

УДК 616.31:355

БИОТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ АНАЛИЗА ДОННЫХ ОСАДКОВ И ГИДРОХИМИЧЕСКИЙ РЕЖИМ ВОДОТОКА

¹Блинова Е.Г., ^{1,2}Чеснокова М.Г.

¹ФГБОУ ВО «Омский государственный медицинский университет»
Министерства здравоохранения РФ, Омск, e-mail: hygienebeg@yandex.ru;

²ФГБОУ ВО «Омский государственный технический университет»
Министерства науки и высшего образования РФ, Омск

Статья посвящена изучению биотехнологических аспектов анализа донных осадков с учетом факторов в системе: гидрохимический режим водотока – донные осадки в характерные фазы гидрологического режима. Представлены результаты исследований миграции тяжелых металлов, синтетических поверхностно-активных веществ, нефтепродуктов и микробиологических процессов водотока. Антропогенное влияние на водоток проявилось в накоплении тяжелых металлов, синтетических поверхностно-активных веществ, нефтепродуктов, фенолов в донных осадках. В донных отложениях происходят процессы окисления и восстановления, о чем свидетельствует количественная характеристика присутствия сульфатредуцирующих и тионовых бактерий. Представляется актуальным создание микробного консорциума для обеспечения биотехнологического процесса очистки стоков, содержащих тяжелые металлы. Методом регрессионного анализа определена статистически значимая зависимость между увеличением содержания свинца, никеля, нефтепродуктов, синтетических поверхностно-активных веществ в валовых и в подвижных иловых формах донных осадков водотока в различные гидрологические периоды. С помощью кластерного анализа К-средних в формате Statistica 10 проведено оптимальное группирование всего набора переменных на два кластера. Установлено увеличение содержания тяжелых металлов в валовых и подвижных формах донных осадков в фарватере и у правого берега во всех створах водотока характерно в период межени. В процессе эксплуатации р. Иртыш произошли негативные качественные и количественные изменения гидрохимических показателей, что отразилось на химическом составе донных осадков водотока и связано со сбросом недостаточно очищенных сточных вод, содержащих нефтепродукты, фенолы, медь, никель, свинец, олово, ванадий, фосфаты, СПАВ и другие.

Ключевые слова: биотехнологические аспекты, водоток, донные осадки, миграция, тяжёлые металлы, синтетические поверхностно-активные вещества, нефтепродукты

BIOTECHNOLOGICAL ASPECTS OF ANALYSIS OF BOTTOM SEDIMENTS AND A HYDROCHEMICAL MODE OF THE WATER

¹Blinova E.G., ^{1,2}Chesnokova M.G.

¹Omsk State Medical University of the Ministry of Health of the Russian Federation,
Omsk, e-mail: hygienebeg@yandex.ru;

²Omsk State Technical University of the Ministry of Science and Higher Education
of the Russian Federation, Omsk

The article is devoted to the study of biotechnological aspects of bottom sediment analysis, taking into account factors in the system: the hydro chemical regime of the watercourse – bottom sediments in characteristic phases of the hydrological regime. The results of studies of the migration of heavy metals, synthetic surfactants, petroleum products and microbiological processes of a watercourse are presented. The anthropogenic impact on the watercourse was manifested in the accumulation of heavy metals, synthetic surfactants, petroleum products, phenols in bottom sediments. In bottom sediments, oxidation and reduction processes occur, as evidenced by the quantitative characterization of the presence of sulfate-reducing and thionic bacteria. It seems relevant to create a microbial consortium to provide a biotechnological process for the treatment of wastes containing heavy metals. A regression analysis was used to determine a statistically significant relationship between an increase in the content of lead, nickel, oil products, synthetic surfactants in gross and in mobile silt forms of bottom sediments of a watercourse in different hydrological periods. Using cluster analysis of K-means in the Statistica 10 format, the optimal grouping of the entire set of variables into two clusters was carried out. An increase in the content of heavy metals in gross and mobile forms of bottom sediments in the fairway and near the right bank in all sections of the watercourse is characteristic of a low-water period. During the operation of the Irtysh River, negative qualitative and quantitative changes in hydro chemical parameters occurred, which affected the chemical composition of the bottom sediments of the watercourse and was associated with the discharge of insufficiently treated wastewater containing oil products, phenols, copper, nickel, lead, tin, vanadium, phosphates, surfactants and others.

Keywords: biotechnological aspects, watercourse, bottom sediments, migration, heavy metals, synthetic surfactants, petroleum products

Одним из недостаточно изученных факторов, влияющих на гидрохимический режим водотока, являются донные осадки в характерные фазы гидрологического режима. Донные осадки – это комплекс про-

цессов, связанных с аккумулирующими свойствами донных осадков промышленных стоков, содержащих тяжелые металлы, органические вещества. Учет процессов в системе вода – донные осадки и загряз-

нение водотока направлен на изучение источника вторичного загрязнения водотока. Установление особенностей миграции органических и неорганических веществ в системе «водоток – донные осадки» является необходимым условием для контроля над процессом загрязнения водотока. В водной среде химические вещества подвергаются трансформации в зависимости от степени устойчивости веществ, что приводит к изменению их структуры, образованию новых веществ, изменению биологической активности, проявлению отдаленных эффектов [1].

Оценка микробиологических показателей позволяет судить об эффективности самоочищения водоема, так как представители микромира системы выполняют важную роль в удалении растворимых веществ [2]. Процесс биохимического разложения органических веществ в водоеме протекает при участии бактерий, грибов, водорослей, растений. При этом происходит последовательная смена представителей микробиома системы «вода – донные отложения», изменяются качественные и количественные соотношения между различными группами микроорганизмов. При загрязнении водной среды происходит изменение показателя самоочищения, увеличение спектра сапрофитической микрофлоры с преобладанием спорообразующих палочковидных микроорганизмов и уменьшение кокковой бактериальной группы [3]. Скорость естественного самоочищения водной среды определяется количеством и спектром поступающих загрязняющих веществ, скоростью движения водотока, температурой, скоростью потребления кислорода. Донные отложения (осадки) характеризуются высокими сорбционными свойствами и представляют собой бионишу для развития разнообразных представителей микромира. Отмечается преобладание спорообразующих бактерий, происходит селекция бактерий, сбраживающих целлюлозу, пектиновые вещества, метанобразующих бактерий. В трансформации органических веществ важная роль принадлежит микробным сообществам воды и донных осадков. Осуществление микробного метаболизма приводит к расщеплению растворенных и взвешенных органических веществ воды и донных осадков, минерализующихся до минеральных соединений азота, фосфора и серы [4]. Разнообразные сапрофитные бактерии способствуют микробиологическим процессам минерализации органического фосфора в иловых отложениях (осадках) водоемов. Видовой состав и численность доминирующих групп микроорганизмов зависят от

уровня и химической природы антропогенной нагрузки на экосистемы прибрежных территорий.

Донные отложения (осадки) – сложная многокомпонентная система, формирующаяся под воздействием различных процессов, протекающих как в самом водоеме, так и вне него. Большую роль в формировании донных отложений играет микрофлора. В результате микробиологических процессов происходит трансформация грунтообразующего материала. В связи с вышесказанным особый интерес приобретает изучение микрофлоры тонкого слоя донных отложений, непосредственно контактирующего с водной массой и именуемого иногда «поверхностной пленкой» [5, 6]. Большое значение в круговороте серы играют тионовые и сульфатредуцирующие бактерии, широко распространенные в различных водоемах. Сульфатредукторы используют разнообразный спектр субстратов – неорганические вещества – водород, СО и СО₂, органические соединения – пируват, лактат, фумарат, сукцинат, алифатические спирты, аланин, глицин, серии, фенилаланин, глутамат, спирты (метанол, этанол, пропанол, бутанол, изобутанол, пентанол), сахара (глюкоза, фруктоза и др.), жирные кислоты, дикарбоновые кислоты, ароматические соединения. Выделены штаммы сульфатредукторов, способные окислять ароматические соединения – толуол, изомеры ксилола, фенол. Тионовые бактерии представляют наибольший удельный вес микрофлоры активных илов и осуществляют биохимическое окисление сероводорода и других сернистых соединений. Сульфат является конечным продуктом окисления тионовыми бактериями молекулярной серы и различных ее соединений. Тионовые бактерии могут развиваться в нейтральной, щелочной и кислой средах, обладать строгой автотрофностью, а также способностью использовать органические вещества. При высокой концентрации тионовых бактерий происходит накопление сульфатов в результате окисления сероводорода и тиосульфатов. Применение тионовых бактерий, окисляющих сероводород и другие сернистые соединения преимущественно до серы, возможно при проведении очистки воды от сероводорода. Сульфатредукторы участвуют в процессе деструкции органических веществ и продуцировании химической активной сероводорода. При этом процесс минерализации в донных отложениях осуществляется в ходе аэробно-анаэробной микробной сукцессии. В метаболизме конечных продуктов анаэробной деструкции существенную роль выполняют сульфатредуцирующие бактерии, способ-

ствующие увеличению содержания сульфатов и подкислению водоема [7].

Для снижения антропогенного воздействия на природные водотоки возможно использовать сульфатредуцирующие бактерии (СРБ) с целью очистки сточных вод, загрязненных тяжелыми металлами и сульфатами [8].

Превышение концентраций тяжелых металлов в окружающей среде, с учетом аккумуляции в донных осадках и способностью накапливать их живыми организмами, потенциально опасно для гидробионтов [9].

Различают физико-химические, биотехнологические, гигиенические методы оценки продуктов трансформации в системе вода водотока – донные осадки. Исследование донных осадков в водотоке и получение количественной характеристики миграции веществ в системе «водоток – донные осадки» позволяет судить о наличии и отсутствии опасности вторичного загрязнения водотока.

Цель работы: исследование донных осадков в водотоке и получение количественной характеристики миграции веществ в системе «водоток – донные осадки», выявление тионовых и сульфатредуцирующих бактерий в донных осадках для дальнейшего изучения их биотехнологического потенциала.

Материалы и методы исследования

Исследования миграции тяжелых металлов, синтетических поверхностных активных веществ, нефтепродуктов выполнены для р. Иртыш. Отборы проб донных осадков и воды осуществлялись в весенний, летний и осенний периоды. В 30 пробах донных отложений определяли приоритетный ряд тяжелых металлов – Fe, Mn, Cu, Zn, Ni. Отбор проб речной воды и донных отложений на тяжелые металлы, хранение отобранных проб выполняли в соответствии с требованиями ГОСТ 17.1.5.01 – 80 «Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб донных отложений водных объектов для анализа на загрязненность». Для отбора проб донных отложений применяли отборник ГР 86, устройство которого соответствовало требованиям ГОСТ. Для определения элементного состава донных осадков использовали метод спектрального анализа, для определения синтетических поверхностно-активных веществ (СПАВ), фенолов и нефтепродуктов применяли фотоэлектроколориметр АН-1. Работы в области гидрохимических исследований выполнены на базе Омской гидрохимической лаборатории. При определении в донных осадках фенолов, нефтепродуктов и синтетических поверхностно-активных веществ использовали стандартные методики. Для определения тяжелых металлов применен метод спектрального анализа (спектрограф дифракционный ДФС-8, спектрограф SP-2).

В работе проведен микробиологический анализ 53 образцов донных отложений. При установлении количества сульфатредуцирующих бактерий использовали питательную среду Постгейта. Для стандарти-

зации исследований ставили контроль (пробирки со стерильной питательной средой). Для определения количественного содержания тионовых бактерий применяли питательную среду Бейеринка. Количественное содержание выявленных бактерий в донных отложениях выражали в виде колониеобразующих единиц (КОЕ/грамм). Статистическая обработка экспериментальных данных проводилась с помощью ППП «Microsoft Excel», Statistica 10.

Результаты исследования и их обсуждение

Процессы миграции тяжелых металлов, нефтепродуктов, фенолов и СПАВ в различные гидрологические периоды отражены результатами кластерного анализа (рис. 1).

С помощью кластерного анализа К-средних в формате Statistica 10 проведено оптимальное группирование всего набора переменных на два кластера для того, чтобы минимизировать внутрикластерную дисперсию и максимизировать межкластерную. Общее количество итераций равно 50. Установлено увеличение содержания тяжелых металлов в валовых и подвижных формах донных осадков в фарватере и у правого берега во всех створах водотока характерно в период межени. Так, в кластеры (рис. 1, 1, а и 2, б) вошли показатели накопления в донных осадках ванадия, свинца, меди, никеля и олова валовых форм. Для содержания СПАВ, нефтепродуктов, фенолов в валовых формах донных осадков это увеличение нехарактерно. Однако в подвижных формах произошло увеличение концентраций этих веществ. При использовании дисперсионного анализа межгрупповая дисперсия сравнивалась с внутригрупповой дисперсией, в результате установлено, что средние величины для отдельных переменных в разных совокупностях статистически значимо различны: F-критерий Фишера и достигнутый уровень значимости p для двух кластеров пяти переменных: содержание ванадия в донных осадках: $F = 58,77$; $p = 0,0000$; никеля: $F = 50,95$; $p = 0,0000$; меди: $F = 4,91$; $p = 0,035$; нефтепродуктов $F = 6,62$; $p = 0,01$; и фенолов: $F = 4,45$; $p = 0,04$. Результаты кластерного анализа определяют наиболее приоритетные меры снижения антропогенного влияния на донные осадки р. Иртыш.

Органические загрязняющие вещества характеризовались наиболее подвижными формами, и процессы миграции этих веществ оказались наиболее динамичными в связи с выходом этих элементов в воду, при этом аккумуляция достигалась в межень. Сравнение количественных показателей микроэлементов в донных осадках у правого берега и в фарватере показало более высокое содержание их у правого берега.

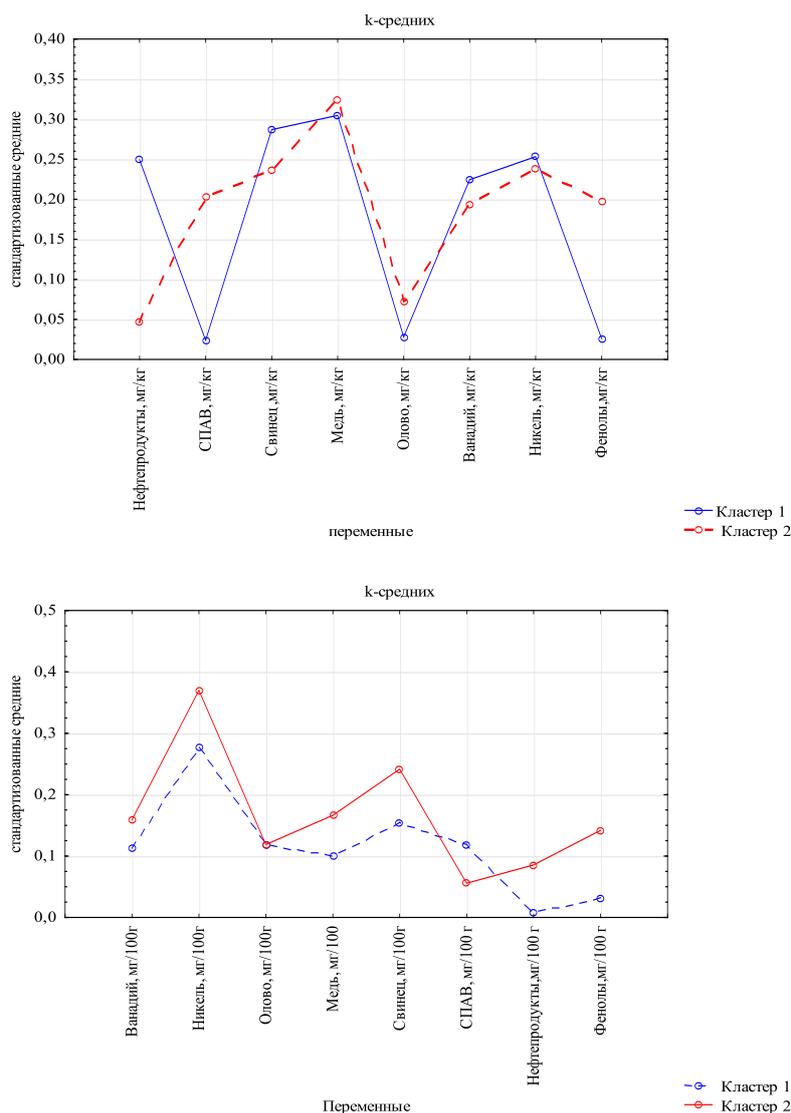


Рис. 1. Результаты кластерного анализа переменных содержания металлов, СПАВ, нефтепродуктов и фенолов валовых (мг/кг) и подвижных (мг/100 г) форм в донных осадках в различные гидрологические периоды

Накопление тяжелых металлов в подвижных и валовых формах донных осадков происходило в период межени, но содержание, СПАВ в донных осадках подвижных и валовых форм, менялось в период паводка и межени. В результате обработки базы данных и регрессионного анализа установлена статистически значимая зависимость между показателями содержания металлов в валовых

и подвижных формах донных осадков. Так валовое содержание никеля и свинца статистически значимо увеличивалось в донных осадках и в подвижных иловых формах в гидрологические периоды от половодья к межени (рис. 2). Используя уравнения регрессии, можно определить значение веществ, которое не будет приводить к накоплению их в валовых осадках водотока

$$(y_1 \text{ валовое содержание никеля} = 28,5 + 0,18 * x_{\text{подвижные формы никеля}} ;$$

$$R = 0,37 \quad R^2 = 0,13, \quad p = 0,05 \quad F(1,28) = 4,3;$$

$$y_2 \text{ валовое содержание свинца} = 12,7 + 0,009 * x_{\text{подвижные формы свинца}} ;$$

$$R = 0,38 \quad R^2 = 0,14, \quad p = 0,04 \quad F(1,28) = 4,6).$$

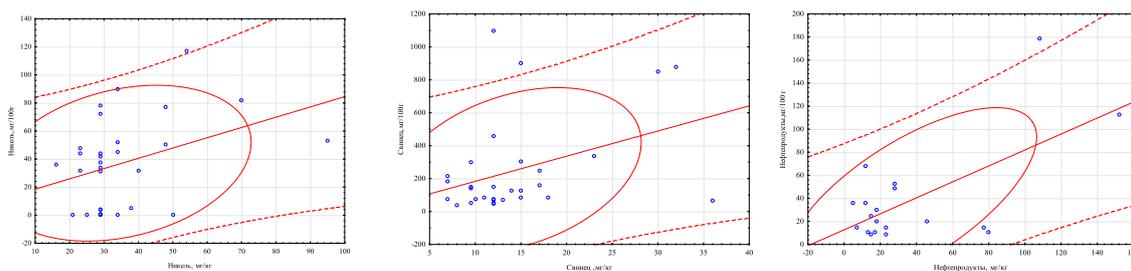


Рис. 2. Зависимость показателей валового содержания и подвижных форм свинца, никеля и нефтепродуктов в периоды половодья и межени

Валовое содержание нефтепродуктов статистически значимо увеличивалось в донных осадках и подвижных иловых формах в гидрологические периоды от половодья к межени (рис. 3). Уравнение регрессии для зависимой переменной валового содержания нефтепродуктов: $y = 15,66 + 0,18 \cdot x$; $R = 0,36$; $R^2 = 0,13$; $p = 0,019$; $F(1, 18) = 6,69$.

Таким образом, в результате регрессионного анализа установлено, что в гидрологические периоды происходят процессы аккумуляции веществ органического и неорганического происхождения в донных осадках подвижных и валовых форм.

В процессе эксплуатации р. Иртыш произошли негативные качественные и количественные изменения гидрохимических показателей. Проведение микробиологических исследований позволило установить, что в пробах воды отмечали присутствие микробных представителей родов *Bacillus*, *Pseudomonas*, *Xanthobacter*, *Micrococcus*. Из проб донных отложений выделены тионовые и сульфатредуцирующие бактерии. Следует отметить, что тионовые бактерии выявляли чаще по сравнению с присутствием сульфатредуцирующих бактерий в исследованных пробах донных отложений. Так, тионовые бактерии выделяли бактериологическим методом в 82,69% случаев, сульфатредуцирующие бактерии устанавливали в 65,38% проб. Изучение количественной микробной характеристики показало, что тионовые бактерии встречались в отобранных образцах в наиболее высокой концентрации в сравнении с сульфатредуцирующими бактериями ($T = 138,500$, $Z = 4,392$, $p = 0,000011$). Исследования показали выявление тионовых бактерий при среднем значении 3,510 log КОЕ/г, медиане – 3,60 log КОЕ/г, процентилю 10.000 – 0,00, процентилю 90.000 – 3,70 log КОЕ/г.

Присутствующие в донных отложениях сульфатредуцирующие бактерии имели следующую микробиологическую характеристику – среднее значение 3,15 log КОЕ/г, медиану – 3,00 log КОЕ/г, процентиль 10.000 – 0,00, процентиль 90.000 – 3,48 log КОЕ/г.

В донных отложениях происходят процессы окисления и восстановления, о чем свидетельствует количественная характеристика присутствия сульфатредуцирующих и тионовых бактерий. Выявление сульфатредуцирующих бактерий свидетельствует о накоплении органических веществ, интенсивном восстановлении сульфатов и накоплении большого количества сульфида двухвалентного железа.

Для практического использования процесса сульфатредукции представляется актуальным выделение микробного сообщества бактерий из среды обитания – донных осадков, загрязненных ионами тяжелых металлов, а также бактериальных штаммов, способных окислять ароматические соединения – толуол, изомеры ксилола, фенол. Важный практический интерес также представляет применение тионовых бактерий, окисляющих сероводород и другие сернистые соединения преимущественно до серы при проведении очистки воды от сероводорода.

Для практического использования процесса сульфатредукции представляется актуальным выделение микробного сообщества бактерий из среды обитания – донных осадков, загрязненных ионами тяжелых металлов, а также бактериальных штаммов, способных окислять ароматические соединения – толуол, изомеры ксилола, фенол. Важный практический интерес также представляет применение тионовых бактерий, окисляющих сероводород и другие сернистые соединения преимущественно до серы при проведении очистки воды от сероводорода.

Выводы

1. В процессе эксплуатации р. Иртыш произошли негативные качественные и количественные изменения гидрохимических показателей, что отразилось на химическом составе донных осадков водотока и связано со сбросом недостаточно очищенных сточных вод, содержащих нефтепродукты, фенолы, медь, никель, кадмий, цинк, хром, фосфаты, железо, СПАВ, смолы и другие.

2. В результате регрессионного анализа установлено, что в гидрологические периоды происходят процессы аккумуляции веществ органического и неорганического происхождения в донных осадках подвижных и валовых форм.

3. Микробиологические исследования показали присутствие бактериальных представителей родов *Bacillus*, *Pseudomonas*,

Xanthobacter, *Micrococcus*. В связи с этим возникает необходимость проведения периодического микробиологического мониторинга водной системы р. Иртыш.

4. Из проб донных отложений бактериологическим методом выделены тионовые и сульфатредуцирующие бактерии, вместе с тем тионовые бактерии выявляли чаще и в более высокой концентрации по сравнению с сульфатредуцирующими бактериями.

Представляется актуальным выделение микробного сообщества бактерий из донных осадков, загрязненных ионами тяжелых металлов, ароматическими соединениями, и создание микробного консорциума для обеспечения на заданном уровне необходимых параметров биотехнологического процесса.

Список литературы

1. Блинова Е.Г. Гигиенический прогноз режима водотока с учетом состава донных осадков и заболеваемости населения на примере реки Иртыша: дис ... канд. мед. наук. Омск, 1993. 198 с.
2. Остроумов С.А. Биотическая регуляция миграции химических элементов: выявление принципов // Экологическая химия. 2011. Т. 20. С. 43–50.
3. Данилова Э.В., Бархутова А.В., Брянская Д.Д., Намсараев З.Б., Намсараев Б.Б. Влияние экологических условий на распределение функциональных групп микроорганизмов в минеральных источниках Хойто-гол (Восточные саяны) // Сибирский экологический журнал. 2009. Т. 16. С. 45–53.
4. Пежева М.Х., Казанчев С.Ч., Гетажева Ж.Х., Жантеголов Дж.В., Казанчева Л.А. Микробиологические процессы деструкции органического фосфора в донных отложениях // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. 2014. № 11 (98). С. 151–155.
5. Chesnokova M.G., Shalay V.V., Kriga A.S., Shaporenko A.P. The flocculants applied in the oil refining plant wastewater treatment Citation: AIP Conference Proceedings 1876. 020017 (2017). DOI: 10.1063/1.4998837.
6. Чеснокова М.Г., Шалай В.В., Шапоренко А.П., Маркелов В.В. Мониторинг показателей очистки сточных вод на блоке биологической очистки нефтеперерабатывающего предприятия в зависимости от уровня концентрации нефтепродуктов // Техника и технология нефтехимического и нефтегазового производства: материалы 8-й международной научно-технической конференции. Омск, 2018. С. 34–36.
7. Брюханов А.Л., Корнеева В.А., Пименов Н.В. Детекция анаэробных сульфатредуцирующих бактерий в кислородсодержащих верхних водных горизонтах Черного и Балтийского морей // Вестник Московского университета. Серия 16. Биология. 2015. № 4. С. 36–40.
8. Франк Ю.А., Лушников С.В. Биотехнологический потенциал сульфатредуцирующих бактерий // Экология и промышленность России. 2006. № 1. С. 10–15.
9. Калинина Е.А., Столь Э.Э. Содержание тяжелых металлов в донных отложениях двух водоемов калининградской области // Естественные и математические науки в современном мире: сб. ст. по матер. XLI междунар. науч.-практ. конф. № 4(39). Новосибирск: СибАК, 2016. С. 155–162.