

На правах рукописи



АНДРЕЕВА Диана Валерьевна

**ИНДИКАЦИОННАЯ РОЛЬ СУЛЬФАТРЕДУЦИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ
В ОЦЕНКЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ РЕКИ АМУР**

Специальность 03.02.08 – Экология
(биологические науки)

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата биологических наук

Владивосток – 2019

Работа выполнена в лаборатории гидрологии и гидрогеологии Федерального государственного бюджетного учреждения науки Институт водных и экологических проблем Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Хабаровск

Научный руководитель: Доктор биологических наук, профессор, заслуженный деятель науки РФ
Кондратьева Любовь Михайловна

Официальные оппоненты: **Дрюккер Валентин Валерьянович**
доктор биологических наук, профессор, ФГБУН Лимнологический институт СО РАН, главный научный сотрудник лаборатории водной микробиологии

Сидоренко Марина Леонидовна
кандидат биологических наук, ФГБУН «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН», ведущий научный сотрудник Сектора почвоведения и экологии почв

Ведущая организация: ФГБУН Институт общей и экспериментальной биологии СО РАН, г. Улан-Удэ

Защита состоится «31» октября 2019 г. в 10⁰⁰ часов на заседании диссертационного совета Д 005.003.03 на базе Федерального государственного бюджетного учреждения науки «Федеральный научный центр биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН» по адресу: 690022 г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159.

Факс: (423) 2310-193. E-mail: info@biosoil.ru

Отзывы на автореферат в двух экземплярах с заверенными подписями просим направлять по адресу: 690022 г. Владивосток, пр. 100-летия Владивостока, 159, ученому секретарю диссертационного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в Центральной научной библиотеке ДВО РАН и на сайте «Федерального научного центра биоразнообразия наземной биоты Восточной Азии ДВО РАН»: <http://www.biosoil.ru/>

Автореферат разослан «__» _____ 2019 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат биологических
наук



Елена Михайловна Саенко

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследования. Возрастающая угроза изменения климата, увеличение числа природных опасностей, загрязнение природных вод органическими веществами различного генезиса определяют благополучие функционирования водных экосистем и сохранение их биоразнообразия (Goswami et al., 2006; Qin et al., 2015). 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, 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 Зея, Буря, Сунгари, Уссури). Особое внимание уделяется трансграничному поступлению разнообразных поллютантов с территории Китая (Иванова, 2004; Кондратьева и др., 2010; Кондратьева и др., 2013; Кот, 1999; Шестеркин, Шестеркина, 2012).

Вовлечение органических веществ в биогеохимические процессы, происходящие при евтрофировании водных экосистем, сопровождается активным потреблением кислорода и процессом сульфатредукции в придонных слоях воды, донных отложениях и толще льда (Иванов, 1998; Кондратьева, 2002; Леонов, Чичерина, 2008; Соколова, 2010; Muzyer, Stams 2008; Pikuta et al., 2003). В результате активизации процессов сульфатредукции ухудшается санитарно-экологическая обстановка за счет образования сероводородных зон на отдельных участках реки, что оказывает негативное влияние на жизнедеятельность гидробионтов, приводя к массовой гибели рыб (Титова и др., 2017). 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, для прогнозирования формирования локальных сероводородных зон и метилирования ртути в периоды открытого русла и ледостава.

Цель исследования: определить особенности функционирования сульфатредуцирующих бактерий в основных компонентах водной экосистемы (вода, донные отложения, лед) и показать их индикаторную роль в оценке экологического состояния реки Амур.

Задачи:

1. Оценить роль сульфатредуцирующих бактерий в формировании сероводородных зон на разных участках р. Амур в летний период.
2. Установить резистентность бентосных сульфатредуцирующих бактерий к тяжелым металлам (ртуть, свинец, кадмий) в зоне влияния крупных притоков (реки Зея, Буря, Сунгари, Уссури).
3. Выявить особенности динамики численности сульфатредуцирующих бактерий при изменении гидрологического режима в период наводнения на р. Амур.
4. Оценить влияние органических веществ на пространственное распределение сульфатредуцирующих бактерий во льдах р. Амур.
5. Определить резистентность сульфатредуцирующих бактерий к ртутному загрязнению в период ледостава.

Защищаемые положения:

1. Высокая численность и активность сульфатредуцирующих бактерий в р. Амур определяется влиянием комплекса экологических факторов: условия местообитания, гидрологический режим, состав органических веществ, поступающих со стоком крупных притоков (реки Зея, Буря, Сунгари, Уссури).

2. Хроническое ртутное загрязнение р. Амур в период ледостава, устойчивость сульфатредуцирующих бактерий к ионам ртути, присутствие растительного детрита,

содержащего органические вещества с метил радикалами – служат факторами риска образования в толще льда более токсичной метилртути.

Научная новизна. Для выявления риска образования сероводорода в зонах аккумуляции взвешенных веществ с высоким содержанием органических соединений впервые предложен метод расчета коэффициента риска $R(H_2S)$, который позволяет определить направленность ведущих биогеохимических процессов в трансформации и деструкции органических веществ в контактной зоне вода–дно при участии сульфатредуцирующих и аммонифицирующих бактерий. Впервые исследована пространственно-временная динамика распределения сульфатредуцирующих бактерий во льдах р. Амур, отражающая содержание в них органических веществ. Обоснованы предпосылки для метилирования ртути в донных отложениях и льдах р. Амур. Показано, что существуют пролонгированные риски поступления метилртути в прибрежные акватории Дальневосточных морей во время весеннего ледохода.

Практическая значимость. Сульфатредуцирующие бактерии из воды, донных отложений и льда предлагаются в качестве биоиндикаторов экологического состояния р. Амур. Численность и активность сульфатредуцирующих бактерий рекомендуется использовать для прогнозирования формирования локальных сероводородных зон; оценки загрязнения компонентов экосистемы р. Амур тяжелыми металлами и риска метилирования ртути; контроля периодичности технологических сбросов из Зейского и Бурейского водохранилищ – поставщиков детрита. Результаты исследований вошли в научные отчеты по темам «Современные экологические риски, последствия и прогноз природных и антропогенных преобразований экосистем бассейна Амура (российская часть) в условиях глобального изменения климата», № гос. регистрации 01201253486 и «Природные опасности и антропогенные преобразования экосистем муссонных областей Северо-Восточной Азии», № гос. регистрации 115040910002.

Апробация работы. Основные результаты исследований представлены и обсуждены на Всероссийских и международных научных конференциях: «Экология и безопасность жизнедеятельности города: проблемы и решения» (Хабаровск, 2009; 2014; 2016); Дальневосточная весна-2010 (Комсомольск-на-Амуре, 2010); «Чтения памяти профессора Владимира Яковлевича Леванидова» (Владивосток, 2011; 2014; 2017; 2019), «Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем» (Санкт-Петербург, 2011); 4th International Multidisciplinary Conference on Hydrology and Ecology (HydroEco'2013) (Rennes, France, 2013); 3rd Biohydrology conference «Water for life» (Landau / Pfalz, Germany, 2013); 4-ый Байкальский микробиологический симпозиум с международным участием «Микроорганизмы и вирусы в водных экосистемах» (Иркутск, 2015); «Регионы нового освоения: современное состояние природных комплексов и вопросы их охраны» (Хабаровск, 2015; 2017); «Водные и экологические проблемы, преобразование экосистем в условиях глобального изменения климата» (Хабаровск, 2014; 2016; 2018); «Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии» (Барнаул, 2017); 12th International Symposium on Ecohydraulics (ISE 2018, Tokyo, Japan), а также на региональных конференциях аспирантов и молодых ученых в 2011, 2013-2018 гг.

Публикации. По теме диссертации опубликованы 33 печатных работы, из них 4 статьи в рецензируемых журналах, рекомендуемых ВАК (в том числе две – в журналах, индексируемых в международных базах цитирования Web of Science и Scopus).

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, обзора литературы (глава 1), описания объектов и методов исследования (глава 2), трех глав собственных исследований (главы 3, 4, 5), выводов, списка цитируемой литературы, включающего 245 наименований, из которых 127 на русском, 118 на английском языках. Работа представлена на 133 страницах, включая текст, 19 таблиц и 26 рисунков.

Личный вклад. Диссертант принимал непосредственное участие в экспедиционных работах, проведении экспериментов, обработке и обобщении результатов

исследования, материалов научных конференций и публикаций, подготовке иллюстрационного материала и формулировке выводов диссертации.

Благодарности. Автор выражает искреннюю признательность за постоянную помощь, внимание и поддержку при выполнении работы научному руководителю – профессору, д.б.н. Л. М. Кондратьевой. Автор благодарен заведующему лабораторией гидрологии и гидрогеологии ИВЭП ДВО РАН к.г.н. В.И. Киму, д.г.н. А.Н. Махинову и всем коллегам за помощь в отборе проб воды, донных отложений и льда, а также за внимание, ценные советы и обсуждения. Автор благодарит сотрудников Хабаровского инновационно-аналитического центра (ИТИГ ДВО РАН) Е.М. Голубеву и А.В. Штареву за определение содержания ртути в воде, донных отложениях и льдах.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

ГЛАВА 1. ОБЗОР ЛИТЕРАТУРЫ

В первой главе представлен обзор зарубежной и отечественной литературы по истории открытия и изучения сульфатредуцирующих бактерий из различных экологических ниш, их филогенетическое разнообразие. Рассмотрено экологическое значение процесса сульфатредукции для водных экосистем.

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Река Амур является одной из 10 крупнейших рек мира (Гидрологическая изученность, 1966). Среди российских рек Амур занимает третье место по длине и четвертое по площади водосбора и водности. Река Амур относится к трансграничной водной экосистеме, бассейн которой расположен на территории четырех государств: РФ (1002 тыс. км²), КНР (820 тыс. км²), МНР (32 тыс. км²) и КНДР (менее 5 км²) (Бакланов, Ганзей, 2008).

На двух крупных левобережных притоках р. Амур на российской территории сооружены гидроэлектростанции: с 1975 г. работает Зейская ГЭС, в 2003 г. началась эксплуатация Бурейской ГЭС. С 28 марта 2017 года началось заполнение Нижне-Бурейского водохранилища. В долине Нижнего Амура русло реки подвергается наиболее сильному антропогенному воздействию особенно вблизи городов Хабаровск, Комсомольск-на-Амуре и Амурск. В их окрестностях построены мосты через Амур, производится разработка русловых месторождений песка и установлены мощные водозаборы. В бассейне р. Сунгари, самого крупного притока Амура, введен в строй комплекс гидротехнических сооружений, включающий в себя водохранилища различного назначения (Фынманское, Пайшаньское и др.) (Бакланов, Ганзей, 2008), построены целлюлозно-бумажные, химические и нефтеперерабатывающие предприятия, освоены заболоченные земли равнины Саньцзян. Это способствует поступлению в р. Амур значительных количеств органических веществ различного происхождения (Кондратьева, 2007; Рапопорт, Кондратьева, 2008) и ионов биогенных элементов (Шестеркин, Шестеркина, 2009; 2017).

Интенсивное развитие промышленности и сельскохозяйственное освоение территорий в бассейне р. Амур оказывают влияние на формирование стока, прохождение паводков и качество воды в р. Амур (Факторы ..., 2008).

В качестве объектов исследования были использованы микробные комплексы из различных местообитаний: вода, лед и донные отложения (ДО), которые были отобраны на разных участках р. Амур в зоне влияния крупных притоков Зея, Буря, Сунгари, Усури и в районе городов Хабаровск, Амурск и Комсомольск-на-Амуре (рис. 1).



Рис. 1. Карта-схема отбора проб воды, донных отложений и льда в 2008-2014 гг.

Экспериментальные исследования проводили на базе лаборатории гидрологии и гидрогеологии ИВЭП ДВО РАН. Использовали стандартные методы культивирования микроорганизмов на твердых (агаризованных) и жидких питательных средах (Намсараев и др., 2006). Для оценки влияния органических веществ различного происхождения на численность и активность сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) была проведена серия экспериментов с легкодоступными субстратами – пептон, глюкоза, лактат, ацетат. Культивирование сульфатредуцирующих бактерий проводили методом глубинного посева на среде Морриса (Горленко и др., 1977; Методы..., 1983). Общую численность культивируемых гетеротрофных бактерий (КГБ) определяли на рыбо-пептонном агаре, разбавленном в 10 раз (РПА:10). Активность роста микроорганизмов (накопление биомассы) определяли фотометрическим методом по изменению оптической плотности (ОП) культуральной жидкости на КФК-3-01 при длине волны 600 нм (Metris et al., 2006). Все эксперименты проводили в трехкратной повторности. Определение концентрации сероводорода в воде проводили спектрофотометрически (РД 52.24.450-2010). Суммарное содержание растворенных ОВ в водной фазе определяли при 254 нм (РОВ) (Thomas, Burgess, 2007), содержание ароматических соединений (АОВ) измеряли при 275 нм (Pretsch et al., 2009) и выражали в единицах абсорбции (ед. абс.).

Пробы воды, донных отложений и льда исследовали на содержание токсичных элементов (ртуть, свинец, кадмий) в Центре коллективного пользования при Институте тектоники и геофизики им. Ю.А. Косыгина ДВО РАН на масс-спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP MS) фирмы «Perkin Elmer» (США) методом Total Quant.

При экспериментальном моделировании устойчивости сульфатредуцирующих бактерий к токсичным элементам были использованы ионы тяжелых металлов следующих концентраций: Cd^{2+} – 0,001 и 0,002 мг/л; Pb^{2+} – 1,0 и 3,0 г/л; Hg^{+} – 0,0005 и 0,001 мг/л. Выбор концентраций тяжелых металлов был обусловлен спецификой загрязнения воды и донных отложений р. Амур и ландшафтными особенностями территории водосбора (Кондратьева и др., 2006; Кот, 1999).

В результате экспериментальных исследований проанализировано 84 пробы воды, 136 проб донных отложений и 110 проб льда, выполнено более 750 микробиологических и более 500 спектрофотометрических определений.

Статистическую обработку данных осуществляли с помощью пакета программ STATISTICA 6.0. Результаты представлены в виде средних значений со стандартным отклонением ($M \pm SD$) при уровне значимости $p \leq 0,05$. Корреляционный анализ был проведен с использованием функции КОРРЕЛ в Microsoft Excel 2010, коэффициенты корреляции рассчитывали по формуле:

$$r_{xy} = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \times (y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \times \sum(y_i - \bar{y})^2}},$$

где x и y являются средними значениями выборок двух массивов данных.

ГЛАВА 3. ОСОБЕННОСТИ РАСПРЕДЕЛЕНИЯ СУЛЬФАТРЕДУЦИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ В ВОДЕ РЕКИ АМУР

Численность сульфатредуцирующих бактерий в 2012 году

В октябре 2012 года были отобраны пробы поверхностной и придонной воды в р. Амур в районе г. Хабаровска. Для биоиндикации восстановительных условий и прогнозирования потенциального экологического риска образования сероводородных зон в р. Амур были определены численность КГБ и СРБ, а также суммарное содержание растворенных ОВ и сероводорода.

В пробах воды, отобранных в районе железнодорожного моста (ж/д), максимальная численность КГБ и СРБ зарегистрирована у правого и левого берегов (табл. 1), где генезис распространяющихся органических веществ различный. У правого берега распространяется сток крупных притоков (реки Усури и Сунгари) и происходит сброс хозяйственно-бытовых сточных вод предприятиями г. Хабаровска. Вдоль левого берега регистрируется влияние сбросов воды из Зейского и Бурейского водохранилищ, которые выступают в качестве поставщиков большого количества растворенных гуминовых веществ и детрита растительного происхождения.

Таблица 1

Численность различных физиологических групп микроорганизмов, содержание H_2S и растворенных ОВ в р. Амур в районе г. Хабаровска

Место отбора проб		Численность микроорганизмов, 10^2 КОЕ/мл		Содержание H_2S , мг/дм ³	РОВ, единицы абсорбции
		КГБ	СРБ		
Р. Амур в районе г. Хабаровска					
Правый берег	поверхностные воды	827,7±30,1	140±18	Не обн.	0,304
	придонные воды	606,7±21,1	332,4±72	0,013	0,411
Середина	поверхностные воды	711,7±30,4	123,3±12,5	Не обн.	0,306
	придонные воды	628,3±17,5	278,6±17,3	0,009	0,350
Левый берег	поверхностные воды	725±28,0	154,8±12,0	Не обн.	0,390
	придонные воды	513,3±25,1	322,7±15,6	0,015	0,419
Р. Амур в районе ж/д моста г. Хабаровска					
Правый берег	поверхностные воды	895,2±73,7	240±12	Не обн.	0,322
	придонные воды	621±28,5	373,2±86,2	0,019	0,441
Середина	поверхностные воды	768,5±22,6	187,3±52,7	Не обн.	0,304
	придонные воды	535,2±43,7	363,6±48,2	0,010	0,470
Левый берег	поверхностные воды	971±58,2	225,2±54,0	Не обн.	0,356
	придонные воды	764,5±62,6	356,2±68,7	0,021	0,461

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

Численность сульфатредуцирующих бактерий в реке Амур в период наводнения 2013 года

Микробиологические исследования, проведенные в период катастрофического наводнения 2013 года на р. Амур показали закономерную связь между численностью микробных сообществ и гидрологическим режимом. Во время наводнения в результате поступления органических веществ 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. Было зарегистрировано увеличение численности культивируемых гетеротрофных и сульфатредуцирующих бактерий на середине реки и у правого берега (рис. 2).

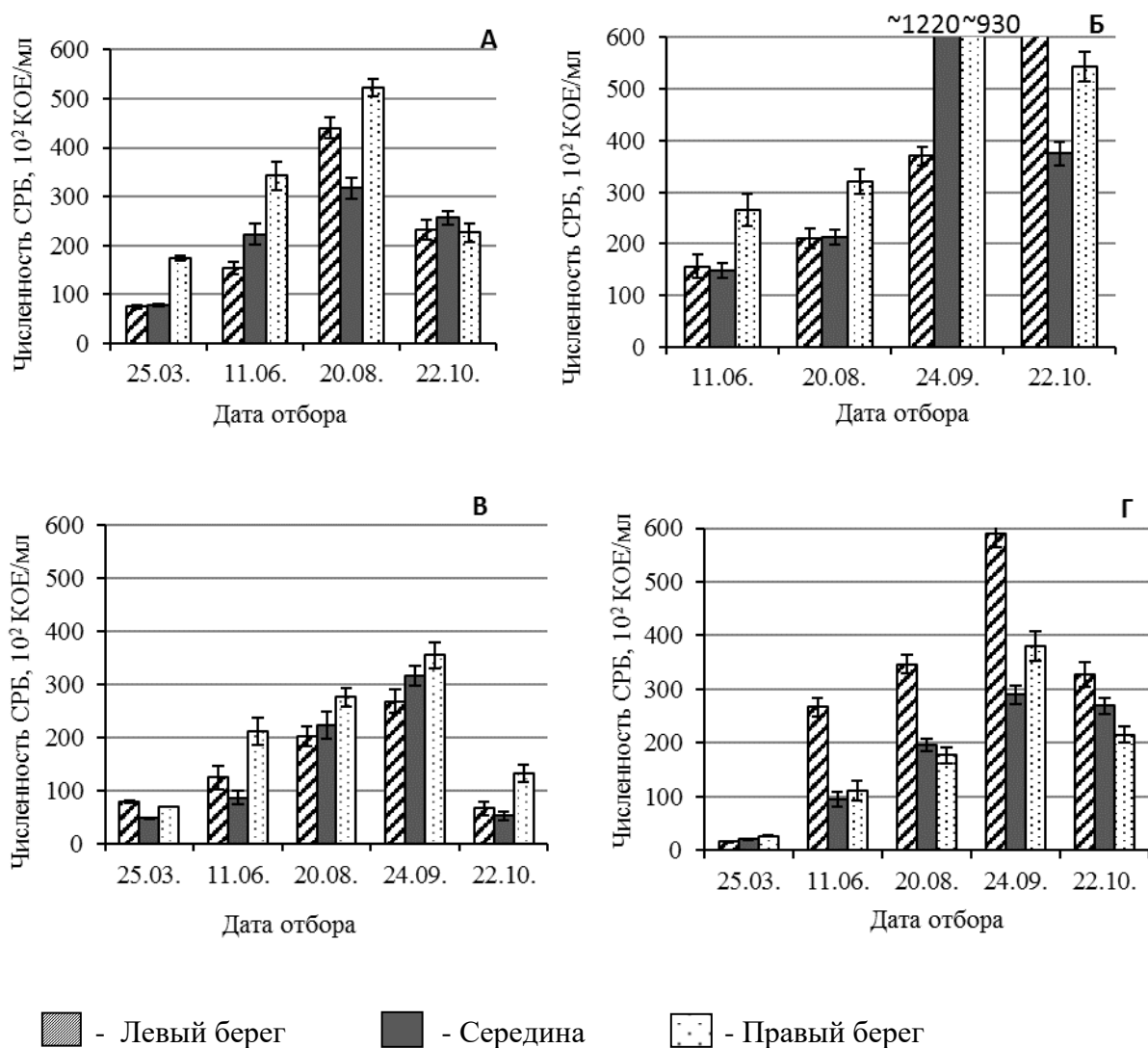


Рис. 2. Численность сульфатредуцирующих бактерий в воде в период наводнения 2013 года: А – р. Амур р-н г. Хабаровска; Б – р. Амур, ниже ж/д моста; В – Амурская протока; Г – Пемзенская протока.

На спаде паводка (сентябрь, октябрь) в основном русле р. Амур и в Пемзенской протоке на фоне максимального содержания РОВ резко увеличивалась численность СРБ (до $600 \cdot 10^2$ КОЕ/мл). В Амурской протоке в зоне влияния р. Уссури численность СРБ была минимальной в течение всего периода наблюдений.

Известно, что на прибрежных участках р. Амур на качество воды влияют разные источники ОВ: вдоль левобережной части распространяются стойкие гуминовые вещества, поступающие при технологических сбросах воды из Зейского и Бурейского водохранилищ, вдоль правобережной части – воды, загрязненные органическими соединениями антропогенного характера, поступающие со стоком рек Сунгари и Уссури.

Сравнительный анализ корреляционных связей между численностью сульфатредуцирующих бактерий, содержанием РОВ и их ароматической составляющей (АОВ) показал, что в 2013 году они существенно изменялись как в различных створах, так и 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 ароматических ОВ, поступающих во время попусков воды с водохранилищ 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. Поэтому, с повышением уровня воды в р. Амур происходило увеличение численности СРБ во всех исследуемых створах за счет активизации процессов микробиологической деструкции ОВ.

Таблица 2

Корреляционная связь между численностью сульфатредуцирующих бактерий и содержанием органических веществ в р. Амур и протоках в 2013 году

СРБ/РОВ					
Место/ Дата	25.03.2013	11.06.2013	20.08.2013	24.09.2013	22.10.2013
р. Амур, р-н г. Хабаровска	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
СРБ/АОВ					
р. Амур, р-н г. Хабаровска	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.

В послепаводковый период 2014 года отмечено увеличение численности СРБ в р. Амур. Максимальная численность планктонных СРБ зарегистрирована у правого и левого берегов р. Амур в районе г. Хабаровска.

ГЛАВА 4. БЕНТОСНЫЕ СУЛЬФАТРЕДУЦИРУЮЩИЕ БАКТЕРИИ ИЗ РАЗЛИЧНЫХ МЕСТООБИТАНИЙ РЕКИ АМУР

Численность и активность сульфатредуцирующих бактерий на Среднем и Нижнем Амуре

В летний период 2009 года были проведены микробиологические исследования донных отложений, отобранных на Среднем Амуре в зоне влияния крупных притоков (реки Зея, Буря, Сунгари). Ниже устья р. Сунгари была зарегистрирована высокая численность СРБ (рис. 3) и максимальная концентрация сероводорода ($0,3 \text{ мг/дм}^3$). Это свидетельствует о том, что на данном участке реки происходит значительное евтрофирование за счет поступления органических веществ и сульфатов с китайской территории (поверхностный сток, промышленные и бытовые сточные воды), приводящие к активизации процессов сульфатредукции.

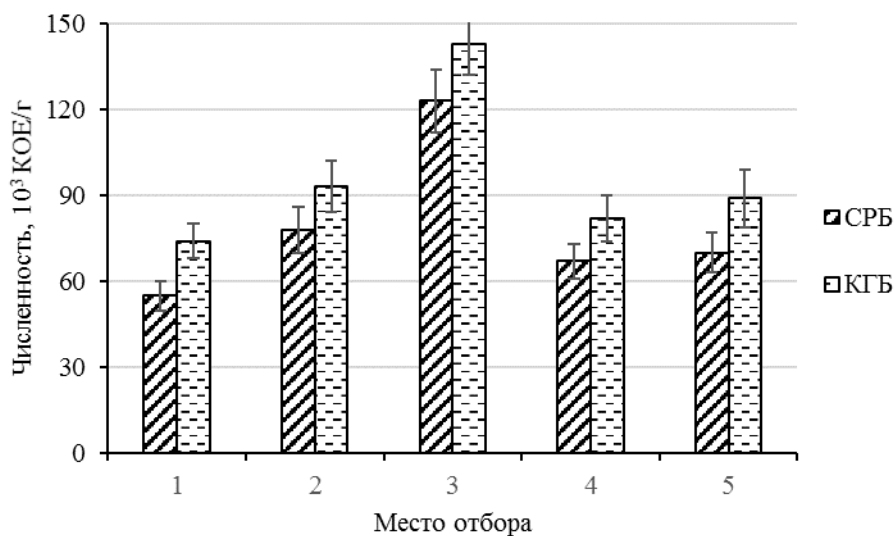


Рис. 3. Численность сульфатредуцирующих и культивируемых гетеротрофных бактерий в донных отложениях, отобранных на Среднем Амуре: 1 – ниже устья р. Зея, 2 – ниже устья р. Буря, 3 – ниже устья р. Сунгари, 4 – 0,5 км выше г. Фуюань, 5 – 0,5 км ниже г. Фуюань.

Для оценки влияния органических веществ различного происхождения на активность бентосных сульфатредуцирующих бактерий 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 показано что, в пресноводных экосистемах преобладают СРБ, потребляющие лактат, менее широко распространены бактерии, метаболизирующие ацетат (Pikuta et al, 2003).

Установлено, что при росте на лактате кальция наибольшей потенциальной активностью обладали бентосные МК из зоны влияния стока р. Сунгари (рис. 4). На 3-е сутки культивирования на этом субстрате во всех пробах наблюдали интенсивное выделение CO_2 . Повышенная активность бактериобентоса из донных отложений, отобранных ниже устьев рек Буря и Сунгари, была отмечена на глюкозе и пептоне. Активная утилизация азотсодержащих органических веществ (пептон) с интенсивным газообразованием происходила при участии микробных комплексов донных отложений, отобранных ниже устья р. Сунгари (рис. 4). Активность бактериобентоса на ацетате натрия на всем исследуемом участке была низкой.

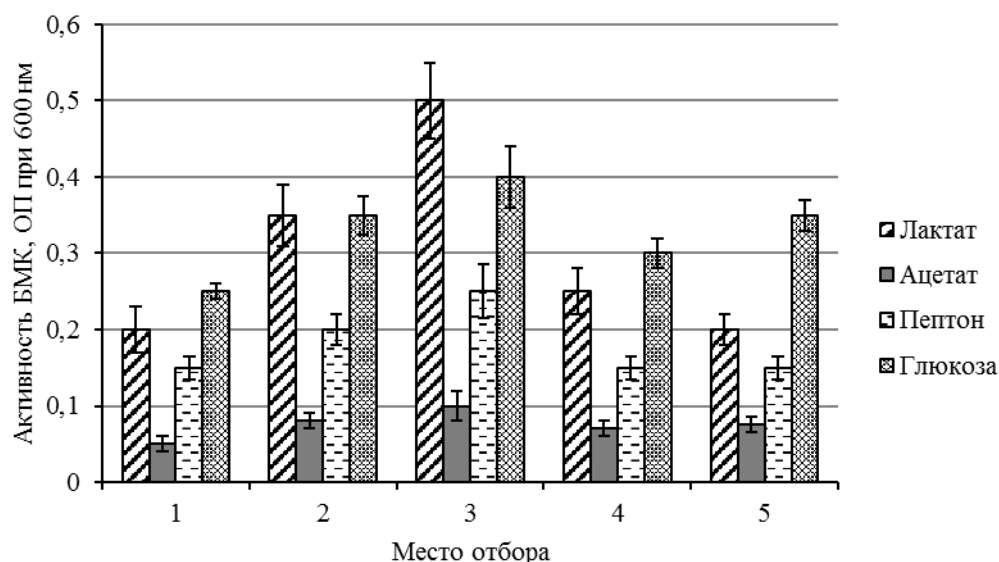


Рис. 4. Активность бентосных микробных комплексов (БМК) при использовании различных источников углерода: 1 – ниже устья р. Зея, 2 – ниже устья р. Буряя, 3 – ниже устья р. Сунгари, 4 – 0,5 км выше г. Фуюань, 5 – 0,5 км ниже г. Фуюань.

В зоне влияния Амурско-Комсомольского урбо-промышленного комплекса установлены существенные различия в численности бентосных СРБ в зависимости от места отбора проб донных отложений. Так, максимальная численность сульфатредуцирующих бактерий ($159 \cdot 10^3$ КОЕ/г) и высокая активность роста на лактате зарегистрирована в ДО с высоким содержанием ОВ, отобранных у правого берега в 0,5 км ниже г. Комсомольск-на-Амуре. Такой эффект обусловлен формированием зон аккумуляции взвешенных наносов вдоль правого берега ниже г. Хабаровска (Ким, Шамов, 2000) и высоким содержанием органических веществ. У левого берега, несмотря на расположенные здесь крупные города (Амурск и Комсомольск-на-Амуре), численность сульфатредуцирующих бактерий была ниже в 2 раза ($84 \cdot 10^3$ КОЕ/г). Известно, что влияние сточных вод, сбрасываемых предприятиями г. Хабаровска, распространяется до г. Комсомольск-на-Амуре. Так, в 2008 г. в р. Амур предприятиями г. Хабаровска и Хабаровского края было сброшено 276,2 млн. м³ сточных вод, из них без очистки и недостаточно очищенных 41,96 и 147,89 млн. м³ соответственно (Государственный ..., 2009).

Для определения экологического риска образования сероводорода в зонах аккумуляции взвешенных веществ с высоким содержанием органических соединений нами предложен специальный коэффициент риска $R(H_2S)$, учитывающий численность двух физиологических групп микроорганизмов (сульфатредуцирующих и аммонифицирующих бактерий), принимающих участие в процессах сульфатредукции и аммонификации:

$$R(H_2S) = N(СРБ)/N(АМБ)$$

Анализ коэффициента риска $R(H_2S)$ на разных участках р. Амур показал существенные различия в его значениях на Среднем и Нижнем Амуре в зависимости от гидрологического режима.

Так, максимальные значения $R(H_2S)$ были зарегистрированы в 2008 г. (период низкой водности) на Нижнем Амуре вдоль правого берега между городами Амурск и Комсомольск-на-Амуре (рис. 5). В этом году 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.

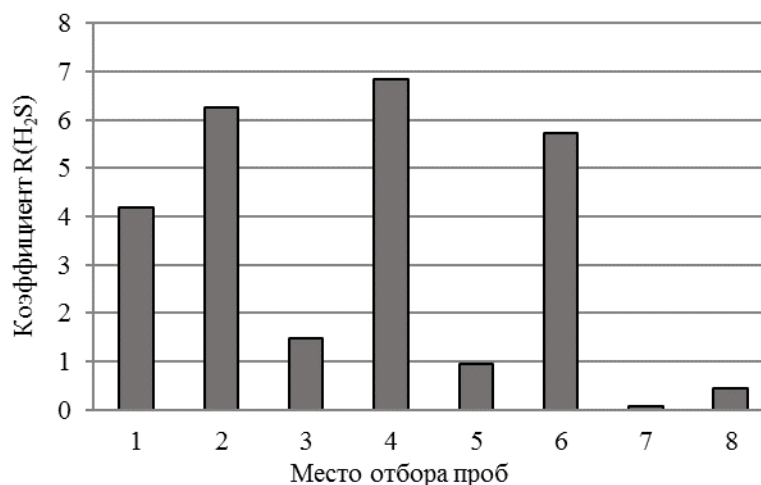


Рис. 5. Изменение коэффициента риска образования сероводородных зон на Нижнем Амуре в 2008 г.: 1,2 – р. Амур, 0,5 км выше г. Амурск, ЛБ, ПБ; 3,4 – р. Амур, 0,5 км ниже г. Амурск, ЛБ, ПБ; 5,6 – р. Амур, 0,5 км выше г. Комсомольск-на-Амуре, ЛБ, ПБ; 7,8 – р. Амур, 0,5 км ниже г. Комсомольск-на-Амуре, ЛБ, ПБ; ЛБ, ПБ – левый и правый берег.

В 2009 г. в результате сильных дождей на реках Хабаровского края наблюдали паводки с подтоплением дорог, линий связи, огородов, полей, сенокосов. Поймы рек были затоплены в течение 50–73 дней на глубину 1,0–1,3 м (Государственный доклад ..., 2010). В этот период на Среднем Амуре были зарегистрированы минимальные значения R(H₂S) (от 0,09 до 0,69).

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 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. Впервые нами были проведены исследования устойчивости бентосных СРБ к этим токсичным веществам (рис. 6).

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 (рис. 6). Это связано с хроническим загрязнением их местообитаний ртутью. 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.

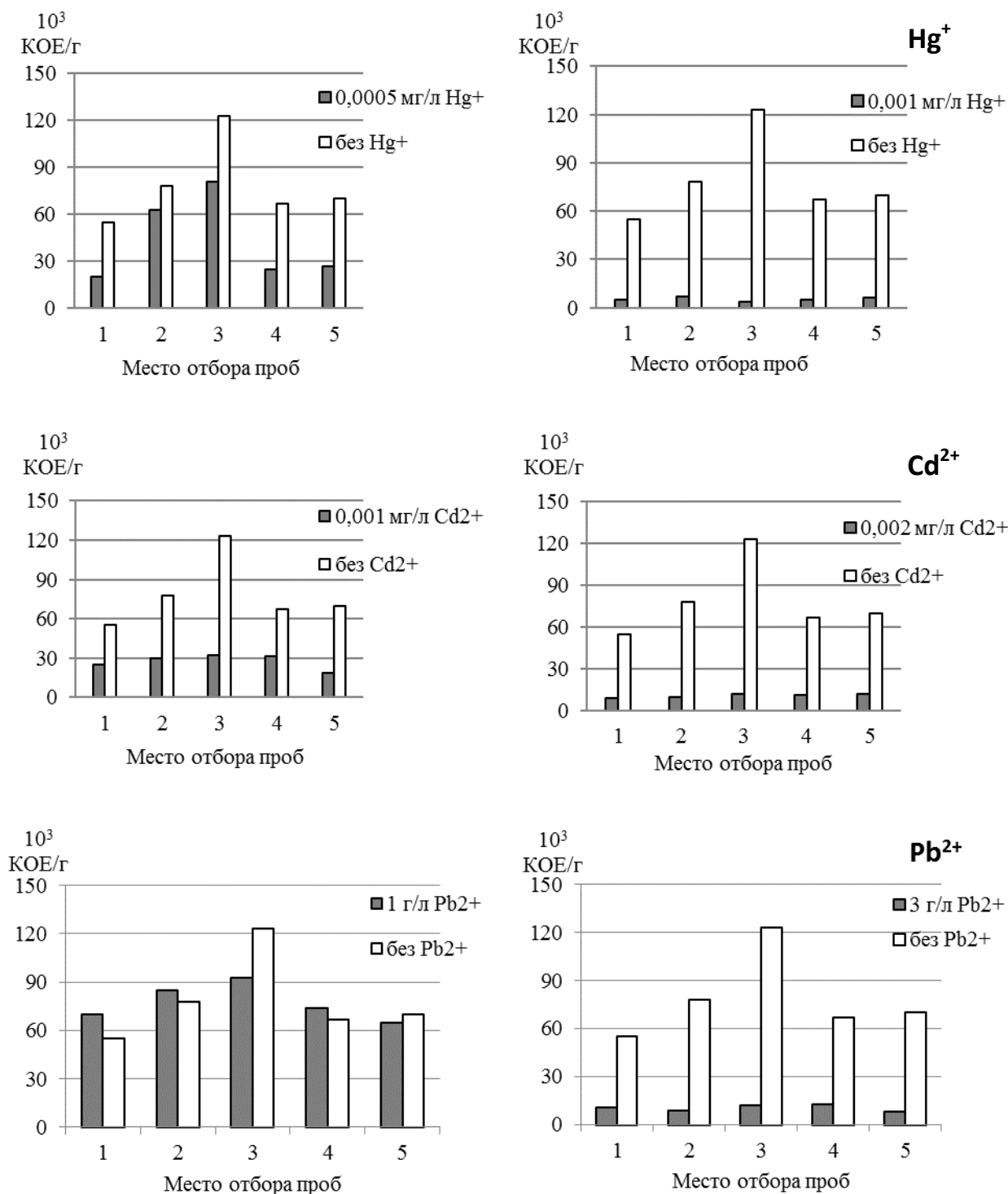


Рис. 6. Влияние ионов ртути, кадмия и свинца на численность бентосных сульфатредуцирующих бактерий из различных местообитаний р. Амур: 1 – ниже устья р. Зeya, 2 – ниже устья р. Бурeya, 3 – ниже устья р. Сунгари, 4 – 0,5 км выше г. Фуюань, 5 – 0,5 км ниже г. Фуюань.

Наиболее адаптированными к присутствию кадмия в концентрации 0,001 мг/л оказались СРБ из донных отложений, отобранных в устьевых зонах рек Зeya и Бурeya. 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) приводит к резкому снижению численности СРБ (рис. 6).

Летом 2014 г. были проведены исследования устойчивости к ртути СРБ из донных отложений, отобранных в районе г. Хабаровска. Наиболее активный рост на лактате в присутствии ртути зарегистрирован у СРБ из донных отложений, отобранных у правого берега р. Амур (рис. 7). В результате исследований на Нижнем Амуре в районе крупных городов установлено максимальное загрязнение ртутью донных отложений, отобранных вдоль правого берега в районе г. Хабаровск (Кондратьева и др., 2013). Эти данные согласуются с более ранними исследованиями (Кондратьева и др., 2010) и свидетельствуют о локальном загрязнении воды и донных отложений ртутью, поступающей со стоком рек Усури, Сунгари и сточными водами г. Хабаровск. Наличие ртути и СРБ в водной среде или донных отложениях является важной предпосылкой для образования более токсичной метилртути.

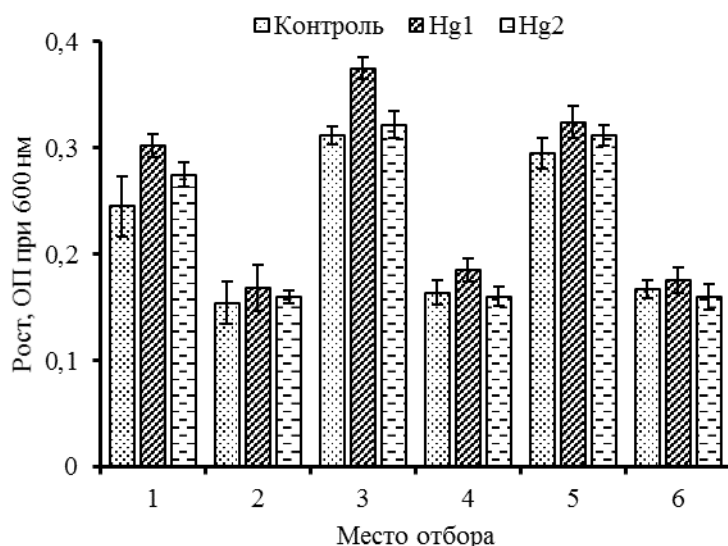


Рис. 7. Влияние ртути (Hg1 – 0,0005, Hg2 – 0,001 мг/л) на рост сульфатредуцирующих бактерий на лактате: 1, 2 – выше г. Хабаровск; 3, 4 – район г. Хабаровск; 5, 6 – ниже г. Хабаровск (нечетные цифры – у правого берега, четные – у левого берега)

Сульфатредуцирующие бактерии, участвуя в биогеохимических процессах трансформации органических веществ, метилировании ртути, способствуют миграции токсичных элементов по трофическим цепям и исполняют важную биоиндикационную роль при прогнозировании образования сероводородных зон на отдельных участках р. Амур.

ГЛАВА 5. ПРОСТРАНСТВЕННОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ СУЛЬФАТРЕДУЦИРУЮЩИХ БАКТЕРИЙ В ПЕРИОД ЛЕДОСТАВА НА АМУРЕ

Многие представления о криогенных процессах существенно изменяются при использовании методов биоиндикации для оценки состояния водных экосистем в зимний период. В настоящей работе в качестве биоиндикаторов антропогенного загрязнения водных масс использовали микробные сообщества – криомикробоценозы. Физиологическая группа сульфатредуцирующих микроорганизмов является индикаторной для регистрации восстановительных условий в толще льда, повышенного содержания легкодоступных ОВ и сульфатов.

Согласно спектрофотометрическим данным в расплавах кернов льда, отобранных по поперечному профилю р. Амур установлено неравномерное распределение растворенных ОВ в разные годы (табл. 3).

Таблица 3

Суммарное содержание растворенных (РОВ) и ароматических органических веществ (АОВ) в разных слоях льда по поперечному профилю р. Амур в 2012-2014 гг.

Место отбора	Слои льда, см	2012 г.		2013 г.		2014 г.	
		254 нм	275 нм	254 нм	275 нм	254 нм	275 нм
80 м от ПБ	0-10	0,09	0,065	0,109	0,095	0,143	0,080
	10-30	0,187	0,124	-	-	0,443	0,401
	30-60	0,134	0,112	0,088	0,076	0,247	0,217
	60-90	0,108	0,073	-	-	0,114	0,099
	110-120	-	-	0,377	0,334	-	-
150 м от ПБ	0-20	0,08	0,053	0,090	0,082	0,123	0,102
	30-40	0,084	0,057	0,099	0,091	-	-
	100-120	0,16	0,125	0,113	0,102	0,117	0,098
	151-161	-	-	0,182	0,157	-	-
	190-200	-	-	-	-	0,127	0,108
272 м от ЛБ	0-40	0,07	0,058	0,110	0,093	0,139	0,114
	40-50	0,145	0,124	-	-	0,156	0,133
	52-70	0,125	0,104	0,092	0,081	0,337	0,313
	70-117	-	-	-	-	0,982	0,880
	117-139	-	-	0,132	0,116	0,200	0,179

Примечание: «-» - отсутствует слой льда.

Так в 2012 году в толще льда в районе г. Хабаровска высокие значения РОВ зарегистрированы у правого берега р. Амур в слое льда 10-30 см. В этом же слое льда установлено повышенное содержание ароматических соединений. Это может быть связано с поступлением ОВ различного генезиса со стоком р. Сунгари в начале формирования ледового покрова. Расплав этого слоя льда был мутным, содержал частицы песка и детрита.

В 2013 году в толще льда в районе г. Хабаровска содержание РОВ существенно изменялось в зависимости от места отбора керна. Максимальное значение содержания РОВ зарегистрировано в нижнем слое 110-120 см из керна льда, отобранного у правого берега р. Амур. Расплав льда этого слоя был мутным, с частицами песка и биопленками. В кернах льда, отобранных на середине реки и у левого берега, содержание ОВ было сопоставимым между собой и со значениями, полученными в 2012 году.

Самые существенные различия послойного распределения ОВ во льдах были установлены в основном русле р. Амур в 2014 году (табл. 3). В первую очередь это связано с катастрофическим наводнением, которое произошло летом 2013 года. В первой декаде ноября 2013 года температура воды в р. Амур составила 3,5°C, что существенно выше средней для этого времени (1,1°C). Повышенная температура воды в осенние месяцы была обусловлена большой водностью реки после медленного спада наводнения. Высокий уровень воды в р. Амур перед ледоставом был причиной позднего начала формирования ледового покрова (Махинов и др., 2017).

В слоях льда, в которых отмечено большое содержание частиц детрита, было зарегистрировано максимальное содержание РОВ и АОВ. Абсолютный максимум

содержания РОВ установлен в слое льда 70-117 см из керна, отобранного в 272 м от левого берега (табл. 3). Это был очень мутный расплав льда, который содержал максимальное количество растительных остатков.

В результате наводнения 2013 года основное русло р. Амур было размыто, его ширина в 2014 году составила 1300 м, тогда как в прошлые годы находилась в пределах 400 м (Махинов и др., 2013). После катастрофического наводнения в марте 2014 года был отобран уникальный керн льда у левого берега из зоны затопленной поймы р. Амур (керн 13). В нижних слоях льда (60-120 см) этого керна зарегистрировано максимальное содержание РОВ, которое полностью отражало пространственное распределение АОВ. Это может быть связано с высокой долей ароматических соединений, аккумулированных во льдах, за счет поступления загрязненных водных масс при зимних сбросах с Зейского и Бурейского водохранилищ.

Кроме того, в основном русле р. Амур в расплавах льда с максимальным содержанием АОВ были выявлены фенолрезистентные бактерии (ФРБ). Такая закономерность была установлена ранее во льдах рек Амур и Сунгари после техногенной аварии в Китае (Кондратьева, Фишер, 2012) при поступлении различных ОВ, в том числе метилированных производных бензола.

Для оценки изменения окислительно-восстановительных условий в период ледостава были проведены микробиологические исследования структуры микробных комплексов во льдах р. Амур. Распределение сульфатредуцирующих микроорганизмов в толще льда *основного русла р. Амур* существенно изменялось по поперечному профилю в зависимости от содержания детрита. В зимний период 2012-2013 гг. повышенная численность СРБ (в пределах 2000 КОЕ/мл) зарегистрирована у берегов в нижних слоях льда. На середине реки отмечали минимальные значения численности СРБ (80 КОЕ/мл) (рис. 8А). У левого берега была установлена высокая численность ФРБ во всех слоях льда. Это связано с поступлением гумифицированных водных масс с Зейского и Бурейского водохранилищ, содержащих большое количество растительных остатков, предшественников фенольных соединений.

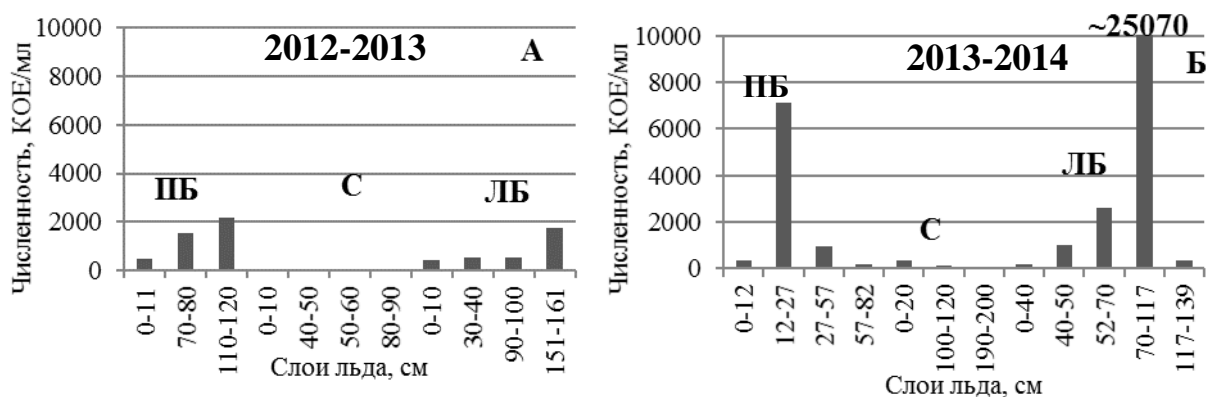


Рис. 8. Численность сульфатредуцирующих бактерий в разных слоях льда по перечному профилю р. Амур в зимние периоды 2012-2013 (А) и 2013-2014 (Б) гг.

В 2013-2014 гг. после катастрофического наводнения в керне льда (12-27 см), отобранном у правого берега, наблюдали увеличение численности СРБ до 7130 КОЕ/мл. В керне льда, отобранном у левого берега в слое льда 70-117 см с высоким содержанием детрита, кроме высокой численности культивируемых гетеротрофных бактерий, зарегистрирована максимальная численность СРБ (25070 КОЕ/мл) (рис. 8Б).

Устойчивость сульфатредуцирующих бактерий к ионам ртути

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. Сульфатредуцирующие бактерии (СРБ) являются ключевыми микроорганизмами, участвующими в процессах метилирования ртути (Кондратьева и др., 2018; Achá et al., 2012; Shao et al., 2012).

Сезонные исследования, выполненные в 2012–2014 гг. Краевым центром экологического мониторинга и прогнозирования чрезвычайных ситуаций Хабаровского края, показали, что в весенний период в воде р. Амур содержание ртути увеличивается до 2–3 ПДК. Особое значение ртутная проблема приобретает из-за трансграничного загрязнения р. Амур водами рек Сунгари и Уссури (Китай), зимних сбросов с водохранилищ и весеннего выноса льдов в прибрежные акватории Дальневосточных морей. В зимний период метилированию ртути в р. Амур могут способствовать лимит кислорода, сброс недостаточно очищенных сточных вод, питание подземными железосодержащими водами и процессы сульфатредукции в донных отложениях.

Исходя из известного положения о том, что процессы микробиологического метилирования ртути зависят от содержания растворенных органических веществ и активности СРБ – потенциальных участников метилирования, для модельных исследований использовали только те слои льда, в которых было зарегистрировано высокое содержание растворенных ОВ. В расплавах льда, в которых присутствовали частицы детрита, поступившие со сбросами водохранилищ, методом хроматомасс-спектрометрии было зарегистрировано максимальное разнообразие веществ, включая соединения растительного генезиса.

Повышенной устойчивостью к ртутному загрязнению обладали СРБ из керна льда, отобранного у правого берега р. Амур в районе г. Хабаровска. У левого берега в слое льда 70-117 см с высокой численностью КГБ и СРБ отмечено стимулирование роста ионами ртути в концентрации 0,0005 мг/л (рис. 9А).

Сульфатредуцирующие бактерии, присутствующие в верхних слоях кернов льда, отобранных у берегов Пемзенской протоки, проявляли устойчивость к концентрации ртути 0,0005 мг/л (рис. 9Б). Рост СРБ из 60-85 см слоя льда (середина протоки) ингибировали обе концентрации ртути (0,0005 и 0,001 мг/л).

Стимулирование роста СРБ из поверхностного слоя льда (0-10 см) керна, отобранного у правого берега Амурской протоки, зарегистрировано при концентрации ртути 0,0005 и 0,001 мг/л (рис. 9В). В исследуемых слоях льда, отобранных у левого берега и на середине Амурской протоки, зарегистрирована устойчивость СРБ к выбранному диапазону концентраций ртути 0,0005-0,001 мг/л (рис. 9В). 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.

Таким образом, в весенний период в качестве фактора риска может выступать лед с высоким содержанием растительного детрита. В отдельных слоях льда может увеличиваться численность СРБ, устойчивых к ионам ртути. Высокое содержание ОВ, с преобладанием гумусовых веществ, дефицит кислорода, нейтральная или слабокислая среда, присутствие ионов ртути и высокая численность микробного сообщества, включая КГБ и СРБ, являются основными предпосылками для формирования условий для процессов метилирования ртути во льдах.

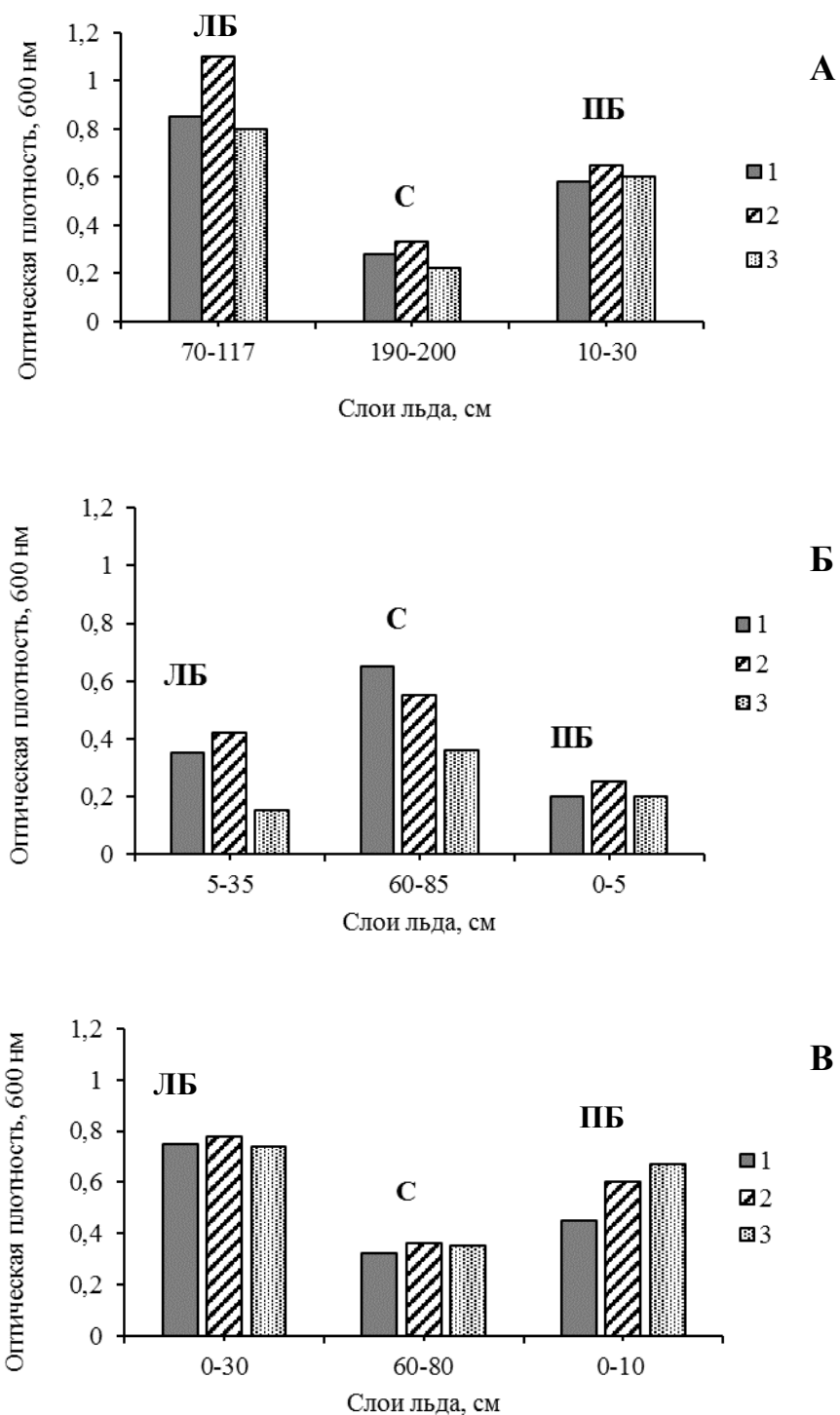


Рис. 9. Влияние ртути на активность роста сульфатредуцирующих бактерий изо льда р. Амур (А), Пемзенской (Б) и Амурской (В) проток: 1 – лактат (контроль); 2 – лактат+0,0005 мг/л Hg²⁺; 3 – лактат+ 0,001 мг/л Hg²⁺.

(ЛБ – левый берег, С – середина, ПБ – правый берег)

ВЫВОДЫ

1. В районе Амурско-Комсомольского урбо-промышленного комплекса существует высокий экологический риск образования сероводородных зон у правого берега р. Амур. Это подтверждается высокой численностью бентосных СРБ – от 125 до $159 \cdot 10^3$ КОЕ/г, высоким содержанием сероводорода в ДО – от 0,15 до 0,32 мг/дм³, максимальными значениями коэффициента риска $R(H_2S)$ – от 4,2 до 6,8 в этом местообитании. По мере увеличения содержания ОВ, сульфатов, численности СРБ и коэффициента риска $R(H_2S)$ можно прогнозировать экстремальные экологические ситуации с интоксикацией водных организмов.

2. Установлено, что индикаторные группы бентосных микроорганизмов, участвующих в цикле серы (СРБ) оказались максимально адаптированы к ртутному загрязнению в 1 ПДК (0,0005 мг/л) в зоне влияния стока р. Сунгари и в районе г. Хабаровска. Бентосные аммонифицирующие и сульфатредуцирующие бактерии из зоны влияния рек Зeya и Буряя проявляли также максимальную устойчивость к ионам кадмия (0,001 мг/л) и свинца (1,0 г/л).

3. Проведенные в 2013-2014 годах микробиологические исследования на р. Амур в районе г. Хабаровска показали, что качество воды существенно изменялось при различном гидрологическом режиме. С повышением уровня воды в р. Амур происходило увеличение численности СРБ во всех исследуемых створах за счет активизации процессов микробиологической деструкции ОВ, входящих в состав затопленных почв и растительных остатков. Микробиологические исследования объясняют особенности распределения органических веществ в районе г. Хабаровска: вдоль левого берега распространяются гумифицированные органические вещества, поступающие при технологических сбросах воды из Зейского и Бурейского водохранилищ, а вдоль правого берега распространяются воды, загрязненные органическими веществами антропогенного характера.

4. Максимальное содержание ОВ и индикаторных групп микроорганизмов (КГБ, СРБ) зарегистрированы во льдах у правого берега в основном русле р. Амур. Это связано с влиянием правобережных притоков (реки Уссури и Сунгари) и сбросом хозяйственно-бытовых сточных вод предприятиями г. Хабаровска. В воде и льдах Пемзенской протоки на протяжении трех лет у левого берега отмечены повышенное содержание ОВ и численности КГБ и СРБ. Это может быть связано со сбросами воды из Зейского и Бурейского водохранилищ, которые выступают в качестве поставщиков большого количества растворенных гуминовых веществ и детрита растительного происхождения. Поэтому здесь в зимний период существует экологический риск образования сероводородных зон, связанный с дефицитом кислорода в подледной воде, наличием органических веществ и активизацией сульфатредуцирующих бактерий. В Амурской протоке в зимние периоды 2012-2014 гг. максимальное содержание ОВ и высокая численность КГБ, СРБ зарегистрированы во льдах, отобранных у берегов.

5. Изучение факторов формирования условий для сульфатредукции и метилирования ртути во льдах реки Амур показали, что ртуть стимулировала рост СРБ на лактате. Этот эффект был характерен для проб льда, отобранных у правого берега в р. Амур в районе г. Хабаровска, где неоднократно регистрировали ртутное загрязнение водной среды и у берегов Амурской протоки, загрязнение которой во многом определяется стоком р. Уссури.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в изданиях, рекомендованных ВАК

1. Кондратьева Л.М. Влияние крупных притоков на биогеохимические процессы в реке Амур / Л.М. Кондратьева, **Д.В. Андреева**, Е.М. Голубева // География и природные ресурсы. – 2013. – №2. – С. 36–43.
2. **Андреева Д.В.** Микробиологические исследования процесса сульфатредукции в р. Амур // Вода: химия и экология. – 2015. – №8 (86). – С. 3–10.
3. **Андреева Д.В.** Сульфатредуцирующие бактерии из различных местообитаний реки Амур // Вестник ДВО РАН. – 2018. – №4. – С. 163–172.
4. Кондратьева Л.М. Факторы, влияющие на процессы сульфатредукции и метилирования ртути во льдах реки Амур / Л.М. Кондратьева, **Д.В. Андреева**, Е.М. Голубева // Лед и снег. – 2018. – Т. 58. – № 1. – С. 105–116.

Работы, опубликованные в материалах международных, всероссийских и региональных конференций

5. Кондратьева Л.М. Биоиндикация загрязнения донных отложений р. Амур органическими веществами / Л.М. Кондратьева, Н.К. Фишер, **Д.В. Дербенцева (Д.В. Андреева)**, Н.Н. Шунькова // Регионы нового освоения: экологические проблемы, пути решения: материалы межрегион. научно-практич. конф., Хабаровск, 10-12 октября 2008 г. – Хабаровск: ДВО РАН, 2008. Т.1. – С. 299–303.
6. **Андреева Д.В.** Особенности сульфатредукции в донных отложениях Среднего и Нижнего Амура // Экология и безопасность водных ресурсов: материалы 2-й междунар. научно-практич. конф., 27-28 ноября 2009 г.; под. ред. Л.Д. Терехова. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2009. – С. 109–112.
7. **Андреева Д.В.** Влияние ионов Cd^{2+} и Pb^{2+} на активность сульфатредуцирующих бактерий Среднего Амура // Биология внутренних вод: тезисы докл. XIV Школы-конф. молодых ученых (Борок, 26-30 октября 2010 г.). – Борок, 2010. – С. 3–4.
8. **Андреева Д.В.** Микробиологические аспекты сульфатредукции в донных отложениях реки Амур // Проблемы экологии: чтения памяти проф. М.М. Кожова: тез. докл. междунар. науч. конф. и междунар. шк. для мол. ученых (Иркутск, 20-25 сентября 2010 г.). – Иркутск: Изд-во Иркут. гос. ун-та, 2010. – С. 349.
9. **Андреева Д.В.** Формирование качества воды в р. Амур в районе г. Комсомольск-на-Амуре // Материалы 10-ой междунар. научно-практич. конф. в области экологии и безопасности жизнедеятельности (г. Комсомольск-на-Амуре, 20-21 мая 2010 г.): И.П. Степанова (отв. ред.), Д.И. Грицкевич (зам. отв. ред) – Комсомольск-на-Амуре: ГОУВПО «КНАГТУ», 2010. – С. 220–224.
10. Кондратьева Л.М. Особенности трансформации органических веществ в донных отложениях реки Амур / Л.М. Кондратьева, Н.Н. Шунькова, **Д.В. Андреева** // 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.
11. **Андреева Д.В.** Экологические факторы, влияющие на процесс сульфатредукции в р. Амур // Молодые ученые – Хабаровскому краю: материалы XIII краевого конкурса молодых ученых и аспирантов, Хабаровск, 14-25 января 2011 г.: в 2 т. – Хабаровск: Изд-во Тихоокеан. гос. ун-та, 2011. – Т.2. – С. 5–9.
12. **Андреева Д.В.** Евтрофирование экосистемы р. Амур как фактор интенсификации процесса сульфатредукции / **Д.В. Андреева**, Л.М. Кондратьева // Биоиндикация в мониторинге пресноводных экосистем: сб. тезю докл. II Междунар. конф. (Санкт-Петербург, 10-14 октября 2011г.) СПб., 2011. С. 16.

13. Кондратьева Л.М. Влияние ионов тяжелых металлов на структуру бактериобентоса из различных местообитаний в реке Амур / Л.М. Кондратьева, Н.Н. Шунькова, **Д.В. Андреева** // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова – Владивосток: Дальнаука, 2011. – Вып. 5. – С.239–246.
14. **Андреева Д.В.** Роль сульфатредукции в формировании качества воды на Среднем Амуре // Актуальные проблемы биологических наук: материалы I межрегион. мол. школы-конф. – Владивосток: «Русский Остров», 2013. – С. 20–25.
15. **Andreeva D.V.** Activity of sulfate-reducing bacteria in the Amur River bottom sediments / **D.V. Andreeva**, L.M. Kondrateva // 3rd BioHydrology Conference «Water for Life». Landau/Pfalz, Germany, 21-24 may 2013. – P. 35.
16. **Andreeva D.V.** Predicting the risk of hydrogen sulfide zones formation at the Amur River transboundary area / **D.V. Andreeva**, L.M. Kondrateva // Proceedings of the 35th IAHR World Congress: The Wise Find Pleasure in Water: Meandering through Water Science and Engineering, September 9-13, 2013, Chengdu, China. V. 8. P. 2838-2843.
17. **Andreeva D.V.** Effect of Heavy Metals on Microbial Processes in the Amur River Sediments / **D.V. Andreeva**, L.M. Kondrateva, O.Yu. Stukova // 4th Int. Multidisciplinary Conf. on Hydrology and Ecology: Emerging Patterns, Breakthroughs and Challenges. Rennes, France, 13-16 may 2013. – P. 131.
18. **Андреева Д.В.** Численность сульфатредуцирующих бактерий в реке Амур в период наводнения 2013 года // Водные и экологические проблемы, преобразование экосистем в условиях глобального изменения климата: всерос. конф., 29 сентября-3 октября 2014 г., Хабаровск: сб. докладов [Электронный ресурс] – Хабаровск, ИВЭП ДВО РАН, 2014. – С. 22–26.
19. **Андреева Д.В.** Микробиологические исследования процессов сульфатредукции в Зейском водохранилище / **Д.В. Андреева**, Л.М. Кондратьева, О.Ю. Стукова // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. – Владивосток: Дальнаука, 2014. – Вып. 6. – С. 32–37.
20. **Андреева Д.В.** Влияние органических веществ на численность сульфатредуцирующих бактерий в реке Амур в период наводнения 2013 года // Микроорганизмы и вирусы в водных экосистемах (7-12 сентября 2015 г.): 4-ый Байкальский Микробиологический Симпозиум с междунар. участием – Иркутск, ЛИ СО РАН, ООО «Издательство «Аспринт», 2015. – С. 248–249.
21. **Андреева Д.В.** Влияние ртути на активность сульфатредуцирующих бактерий в донных отложениях реки Амур // Регионы нового освоения: современное состояние природных комплексов и вопросы их охраны: конф. с междунар. участием, 11-14 октября 2015 г., Хабаровск: сб. материалов. – Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2015. – С. 5–7.
22. Кондратьева Л.М. Микробиологическая индикация ртутного загрязнения реки Амур / Л.М. Кондратьева, **Д.В. Андреева** // Ртуть в биосфере: эколого-геохимические аспекты: сб. тр. Второго междунар. симпозиума – Новосибирск: ИНХ СО РАН, 2015. – С. 196–200.
23. **Andreeva D.V.** Mercury effects on microbial processes in the Amur River bottom sediments // Resources, environmental and regional sustainable development in Northeast Asia. Proceedings of 2nd Int. Conf. (Khabarovsk, October 14-17, 2015). – Vladivostok: Dalnauka, 2015. – P. 5–9.
24. **Андреева Д.В.** Влияние катастрофического наводнения 2013 года на численность сульфатредуцирующих бактерий в подземных водах Амуро-Тунгусского междуречья // Водные и экологические проблемы, преобразование экосистем в условиях глобального изменения климата: VI Дружининские чтения: матер. всерос. конф. с междунар. участием. 28-30 сентября Хабаровск. [Электронный ресурс] – Хабаровск, ИВЭП ДВО РАН, 2016. – С. 13–15.

25. **Андреева Д.В.** Влияние ртути на активность сульфатредуцирующих бактерий из разных слоев льда р. Амур / **Д.В. Андреева**, Л.М. Кондратьева // Экология и безопасность жизнедеятельности города: проблемы и решения: материалы 5-й Всерос. науч.-практ. конф. с междунар. участием, 23-24 августа 2016 г. / под ред. проф. С.А. Кудрявцева, проф. Л.И. Никитиной. – Хабаровск: Изд-во ДВГУПС, 2016. – С. 46–50.
26. **Andreeva D.V.** Mercury effects on the activity of microbiological processes in different layers of ice of the Amur River / **D.V. Andreeva**, L.M. Kondrateva // Resources, Environment and Regional Sustainable Development in Northeast Asia. Proceedings of the III International Conference (Vladivostok, October 10-14, 2016). – Vladivostok: Dalnauka, 2016. – P. 170–172.
27. **Андреева Д.В.** Влияние природных и антропогенных факторов на процесс сульфатредукции в реке Амур // Чтения памяти Владимира Яковлевича Леванидова. – Владивосток: Дальнаука, 2017. – Вып. 7. – С. 24–31.
28. **Андреева Д.В.** Устойчивость бактериобентоса реки Амур к тяжелым металлам // Регионы нового освоения: Естественные сукцессии и антропогенная трансформация природных комплексов (4-7 октября 2017 г.), Хабаровск: сб. материалов. – Хабаровск: ИВЭП ДВО РАН, 2017. – С. 39–42 [Электронный ресурс].
29. Кондратьева Л.М. Микробиологический мониторинг загрязнения воды и льда реки Амур / Л.М. Кондратьева, **Д.В. Андреева** // Мониторинг состояния и загрязнения окружающей среды. Основные результаты и пути развития: тез. докл. всерос. науч. конф. ФГБУ «Институт глобального климата и экологии Росгидромета и РАН». – Москва, 2017. – С. 401–402.
30. Кондратьева Л.М. Комплексная оценка трансграничного загрязнения реки Амур при различном гидрологическом режиме / Л.М. Кондратьева, **Д.В. Андреева**, А.С. Уткина // Водные и экологические проблемы Сибири и Центральной Азии: труды III всерос. науч. конф. с междунар. участием: Барнаул, 2017. – Т.4. – С.40–50.
31. **Андреева Д.В.** Активность сульфатредуцирующих бактерий в реке Амур в летний период 2017 года // Природные опасности, современные экологические риски и устойчивость экосистем: VII Дружининские чтения: материалы всерос. науч. конф. с междунар. участием. 2–5 октября 2018. г. Хабаровск. – Хабаровск, ООО «Омега-Пресс», 2018. – С. 181–184.
32. Кондратьева Л.М., **Андреева Д.В.**, Уткина А.С. Влияние наводнения на содержание органических веществ в реке Амур // Пресноводные экосистемы – современные вызовы: междунар. конф. 10–14 сентября, 2018 / Тезисы докл. и стендовых сообщений / Иркутск: СОО «Мегапринт», 2018. С. 192–193.
33. Golubeva E.M., Kondratyeva L. M., **Andreeva D.V.**, Shtareva A.V. Factors of mercury methylation in the ice of the Amur River // 12th International Symposium on Ecohydraulics (ISE 2018), August 19-24, 2018, Tokyo, Japan / Abstracts & Papers\ISE2018.html / The conference website <http://ise2018.com/> ID 2557428