобентоса на ацетате натрия на всем исследуемом участке реки была низкой.

В зоне влияния Амурско-Комсомольского урбо-промышленного комплекса установлены существенные различия в численности бентосных СРБ в зависимости от места отбора проб ДО. Так, их максимальная численность ($159 \cdot 10^3$ КОЕ/г) и высокая активность роста на лактате зарегистрирована в ДО, отобранных у правого берега ниже г. Комсомольск-на-Амуре.

Такой эффект обусловлен формированием зон аккумуляции взвешенных наносов вдоль правого берега ниже г. Хабаровск (Ким, Шамов, 2000) и высоким содержанием ОВ. У левого берега, несмотря на расположенные здесь крупные города (Амурск и Комсомольск-на-Амуре), численность СРБ была ниже в 2 раза ($84 \cdot 10^3$ КОЕ/г). Известно, что влияние сточных вод, сбрасываемых предприятиями г. Хабаровск, распространяется до г. Комсомольск-на-Амуре. Так, в 2008 г. в р. Амур предприятиями г. Хабаровск и Хабаровского края было сброшено 276,2 млн м^3 сточных вод, из них без очистки и недостаточно очищенных 41,96 и 147,89 млн м^3 соответственно (Государственный ..., 2009).

Для определения экологического риска образования сероводорода в зонах аккумуляции взвешенных веществ с высоким содержанием ОВ нами предложен специальный коэффициент риска $R(\text{H}_2\text{S})$, учитывающий численность двух физиологических групп микроорганизмов: сульфатредуцирующих (СРБ) и аммонифицирующих бактерий (АМБ), принимающих участие в процессах сульфатредукции и аммонификации:

$$R(\text{H}_2\text{S}) = N(\text{СРБ})/N(\text{АМБ})$$

Анализ коэффициента риска $R(\text{H}_2\text{S})$ на разных участках р. Амур показал существенные различия в его значениях на Среднем и Нижнем Амуре в зависимости от гидрологического режима. Так, максимальные значения $R(\text{H}_2\text{S})$ были зарегистрированы в 2008 г. на Нижнем Амуре вдоль правого берега между городами Амурск и Комсомольск-на-Амуре. В этом году продолжался период пониженной

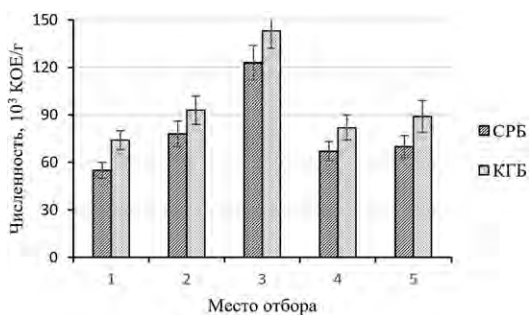


Рис. 1. Численность СРБ и КГБ в донных отложениях, отобранных на Среднем Амуре: 1 – ниже устья р. Зeya, 2 – ниже устья р. Бурея, 3 – ниже устья р. Сунгари, 4 – 0,5 км выше г. Фуюань, 5 – 0,5 км ниже г. Фуюань

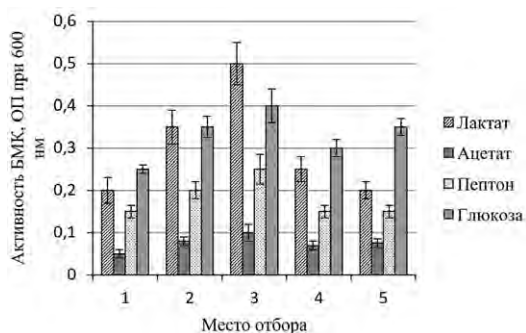


Рис. 2. Активность бентосных микробных комплексов при использовании различных источников углерода: 1 – ниже устья р. Зeya, 2 – ниже устья р. Бурея, 3 – ниже устья р. Сунгари, 4 – 0,5 км выше г. Фуюань, 5 – 0,5 км ниже г. Фуюань

водности на р. Амур и в районе г. Комсомольск-на-Амуре были зарегистрированы массовые заморы рыбы, которые могли быть связаны с дефицитом кислорода, высокой температурой воды и ее загрязнением сероводородом.

Проведенные исследования показали, что при прогнозировании экологического риска образования сероводородных зон в бассейне р. Амур необходимо учитывать гидрологический режим, зоны аккумуляции взвешенных наносов и численность СРБ на конкретном участке реки.

Устойчивость бентосных сульфатредуцирующих бактерий к тяжелым металлам

При исследовании загрязнения донных отложений р. Амур тяжелыми металлами в зоне влияния крупных притоков (реки Зея, Буря, Сунгари) максимальные концентрации трех приоритетных токсичных элементов (ртуть, свинец, кадмий) были выявлены ниже устья р. Буря (Кондратьева и др., 2010). Наиболее адаптированными к присутствию кадмия 0,001 мг/л оказались СРБ из донных отложений, отобранных в устьевых зонах рек Зея и Буря. Эти данные свидетельствуют о локальном загрязнении донных отложений р. Амур ионами кадмия. Экспериментальные исследования показали, что ионы свинца являются важным компонентом развития СРБ. Установлено, что концентрация ацетата свинца в 1,0 г/л способствовала росту численности сульфатредуцирующих бактерий практически во всех местообитаниях. Увеличение концентрации в 3 раза (до 3 г/л) приводило к резкому снижению численности СРБ.

Сульфатредуцирующие бактерии из донных отложений, отобранных ниже устьев рек Буря и Сунгари отличались повышенной устойчивостью к загрязнению ионами ртути в концентрации 0,0005 мг/л. Учитывая сопряженность процессов сульфатредукции и метилирования ртути предполагается, что наиболее активно они могут происходить на тех участках реки, где фиксируется повышенное евтрофирование и лимит кислорода, а в водной среде и донных отложениях присутствует ртуть.

Так, летом 2014 г. были проведены микробиологические исследования донных отложений и устойчивости бентосных СРБ к ртути на Нижнем Амуре в районе крупных городов Хабаровск, Амурск, Комсомольск-на-Амуре. Было установлено максимальное загрязнение ртутью ДО, отобранных вдоль правого берега в районе г. Хабаровск (0,0012 мг/кг). Сульфатредуцирующие бактерии из донных отложений, отобранных на этом участке вдоль правого берега, проявляли максимальную устойчивость к ртути при концентрации 0,0005

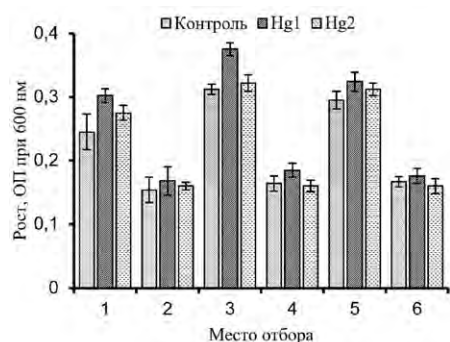


Рис. 3. Влияние ионов ртути (Hg1 – 0,0005, Hg2 – 0,001 мг/л) на рост бентосных сульфатредуцирующих бактерий на лактате: 1, 2 – выше г. Хабаровск; 3, 4 – район г. Хабаровск; 5, 6 – ниже г. Хабаровск (1, 3, 5 – у правого берега, 2, 4, 6 – у левого берега)

и 0,001 мг/л (рис. 3). Присутствие СРБ и ртутное загрязнение донных отложений являются важной предпосылкой для образования более токсичной метилртути.

Наиболее активный рост на лактате в присутствии ртути зарегистрирован у СРБ из донных отложений, отобранных у правого берега р. Амур в районе г. Хабаровск. Эти данные согласуются с предыдущими исследованиями (Андреева, 2015; Кондратьева и др., 2010) и свидетельствуют о локальном загрязнении воды и донных отложений ртутью, поступающей со стоком рек Уссури, Сунгари и сточными водами г. Хабаровск.

Послойное распределения сульфатредуцирующих бактерий во льдах р. Амур

Лед, являясь важным компонентом биосферы, выступает фактором формирования экологической ситуации в водных экосистемах и промежуточным звеном в гляциогенной миграции веществ. При включении токсикантов в лед из загрязненных природных вод, происходит его внутриводоемное загрязнение. Основные функции ледовых образований – обеспечение гляциогенной миграции веществ и создание геохимических барьеров на границе фаз, в результате чего происходят экологически значимые геохимические изменения в природных водах и льдах (Иванов, 1998). Лед как физико-химическая и биогляциальная система исключительно неоднороден. Это свойство обусловлено его природой как физического тела, структурой и текстурой, особенностями химического состава, множественностью форм химических соединений и их специфическим распределением (Махинов и др., 2017). Многолетние исследования льда в р. Амур показали, что кроме послойного изменения его химического состава, в толще льда наблюдается неравномерное распределение микроорганизмов. Были установлены ярко выраженные ответные реакции микробных сообществ льда на различные факторы: биогенные (развитие водорослей), абиогенные (толщина снежного покрова, присутствие микропримесей) и антропогенные (локальное загрязнение нефтепродуктами). Установлена связь между численностью отдельных групп криомикробоценозов, загрязнением льда азотсодержащими ОВ, ароматическими соединениями фенольного ряда и ионами тяжелых металлов (Кондратьева, 2010; Кондратьева и др., 2018).

Для определения роли СРБ в формировании окислительно-восстановительных условий в период ледостава были проведены микробиологические исследования структуры криомикробоценозов во льдах р. Амур. Распределение СРБ в толще льда основного русла р. Амур существенно изменялось по поперечному профилю в зависимости от содержания детрита. Так в зимний период 2012–2013 гг. повышенная численность СРБ (в пределах 2000 КОЕ/мл) зарегистрирована в нижних слоях кернов льда, отобранных у берегов, а на середине реки отмечали ее минимальные значения (80 КОЕ/мл). Наряду с высокой численность СРБ во всех слоях льда у левого берега была зарегистрирована высокая численность фенолрезистентных бактерий. Это связано с поступлением гумифицированных водных масс из Зейского и Бурейского водохранилищ, содержащих большое количество растительных остатков, предшественников фенольных соединений.

После катастрофического наводнения в период ледостава 2013–2014 гг. в керне льда, отобранном у правого берега, наблюдали увеличение численности СРБ до 7130 КОЕ/мл. В слое льда 70–117 см с высоким содержанием детрита, отобранном у левого берега, кроме высокой численности КГБ, была зарегистрирована максимальная численность СРБ (25070 КОЕ/мл).

Повышенной устойчивостью к загрязнению ртутью обладали СРБ из кернов льда, отобранных у левого и правого берегов р. Амур в районе г. Хабаровск (рис. 4А). В слоях льда, в которых присутствовал детрит, методом хромато-масс-спектрометрии было зарегистрировано максимальное разнообразие органических веществ, включая продукты трансформации растительных остатков. СРБ, выделенные из верхних слоев льда, отобранных у берегов Пемзенской протоки, проявляли меньшую степень устойчивости к концентрации ртути 0,0005 мг/л, чем СРБ из основного русла р. Амур (рис. 4Б). Рост СРБ из 60–85 см слоя льда (середина протоки) ингибировали обе концентрации ртути.

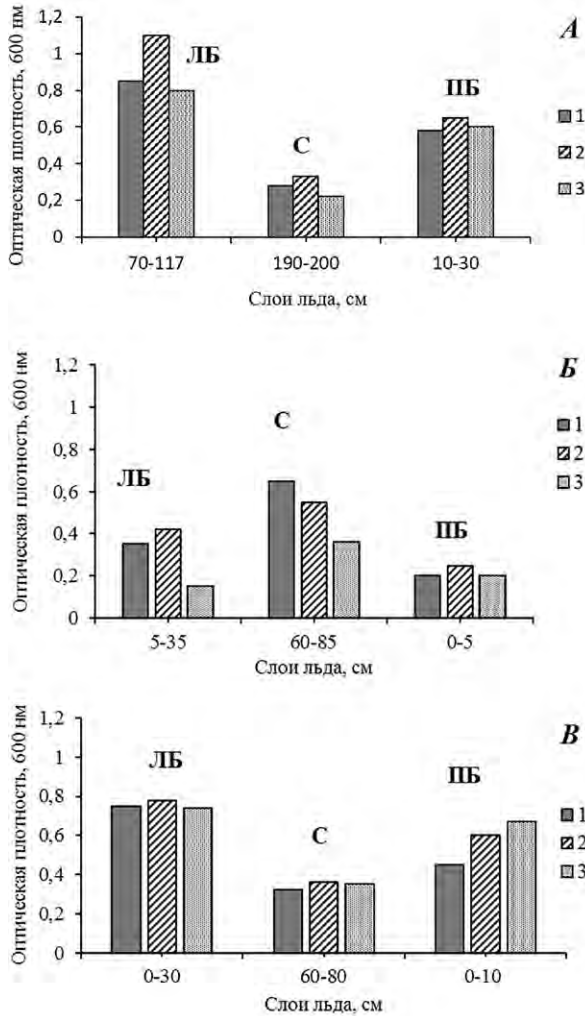


Рис. 4. Влияние ртути на активность роста сульфатредуцирующих бактерий изо льда р. Амур (А), Пемзенской (Б) и Амурской (В) проток: 1 – лактат (контроль); 2 – лактат+0,0005 мг/л Hg²⁺; 3 – лактат+0,001 мг/л Hg²⁺. ЛБ – левый берег, С – середина, ПБ – правый берег

лорода, нейтральная или слабокислая среда, присутствие ртути и высокая численность КГБ и СРБ во льдах являются основными предпосылками формирования условий для процессов метилирования ртути во льдах.

Заключение

Таким образом, сульфатредуцирующие бактерии, участвуя в биогеохимических процессах трансформации органических веществ, способствуя миграции токсичных элементов по трофическим цепям за счет изменения их биодоступности, играют важную роль в качестве биоиндикаторов экологического состояния р. Амур. Их численность, активность и устойчивость к ионам тяжелых металлов можно рекомендовать в качестве показателей при прогнозировании образования сероводородных зон и метилирования ртути в речных экосистемах в летнее время и период ледостава.

Стимулирование роста СРБ при концентрации ртути 0,0005 и 0,001 мг/л зарегистрировано в поверхностном слое льда (0–10 см) из керна, отобранного у правого берега Амурской протоки (рис. 4В). 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. В исследуемых слоях льда, отобранных у левого берега и на середине Амурской протоки, зарегистрирована высокая устойчивость СРБ к широкому диапазону концентраций ртути 0,0005–0,001 мг/л. Причем была отмечена не только устойчивость к использованным концентрациям ртути, но и некоторое стимулирование роста микроорганизмов, по сравнению с контролем.

Проведенные исследования показали, что в зимний период в качестве фактора риска для экосистемы р. Амур может выступать лед с высоким содержанием растительного детрита. В таких слоях льда резко увеличивается численность СРБ. Высокое содержание ОВ, с преобладанием гуминовых кислот, дефицит кислорода, нейтральная или слабокислая среда, присутствие ртути и высокая численность КГБ и СРБ во льдах являются основными предпосылками формирования условий для процессов метилирования ртути во льдах.

Литература

- Андреева Д.В. 2015. Микробиологические исследования процесса сульфатредукции в р. Амур // Вода: химия и экология. № 8 (86). С. 3–10.
- Горленко В.М., Дубинина Г.А., Кузнецов С.И. 1977. Экология водных микроорганизмов. М.: Наука. 289 с.
- Государственный доклад о состоянии и об охране окружающей среды Хабаровского края в 2008 г. 2009. Хабаровск: Типография «Принт Сити». 228 с.
- Иванов А.В. 1998. Криогенная метаморфизация химического состава природных льдов, замерзающих и талых вод. Хабаровск, Владивосток: Дальнаука, 164 с.
- Ким В.И., Шамов В.В. 2000. Характеристика твердого стока Среднего Амура // Геолого-геохимические исследования на Дальнем Востоке. Вып. 10. Владивосток: Дальнаука. С. 186–191.
- Кондратьева Л.М. 2005. Экологический риск загрязнения водных экосистем. Владивосток: Дальнаука. 299 с.
- Кондратьева Л.М. 2010. Геоэкологические исследования речного льда // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. № 6. С. 511–520.
- Кондратьева Л.М., Шунькова Н.Н., Андреева Д.В. 2010. Особенности трансформации органических веществ в донных отложениях реки Амур // Фундаментальные проблемы воды и водных ресурсов: Материалы 3-ей всеросс. конф. с междунар. участием. Барнаул: Изд-во АРТ. С. 146–149.
- Кондратьева Л.М., Андреева Д.В., Голубева Е.М. 2013. Влияние крупных притоков на биогеохимические процессы в реке Амур // География и природные ресурсы. № 2. С. 36–43.
- Кондратьева Л.М., Андреева Д.В., Голубева Е.М. 2018. Факторы, влияющие на процессы сульфатредукции и метилирования ртути во льдах реки Амур // Лед и снег. 2018. Т. 58. № 1. С. 105–116.
- Леонов А.В., Чичерина О.В. 2008. Сульфатредукция в природных водоемах. 1. Влияние факторов среды и измеренные скорости процесса // Водные ресурсы. Т. 35, № 4. С. 438–455.
- Махинов А.Н., Ким В.И., Шмигирилов С.А. 2017. Строение льда и ледового покрова реки Амур в нижнем течении на участках разветвленного русла // Водные ресурсы. Т. 44, № 4. С. 432–441.
- Методы общей бактериологии. 1983. Под ред. Герхардта Ф., Мюррея Р., Костилоу Р., Нестер Е., Вуд В., Крейг Н., Филиппс Г.Т. 1. М.: Мир. 536 с.
- Соколова Е.А. 2010. Влияние температуры на развитие сульфатредуцирующих бактерий в экспериментальных и полевых условиях в зимний период // Сибирский экологический журнал. № 6. С. 865–869.
- Титова К.В., Кокрятская Н.М., Жибарева Т.А. 2017. Процесс сульфатредукции в пресноводных озерах (Белое, Нижнее, Святое) Коношского района Архангельской области // Вестник Московского гос. областного ун-та. Серия: Естественные науки. № 4. С. 123–134.
- Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. 2012. Пространственная и сезонная изменчивость химического состава воды Среднего Амура // Водное хозяйство России. № 5. С. 18–28.
- Muzyer G., Stams A. 2008. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria // Nature reviews microbiology. V. 6. P. 441–454.
- Petrus A., Rutner C., Liu S., Wang Y., Wiatrowski H. 2015. Mercury reduction and methyl mercury degradation by the soil bacterium *Xanthobacter autotrophicus* Py2 // Applied and Environmental Microbiology. V. 81(22). P. 7833–7838.
- Pikuta E.V., Hoover R.B., Bej A.K., Marsic D., Whitman W.B., Cleland D., Krader P. 2003. *Desulfonatronum thiodismutans* sp. nov., a novel alkaliphilic, sulfate-reducing bacterium capable of lithoautotrophic growth // Int. Syst. Evol. Microbiol. V. 53, N5. P. 1327–1332.
- Podar M., Gilmour C.C., Brandt C.C., Soren A., Brown S.D., Crable B.R., Palumbo A.V., Somenahally A.C., Elias D.A. 2015. Global prevalence and distribution of genes and microorganisms involved in mercury methylation // Science Advances. V. 1, N9. P. 1–12.
- Roh Y., Gao H., Vali H., Kennedy D.W., Yang Z.K., Gao W., Dohnalkova A.C., Stapleton R.D., Moon J.-W., Phelps T.J., Fredrickson J.K., Zhou J. 2006. Metal reduction and iron biomineralization by a psychrotolerant Fe(III)-reducing bacterium, *Shewanella* sp. Strain PV-4 // Applied and Environmental Microbiology. V. 72, N5. P. 3236–3244.
- Shao D., Kang Y., Wu S., Wong H. 2012. Effects of sulfate reducing bacteria and sulfate concentrations on mercury methylation in freshwater sediments // Science of the Total Environment. V. 424. P. 331–336.