

**ВЛИЯНИЕ ПРИРОДНЫХ И АНТРОПОГЕННЫХ ФАКТОРОВ
НА ПРОЦЕСС СУЛЬФАТРЕДУКЦИИ В РЕКЕ АМУР**

Д.В. Андреева

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

Обсуждаются результаты микробиологических исследований процесса сульфатредукции в р. Амур на участке от устья р. Зея до г. Комсомольск-на-Амуре. Особое внимание уделяется трансграничному участку, где качество амурской воды формируется под влиянием стока р. Сунгари с территории КНР. Показано, что основными факторами, определяющими высокую численность сульфатредуцирующих бактерий и активность микробных комплексов в воде и донных отложениях, являются гидрологический режим, повышенная концентрация сульфатов, а также органические вещества, поступающие со стоком р. Сунгари.

**INFLUENCE OF NATURAL AND ANTHROPOGENIC FACTORS
ON THE PROCESS OF SULFATREDUCTION IN THE AMUR RIVER**

D.V. Andreeva

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

The results of microbiological research of the sulfatereduction process in the Zeya River mouth to Komsomolsk-on-Amur section of the Amur River are discussed. 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 territory. The paper shows that the main factors determining the high quantity of sulfate-reducing bacteria and activity microbial complex in the water and bottom sediments are hydrological regime, increased concentration of sulfates and organic substances carried with the Songhua flow.

Введение

Бассейн р. Амур охватывает огромную территорию – свыше 1,8 млн. км² и расположен на территории четырех стран – России, Китая, Монголии и КНДР (Бакланов, Ганзей, 2008).

Острота экологических проблем в бассейне р. Амур обусловлена не только сложившейся инфраструктурой промышленного производства, но и влиянием трёх главных притоков (рек Зеи, Буреи и Сунгари) на формирование качества воды Среднего и Нижнего Амура. Роль притоков становится определяющей в летнее время, особенно за счет формирующихся в их бассейнах паводков. В это время основными показателями качества воды выступают изменения pH, увеличение содержания многих химических элементов (Paix et al., 2011), биогенных веществ (Hubbard et al, 2011), различных органических соединений (Lair et al., 2009; Hrdinka et al., 2012), тяжелых металлов, взве-

шенных веществ (Hrdinka et al., 2012). Переносимые в составе взвешенных веществ органические и минеральные компоненты седиментируются в верхних слоях донных отложений, вовлекаясь, таким образом, в биогеохимические процессы, происходящие в контактной зоне «вода–дно». Благодаря ферментативной активности бентосных микробных комплексов (БМК) донные отложения становятся источником поступления в водную среду продуктов трансформации и деструкции органических веществ различного генезиса (Кондратьева, 2005).

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 (Кот, 1999; Иванова, 2004; Кондратьева и др., 2010; Шестеркин, Шестеркина, 2012; Кондратьева и др., 2013). Загрязнение р. Сунгари существенно влияет на качество воды в р. Амур. Взвешенные вещества, выносимые со стоком р. Сунгари, мигрируют по основному руслу Амура и принимают участие в формировании донных отложений, обеспечивая поступление в экосистему органических веществ и различных элементов, в том числе токсичных тяжелых металлов.

Известно, что в донных осадках происходят различные этапы практически всех природных циклов: углерода, азота, фосфора и серы. Завершенность этих циклов и вероятность накопления тех или иных промежуточных продуктов зависит 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, особенно в зимний период. При лимите кислорода в иловых отложениях активизируется процесс сульфатредукции, который является одним из показателей эвтрофирования водных экосистем (Pikuta et al, 2003; Леонов, Чичерина, 2008; Muyzer, Stams 2008; Соколова, 2010).

Сульфатредукция происходит в контактной зоне вода–дно и толще донных осадков при участии сульфатредуцирующих бактерий (СРБ). В результате этого процесса выделяется токсичный для биоты сероводород.

Таким образом, главными предпосылками для активизации процесса сульфатредукции в р. Амур являются повышенные концентрации сульфатов и органических веществ, поступающих со стоком р. Сунгари, в составе неочищенных сточных вод и при регулярных попусках водной массы при контроле уровня воды в водохранилищах. В результате активизации процессов сульфатредукции из-за дефицита кислорода изменяются окислительно-восстановительные условия и ухудшается санитарно-экологическая обстановка на отдельных участках реки.

В работе представлены результаты исследования численности сульфатредуцирующих бактерий и активности бентосных микробных комплексов, участвующих в формировании качества воды Амура в зоне влияния крупных притоков.

Объекты и методы исследования

Во время комплексных экспедиций ИВЭП ДВО РАН в 2007–2013 гг. в зоне влияния крупных притоков (рек Зеи, Буреи, Сунгари) и в районе городов Хабаровска, Амурска и Комсомольска-на-Амуре были отобраны пробы воды и донных осадков (рис. 1). Воду поверхностных и придонных слоев отбирали батометром Молчанова ($V=2$ л), а донные отложения – штанговым дночерпателем Петерсона с захватом слоя 0–15 см.

Численность БМК 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. Для определения чис-



Рис. 1. Карта – схема отбора проб придонных слоев воды и донных отложений в 2007–2013 гг.

ленности СРБ использовали агаризованную среду Морриса (Методы..., 1983). 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 и активность бентосных микробных комплексов в р. Амур в 2007–2008 гг.

Микробиологические исследования донных отложений свидетельствуют о том, что в зоне влияния стока р. Сунгари увеличивается численность СРБ и активность БМК на различных источниках углерода (рис. 2). Максимальная численность СРБ зафиксирована в зоне влияния р. Сунгари, где происходит седиментация основной массы взвешенных веществ, биогенных элементов и органических соединений различного происхождения, поступающих со стоком этой реки. Кроме того, концентрация сульфатов в р. Амур ниже устья р. Сунгари у правого берега в несколько раз выше, чем у левого (Шестеркин, Шестеркина, 2006; Шестеркин, 2016).

Высокая активность БМК по отношению к лактату кальция установлена на всем протяжении от устья р. Сунгари до г. Хабаровска (рис. 2). Менее активными были микробные комплексы (МК) донных отложений, отобранных выше устья р. Сунгари. Сопоставимую активность проявляли МК донных отложений, отобранные ниже устья р. Сунгари и ниже г. Фуюань. Этот факт свидетельствует о том, что выше г. Хабаровск существует еще один источник загрязнения р. Амур органическими веществами, которые могут поступать с коммунальными сточными водами г. Фуюань (Кондратьева, 2005). В связи с интенсивно развивающейся промышленностью и ростом населения в провинции Хейлунцзян коммунальные сточные воды г. Фуюань могут оказывать существенное влияние на эвтрофирование р. Амур и активность БМК.

Активность бактериобентоса на ацетате натрия на всем исследуемом участке была низкой. И это подтверждает известные литературные данные о том, что в пресноводных

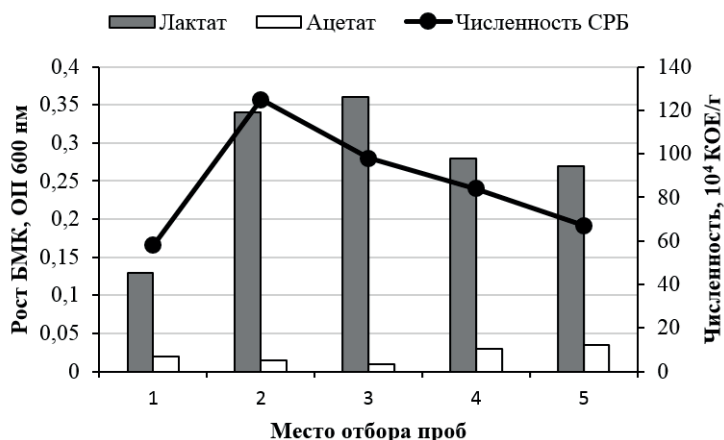


Рис. 2. Численность сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) и активность бентосных микробных комплексов (БМК) из донных отложений, отобранных на Среднем Амуре (август 2007 г.): 1 – 1 км выше устья р. Сунгари; 2 – 1 км ниже устья р. Сунгари; 3 – 0,5 км ниже г. Фуюань; 4 – 0,5 км выше г. Хабаровск; 5 – напротив о-ва Большой Уссурийский.

экосистемах преобладают СРБ, потребляющие лактат, менее широко распространены бактерии, метаболизирующие ацетат (Pikuta et al, 2003).

Летом 2008 года были проведены микробиологические исследования донных отложений, отобранных на участке Амура, подверженном влиянию промышленных стоков городов Амурск и Комсомольск-на-Амуре. Здесь в летний период 2008 г. концентрация сульфатов изменялась от 30,0 до 37,0 мг/дм³ (Реки России, 2011).

Максимальная численность СРБ на обследованном участке была установлена у правого берега и составляла $15,9 \cdot 10^4$ КОЕ/г. У левого берега, несмотря на расположенные здесь крупные города (Амурск и Комсомольск-на-Амуре), численность СРБ была ниже в 2 раза (табл. 1). Такой эффект обусловлен формированием зон аккумуляции взвешенных наносов вдоль правого берега ниже г. Хабаровск (Ким, Шапов, 2000). Существенное влияние на химический состав и характер биогеохимических процессов в донных отложениях оказывают недостаточно очищенные сточные воды г. Хабаровск и паводки, которые часто происходят в бассейне р. Сунгари и определяют динамику распространения взвешенных веществ вдоль правого берега р. Амур.

Кроме численности, была исследована потенциальная активность БМК из донных отложений, отобранных выше и ниже городов Амурск и Комсомольск-на-Амуре. Высокая численность СРБ у правого берега сопровождалась повышенной активностью на лактате кальция (табл. 1), которая была отмечена и на Среднем Амуре.

Во время паводков влияние поверхностного стока с сельскохозяйственных угодий в бассейне р. Сунгари распространяется на длительные расстояния, поэтому у правого берега р. Амур происходит седиментация и аккумуляция органических веществ различного генезиса от разных источников, включая недостаточно очищенные стоки г. Хабаровск (Андреева, 2015).

Численность сульфатредуцирующих бактерий и активность бентосных микробных комплексов в р. Амур во время паводков 2009 и 2013 гг.

К основным факторам, влияющим на активность биогеохимических процессов, относятся гидрологический режим рек и доступность органических веществ (Barton, Hamilton, 2009).

В летнее время влияние притоков на качество воды в р. Амур становится определяющим за счет формирующихся в их бассейнах паводков. Согласно литературным данным, высокие дождевые паводки проходили в июле 2009 г. на участках Верхнего и Среднего Амура (Государственный доклад ..., 2010). В этот период нами были проведены микро-

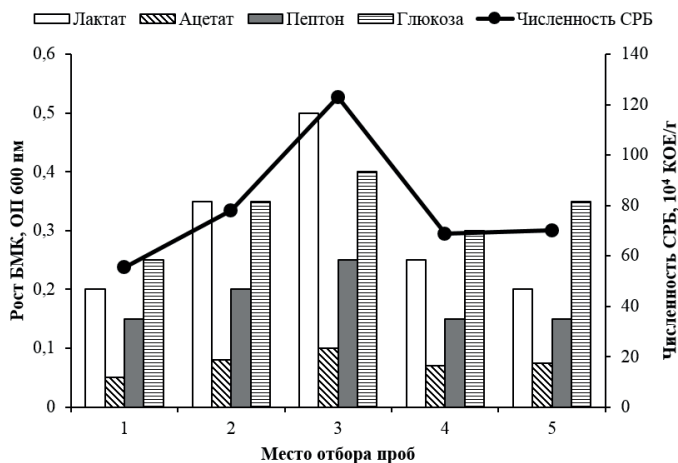


Рис. 3. Численность сульфатредуцирующих бактерий (СРБ) и активность бентосных микробных комплексов (БМК) в донных отложениях, отобранных на Среднем Амуре (июль 2009 г.): 1 – ниже устья р. Зея, 2 – ниже устья р. Буря, 3 – ниже устья р. Сунгари, 4 – 0,5 км выше г. Фуюань, 5 – 0,5 км ниже г. Фуюань.

биологические исследования донных отложений, отобранных на Среднем Амуре, на участке от устья р. Зея до г. Фуюань.

Максимальная численность сульфатредуцирующих бактерий, как и в предыдущие годы, обнаружена ниже устья р. Сунгари (рис. 3). Это еще раз подтвердило интенсификацию процессов сульфатредукции на данном участке в связи с поступлением органических веществ и сульфатов с китайской территории.

По данным В.П. Шестеркина, в 2012–2014 гг. в районе с. Нижнеленин-

ское у левого берега Амура содержание сульфатов изменялось в пределах 2,5–6,6 мг/дм³, у правого берега – от 14,4 до 37,3 мг/дм³. Источником повышенного содержания сульфатов являются сточные воды химических, целлюлозно-бумажных и нефтехимических предприятий, получивших широкое развитие в северо-восточных провинциях Китая (Шестеркин, 2016).

Таблица 1

Характеристика донных отложений Нижнего Амура (август, 2008)

№ п/п	Место отбора		Характеристика донных отложений	Концентрация H ₂ S, мг/дм ³	Численность СРБ, КОЕ/мл	Активность БМК	
						Лактат	Ацетат
1	0,5 км выше г. Амурск	ЛБ	Песок с мелкой галькой желто-коричневого цвета, без запаха	—	42 000	0,15	0,015
2		ПБ	Песчанистый ил коричнево-черного цвета, слабый запах сероводорода	0,15	125 000	0,24	0,01
3	0,5 км ниже г. Амурск	ЛБ	Песчанистый ил темно-коричневого цвета, слабый запах сероводорода	0,09	59 000	0,22	0,03
4		ПБ	Песчанистый ил темно-коричневого цвета, слабый запах сероводорода	0,21	137 000	0,31	0,02
5	0,5 км выше г. Комсомольска-на-Амуре	ЛБ	Илистый песок желто-серого цвета, слабый запах сероводорода	0,11	32 000	0,26	0,02
6		ПБ	Песчанистый ил коричнево-черного цвета, запах сероводорода	0,26	143 000	0,38	0,02
7	0,5 км ниже г. Комсомольска-на-Амуре	ЛБ	Крупный песок с гравием светло-коричневого цвета, без запаха	—	84 000	0,18	0,015
8		ПБ	Песчанистый ил темно-коричневого цвета, запах сероводорода	0,32	159 000	0,40	0,01

В качестве субстратов для определения активности бентосных МК использовали следующие источники углерода: лактат кальция, ацетат натрия, пептон и глюкозу. Эти субстраты быстро вовлекаются в микробиологические процессы сульфатредукции и оказывают существенное влияние на формирование качества воды.

Установлено, что на обследованном участке р. Амур наибольшей потенциальной активностью обладали бентосные МК на лактате кальция, максимум отмечен в зоне влияния стока р. Сунгари (рис. 3). Кроме того, высокая активность бактериобентоса отмечена и при росте на глюкозе в качестве единственного источника углерода. На 3-е сутки эксперимента во всех пробах наблюдалось интенсивное выделение CO_2 . Повышенная активность бентосных микробных комплексов, осуществляющих разложение органических веществ, образующихся из растительных предшественников, была отмечена ниже устья реки Буря. Прежде всего, это может быть связано с поступлением органических веществ различного строения из Бурейского водохранилища, заполнение которого началось в 2002 году.

Активная утилизация азотсодержащих органических веществ с интенсивным газообразованием происходила при участии микробных комплексов донных отложений, отобранных ниже устья р. Сунгари (рис. 3). Этот факт свидетельствует о том, что азотсодержащие органические вещества могут поступать с коммунальными сточными водами городов, расположенными в бассейне р. Сунгари, или с территорий китайских сельскохозяйственных комплексов. Кроме того, деструкция азотсодержащих органических веществ в результате аммонификации и нитрификации в значительной степени определяет поступление в водную среду ионов аммония, нитратов и нитритов.

В период катастрофического наводнения 2013 года были проведены микробиологические исследования численности СРБ в р. Амур в районе Хабаровска.

Установлено, что в июне 2013 г. на начальном этапе формирования наводнения, когда уровень воды в Амуре у г. Хабаровск находился на отметке 402 см, численность СРБ у правого берега в этом районе составляла 342,3 КОЕ/мл. В августе 2013 г., при повышении уровня воды до 673 см, численность СРБ увеличилась в 2 раза. Это свидетельствует о распределении органических веществ различного происхождения вдоль правого берега в районе г. Хабаровск. В сентябре, когда уровень воды понизился до 508 см, зарегистрирована максимальная численность СРБ в р. Амур ниже города на середине и у правого берега (1227,0 КОЕ/мл и 933,0 КОЕ/мл, соответственно). Так как в период наводнения была затоплена не только пойма на глубину 2–3 м, но и местами вода вышла за ее пределы, активно происходили процессы микробиологической деструкции органических веществ, входящих в состав затопленных почв и растительных остатков, поэтому происходило увеличение численности сульфатредуцирующих бактерий. Согласно данным В.П. Шестеркина, в период катастрофического наводнения 2013 г. зарегистрирован максимальный сток сульфатов, который составлял 2700 т/сут (Шестеркин, 2016).

Таким образом, исследования численности сульфатредуцирующих бактерий и активности бентосных микробных комплексов показали, что ниже устья р. Сунгари в придонных слоях воды и донных отложениях р. Амур происходят разнообразные биогеохимические процессы трансформации и деструкции органических веществ различного происхождения. Продукты метаболизма микробных комплексов донных отложений вносят существенный вклад в загрязнение водных масс, что оказывает большое влияние на органолептические показатели и качество воды в районе г. Хабаровска, создавая трудности при водоподготовке.

Заключение

Проведенные исследования свидетельствуют об интенсификации активности сульфатредуцирующих бактерий на трансграничном участке р. Амур в зоне влияния р. Сунгари, что свидетельствует о хроническом поступлении ключевых компонентов сульфатредук-

ции (сульфатов и органических веществ) с ее стоком и их распространении вдоль правого берега на нижерасположенные створы реки.

Исследования, проведенные на р. Амур в районе г. Хабаровск показали, что качество воды существенно изменялось во время катастрофического наводнения 2013 года – установлено неравномерное распределение легкодоступных органических веществ. Микробиологические показатели свидетельствовали о специфике протекания биогеохимических процессов за счет неоднородной численности сульфатредуцирующих бактерий по поперечному профилю реки.

Установлено, что на прибрежных участках Амура в данном районе на качество воды влияют разные источники загрязнения: вдоль левобережной части распространяются гумифицированные органические вещества, поступающие при попусках воды из Зейского и Бурейского водохранилищ, вдоль правобережной части – распространяются воды, загрязненные органическими веществами антропогенного характера, поступающие со стоком р. Сунгари. Следовательно, изучение биогеохимических процессов на разных участках р. Амур в период паводков можно отнести к приоритетным направлениям исследования механизмов формирования качества природных вод в Приамурье.

Литература

- Андреева Д.В. 2015. Микробиологические исследования процесса сульфатредукции в р. Амур // Вода: химия и экология. №8 (86). С. 3–10.
- Бакланов П.Я., Ганзей С.С. 2008. Трансграничные территории: проблемы устойчивого природопользования. Владивосток: Дальнаука. 216 с.
- 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 2009 г. 2010. Хабаровск: ООО «Амурпринт». 258 с.
- Иванова Е.Г. 2004. Опыт совместных российско-китайских исследований рек Амур и Сунгари // Наука и природа Дальнего Востока. № 1. С. 40–42.
- 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., 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 всероссийской конференции с международным 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.
- Кот Ф.С. 1999. Биогеохимия рассеянных металлов в ландшафтах бассейна Нижнего Амура: природный фон и антропогенный фактор // Исследования водных и экологических проблем Приамурья. Владивосток, Хабаровск: Дальнаука. С. 87–90.
- 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.
- Методы общей бактериологии. 1983. Под ред. Герхардта Ф., Мюррея Р., Костилюу Р., Нестер Е., Вуд В., Крейг Н., Филлипс Г. М.: Мир. Т. 1. 536 с.
- Реки России. Часть IV. Реки Дальнего Востока (гидрохимия и гидроэкология). 2011. Ростов-на-Дону: НОК. 324 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.
- Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. 2006. Содержание и сток сульфатов в воде Среднего Амура в зимнюю межень // Биогеохимические и геоэкологические исследования наземных и пресноводных экосистем. Вып. 16. Владивосток: Дальнаука. С. 195–203.
- Шестеркин В.П., Шестеркина Н.М. 2012. Пространственная и сезонная изменчивость химического состава воды Среднего Амура // Водное хозяйство России. №5. С. 18–28.
- Шестеркин В.П. 2016. 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-ой 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. С. 297–301.
- Barton L., Hamilton A. 2009. Sulphate-reducing bacteria: environmental and engineered systems. Cambridge University Press, New York. 533 p.
- Hrdinka T., Novicky O., Hanslik E., Rieder M. 2012. Possible impacts of floods and droughts on water quality // Journal of hydro-environment research. № 6. P. 145–150.

- Hubbard L., Kolpin D.W., Kalkhoff S.J., Robertson D.M. 2011. Nutrient and sediment concentrations and corresponding loads during the historic June 2008 flooding in eastern Iowa // Journal of environmental quality. № 40 (1). P. 166–175.
- Lair G.J., Zehetner F., Fiebig M., Gerzabek M.H., van Gestel C.A., Hein T., Hohensinner S., Hsu P., Jones K.C., Jordan G., Koelmans A.A., Poot A., Slijkerman D.M., Totsche K.U., Bondar-Kunze E., Barth J.A. 2009. How do long-term development and periodical changes of river-floodplain systems affect the fate of contaminants? Results from European rivers // Environmental pollution. № 157(12). P. 3336–3346.
- Muyzer G., Stams A. 2008. The ecology and biotechnology of sulphate-reducing bacteria // Nature reviews microbiology. V. 6. P. 441–454.
- Paix J.M., Lanhai L., Xi C., Varennyam A., Anming B. 2011. Study of impacts of floods on the water quality in an arid zone: the case of the Tarim River in Northwest China // Water science and technology. № 64 (10). P. 1973–1979.
- 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. № 5. P. 1327–1332.