

УДК 504.064.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4521
Шифр специальности ВАК: 1.6.21

Современные технологии ремедиации загрязненных тяжелыми металлами донных осадков

Е.С. Ушакова, П.А. Белкин[✉]

Пермский государственный национальный исследовательский университет, Россия, г. Пермь

[✉]pashabelkin@mail.ru

Аннотация. *Актуальность* исследования определяется необходимостью своевременного контроля состояния водных бассейнов и предупреждения их катастрофического загрязнения вследствие процессов обращения с донными осадками. *Цель* работы заключается в необходимости обобщения нормативных и опубликованных данных, посвященных проблеме оценки загрязнения донных осадков и применению современных технологий ремедиации отложений, загрязненных тяжелыми металлами. *Результаты и выводы.* В работе показано, что наиболее существенные преобразования состава и свойств донных осадков закономерно происходят в условиях наивысшей нагрузки, характерной для исторически промышленно развитых и урбанизированных регионов. Проведен обзор нормативно-обеспечения работ по оценке и восстановлению загрязненных донных осадков. Подсвечены пробелы в существующей нормативной базе, применяемой в России, связанные с отсутствием требований к безопасным концентрациям токсичных металлов в донных осадках. Проведены систематизация и анализ применяемых технологий по ремедиации донных осадков. К главным направлениям таких работ относится применение физических, физико-химических, химических и биологических методов восстановления и очистки донных осадков. Реализация перечисленных методов производится как в условиях существующего залегания осадков (*in situ*), так и с извлечением массива осадка (*ex situ*). Преимуществом первого варианта является более низкая стоимость производства работ, при этом ремедиация осадков вне водоёма позволяет достичь более высокой степени очистки от тяжелых металлов. Проведенный обзор показал перспективность использования гибридных технологий ремедиации с подбором комплекса методов, отвечающих требованиям к эффективности очистки и экономической целесообразности, а также возможность использования загрязненных осадков для производства товарной продукции.

Ключевые слова: донные отложения, тяжелые металлы, природоохранное законодательство, ремедиация *in-situ* и *ex-situ*, утилизация, вторичная переработка

Благодарности: Исследования проведены в рамках гранта Президента РФ № МК-4377.2022.1.5, а также при финансовой поддержке Минобрнауки РФ, проект FSNF-2020-0021.

Для цитирования: Ушакова Е.С., Белкин П.А. Современные технологии ремедиации загрязненных тяжелыми металлами донных осадков // Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2024. – Т. 335. – № 11. – С. 54–68. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4521

UDC 504.064.4
DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4521

Modern technologies for remediation of bottom sediments contaminated with heavy metals

E.S. Ushakova, P.A. Belkin[✉]

Perm State University, Perm, Russian Federation

[✉]pashabelkin@mail.ru

Abstract. Relevance. The need for timely control of the state of water basins and prevention of their catastrophic pollution due to the processes of handling bottom sediments. **Aim.** To generalize normative and published data devoted to the problem of assessment of bottom sediments pollution and application of modern technologies of remediation of sediments contaminated with heavy metals. **Results and conclusions.** The article shows that the most significant transformations in the composition and properties of bottom sediments naturally occur in the conditions of the highest load, typical for historically industrialized and urbanized regions. The authors have carried out a review of regulatory support for the assessment and remediation of contaminated bottom sediments. The paper highlights the gaps in the existing regulatory framework applied in Russia related to the lack of requirements for safe concentrations of toxic metals in bottom sediments. Systematization and analysis of applied technologies for bottom sediments remediation are carried out. The main directions of such works include application of physical, physico-chemical, chemical and biological methods of bottom sediments remediation and purification. These methods can be implemented either *in situ* or *ex situ*. The advantage of the first option is the lower cost of the works, while the remediation of sediments outside the water body allows achieving a higher degree of purification from heavy metals. The review shown the prospect of using hybrid remediation technologies with the selection of a set of methods that meet the requirements for treatment efficiency and economic feasibility, as well as the possibility of using contaminated sludge for the production of marketable products.

Keywords: bottom sediments, heavy metals, environmental legislation, in-situ and ex-situ remediation, utilization, recycling

Acknowledgments: The research was carried out within the framework of the grant of the President of the Russian Federation no. MK-4377.2022.1.5, and with the financial support of the Ministry of Education and Science of the Russian Federation, project FSNF-2020-0021.

For citation: Ushakova E.S., Belkin P.A. Modern technologies for remediation of bottom sediments contaminated with heavy metals. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2024, vol. 335, no. 11, pp. 54–68. DOI: 10.18799/24131830/2024/11/4521

Введение

Проблема загрязнения донных осадков водных объектов естественного и искусственного происхождения проявляется все отчетливее в силу роста интенсивности хозяйственной деятельности человека. Эта деятельность сопряжена с трансформацией самих водных объектов при создании водохранилищ, ведением строительных и дноуглубительных работ, а также связана с загрязнением водосборных территорий. Исследователи отмечают неуклонное снижение значения комплекса природных условий осадконакопления и наоборот возрастающую роль процессов техноседиментогенеза при формировании состава и свойств донных осадков в пределах промышленно-урбанизированных территорий и акваторий [1].

Наиболее существенные преобразования состава и свойств донных осадков закономерно происходят в условиях наивысшей нагрузки, характерной для исторически промышленно развитых и урбанизированных регионов. Так, реализация технического обслуживания разветвленной системы рек и каналов в г. Санкт-Петербурге связана с необходимостью проведения дноочистных работ, в результате которых ежегодно перемещаются около 150–200 тыс. м³ осадков, загрязненных комплексом тяжелых металлов: Ni, Zn, Cu, Cr, Mn, Cd [2]. Зарубежными исследованиями на примере р. Темзы (Англия), р. Рейн (Нидерланды), р. Одры (Польша) показано влияние паводкового периода на ремобилизацию тяжелых металлов [3–5]. Вместе с экологическими аспектами, загрязнение донных осадков несет в себе и прямой экономический урон. По данным Агентства по

охране окружающей среды США, загрязненные речные отложения наносят ущерб окружающей среде на сумму более 16 миллиардов долларов в год [6]. Кроме того, мероприятия по очистке и рекультивации загрязненных осадков также характеризуются высокой стоимостью. Например, стоимость работ по реализации проекта рекультивации загрязненных донных отложений в Гамильтонской гавани (Канада) составила 139 млн долларов [7].

Одной из актуальных проблем является существенный рост скорости седиментации на зарегулированных реках. На территории Российской Федерации насчитывается порядка 2650 водохранилищ, преимущественно представляющих собой малые искусственные водоемы, созданные для целей орошения, сельскохозяйственного водоснабжения или использования водных ресурсов для нужд предприятий [8]. Вследствие зарегулированности стока в таких водоёмах происходят снижение миграционной способности растворенных веществ и ускорение аккумуляции осадка в чашах водохранилищ [9], что снижает срок службы водохранилищ и уменьшает их объем. Так, исследованиями показано, что в водохранилищах потенциально способны задерживаться 4–5 млрд т наносов в год, что составляет более 53 % от глобального потока наносов в регулируемых бассейнах, или 28 % от массы всех влекомых наносов в реках [10, 11]. С экологической точки зрения необходимо уделять внимание мелким частицам (диаметром <0,5 мм), которые переносятся в виде взвешенных наносов и способны к ремобилизации тяжелых металлов, адсорбированных из пелитовой фракции [11].

Известно, что создание и эксплуатация водохранилищ вызывают ряд негативных последствий, таких как подтопление и затопление территорий (затопление населенных пунктов, затопление ценных земель, повышение влажности на прилегающей территории, увеличение продолжительности туманов, деградация ландшафтов, нарушение нормальных условий нерестилищ рыб и т. д.) [12]. В настоящее время осушение малых водохранилищ в пределах населённых пунктов осуществляется в связи с экономической нецелесообразностью их содержания, а также сопутствующими экологическими проблемами. В связи с этим особый интерес представляют отложения (первичные (реликтовые, сохранившиеся после затопления), трансформированные (затопленные почвы и подстилающие породы) и вторичные (образовавшиеся осадки)), сформированные в период осушения чаш водохранилищ или их обмеления в связи с влиянием климата [13], а также проведения дноуглубительных работ, требующие определения их экологического статуса и возможных вариантов решения о санации донных отложений.

Например, после аварии при добыче водорастворимых руд на одном из рудников Верхнекамского месторождения калийно-магниевых солей, произошедшей в 2006 г., во избежание катастрофических процессов было принято решение о снижении уровня Нижнезырянского водохранилища г. Березники (Пермский край) [14, 15]. В результате частичного спуска водохранилища площадь водной поверхности уменьшилась на 58 %, при этом на дневную поверхность вышли 3,56 км² донных отложений (рис. 1). Исследованиями в [16], проведенными в 2010–2011 гг., было установлено, что микроэлементный состав отложений водохранилища имеет геохимическое сходство с городскими почвами. В частности, была установлена доминирующая роль

никеля в составе депонирующих компонентов среды (почв и осадков). Учитывая, что в аэрогенных потоках на территории доминировали цинк, медь и кадмий, рост концентраций никеля в депонирующих средах может свидетельствовать о едином источнике его поступления, скорее всего связанном с поверхностным стоком с городской территории г. Березники [16]. При этом качество донных отложений характеризуется разным уровнем загрязнения на разных участках водохранилища. Здесь выделены четыре зоны экологической опасности, в том числе около 120 тыс. м³ донных отложений, в соответствии с нормативными документами, подлежат вывозу и утилизации на спецполигонах или захоронению после обязательной дезинфекции [17].

Во избежание необоснованных затрат на ремедиацию отложений, сформированных в чаше водохранилищ и вскрытых после спуска воды, необходим анализ первичной принадлежности и хозяйственной ценности этих отложений, оценка уровня экологической опасности объекта и степени ущерба, причиненного природной среде в результате создания водохранилищ с выбором направления рекультивации осушенной территории (водохозяйственное, рекреационное, природоохранное лесохозяйственное и т. д.) [18].

Исходя из вышеизложенного следует, что экологическая оценка донных отложений актуальна при проведении проектно-изыскательских работ для объектов капитального строительства, а также в случаях осушения или ликвидации водохранилищ, при проведении дноуглубительных работ для поддержания навигационных глубин. Неотъемлемой частью оценки экологического состояния депонирующих компонентов окружающей среды является исследование содержания в них тяжелых металлов.



Рис. 1. Нижнезырянское водохранилище, г. Березники (Пермский край)
Fig. 1. Nizhnezhyrskoye water reservoir, Bereznyki (Perm Krai)



2018 г.

Тяжелые металлы относятся к приоритетным загрязняющим веществам при экологической оценке донных отложений как для экологического обоснования капитального строительства, так и при разработке проектов рекультивации. Доступность и токсичность металлов существенно различается в зависимости от формы их нахождения. В случаях выявления высоких концентраций металлов возникает острая необходимость по восстановлению и удалению токсичных веществ из донных отложений рек, каналов, водохранилищ с использованием современных эффективных и экологических подходов. Для определения выбора подходящей технологии восстановления донных отложений необходим анализ преимуществ и недостатков существующих зарубежных и российских методов.

Целью данной работы является проведение литературного обзора, посвященного рассмотрению современных технологий ремедиации донных отложений, загрязненных тяжелыми металлами.

Правовые аспекты ремедиации донных осадков и оценки экологического состояния донных отложений

Вопрос загрязнения донных осадков наиболее актуален для морских держав с развитой судоходной и портовой инфраструктурой. Ежегодно в Европе вычерпывается более 200 млн м³ донных отложений, половина из которых являются загрязненными и требуют специального управления, обработки или утилизации [19].

Основным руководящим документом в области охраны водных ресурсов в Европейском Союзе является Водная рамочная директива (Water Framework Directive). Наряду с этим всеобъемлющим документом на уровне отдельных стран принимаются адресные программы и инструкции по рекультивации загрязненных территорий и акваторий. Так, в шведском национальном кадастре загрязненных территорий зафиксировано порядка 1160 загрязненных территорий на суше и в море, представляющих очень большой риск для здоровья человека или окружающей среды, в пределах этих территорий выделены 7960 участков, нуждающихся в рекультивации [20]. Наиболее широкий комплекс мер по восстановлению донных отложений как в морской акватории, так и в реках и озерах, включающий в себя планомерные исследования экологического состояния осадков, их классификацию и последующую ремедиацию за счет муниципальных государственных и частных средств, разработан в Норвегии [21].

В Российской Федерации в соответствии с требованиями природоохранного законодательства (рис. 2) объекты, оказывающие негативное влияние на окружающую среду, должны быть поставлены

на государственный учет в федеральный государственный реестр. Обязанность ведения инвентаризации таких объектов, оценка их воздействия на окружающую среду и проведение рекультивации является обязанностью собственника. Оценка уровней загрязнения донных отложений и рассмотрение вариантов их использования, как правило, выполняются в рамках проектных работ для обоснования капитального строительства, где в проектной документации предусмотрены мероприятия по охране окружающей среды.

Статус донных осадков в Водном кодексе РФ закреплён в понятии «донный грунт». Согласно указанному нормативному документу, донный грунт – грунт дна водных объектов, извлеченный при проведении дноуглубительных, гидротехнических работ, строительстве, реконструкции, эксплуатации гидротехнических и иных сооружений, искусственных островов, установок, расположенных на водных объектах, создании и содержании внутренних водных путей Российской Федерации, предотвращении негативного воздействия вод и ликвидации его последствий и в иных случаях, установленных федеральными законами. Согласно настоящему определению, донные отложения следует рассматривать с позиции оценки извлеченного грунта (донного) при проведении работ по капитальному строительству и эксплуатационных мероприятий [22].

На практике процедура и варианты использования извлеченного донного грунта выполняются согласно приказу Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 15 апреля 2020 года N 220 «Порядок использования донного грунта, извлеченного при проведении дноуглубительных и других работ, связанных с изменением дна и берегов водных объектов». Согласно Приказу, дноуглубительные работы осуществляются для поддержания навигационных глубин. При этом авторы отмечают, что с проведением дноуглубительных работ, при канализировании водотоков, может быть связано развитие эрозионных деформаций, изменяющих русло [23].

Одним из наиболее широкоиспользуемых вариантов размещения грунтов при дноуглубительных работах в морских портах является захоронение грунта во внутренних морских водах и в территориальном море в подводные отвалы, которое осуществляется на основании разрешения, выданного Росприроднадзором. По данным Северо-Западного бассейнового филиала ФГУП «Росморпорт», только в морском порту Большой порт Санкт-Петербурга объем изъятых донного грунта при проведении ремонтных дноуглубительных работ в акватории порта составил 102,8 тыс м³ [24].

Федеральный закон от 10.01.2002 N 7-ФЗ "Об охране окружающей среды" /
 Federal Law dated 10.01.2002 N 7-FZ "On Environmental Protection"

<p>✓ Постановление Правительства Российской Федерации от 07.05.2022 № 830 «Об утверждении Правил создания и ведения государственного реестра объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду»/</p> <p>Resolution of the Government of the Russian Federation of 07.05.2022 No. 830</p>	<p>✓ Постановление Правительства Российской Федерации от 31.12.2020 № 2398 «Об утверждении критериев отнесения объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, к объектам I, II, III и IV категорий»/</p> <p>Resolution of the Government of the Russian Federation of 31.12.2020 No. 2398</p>	<p>✓ Постановление Правительства Российской Федерации от 30.06.2021 № 1096 «О федеральном государственном экологическом контроле (надзоре)»/</p> <p>Resolution of the Government of the Russian Federation of 30.06.2021 No. 1096</p>
<p>✓ Приказ Министерства природных ресурсов и экологии Российской Федерации от 12.08.2022 № 532 «Об утверждении формы заявки о постановке объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, на государственный учет, содержащей сведения для внесения в государственный реестр объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, в том числе в форме электронных документов, подписанных усиленной квалифицированной электронной подписью»/</p> <p>Order of the Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation of 12.08.2022 No. 532</p>	<p>✓ Приказ Росприроднадзора от 06.02.2020 № 104 «Об утверждении Административного регламента предоставления государственной услуги по государственному учету объектов, оказывающих негативное воздействие на окружающую среду, подлежащих федеральному государственному экологическому надзору»/</p> <p>Order of the Federal Service for Supervision of Natural Resources Management of 06.02.2020 No. 104</p>	

Рис. 2. *Нормативное обеспечение обращения с объектами негативного воздействия на окружающую среду в РФ*
Fig. 2. *Regulatory support for management of objects of negative environmental impact in the Russian Federation*

Захоронение грунта, извлеченного при проведении дноуглубительных работ, согласно распоряжению Правительства РФ № 27-53-р от 30.12.2015 г., выполняется на основании сравнения средних концентраций веществ на участках дноуглубления и в районе размещения грунтов дноуглубления. Среди тяжелых металлов контролируются ртуть, кадмий, свинец и оловоорганические соединения. В случае отсутствия превышений перечисленных веществ будет произведен дампинг донного грунта без ухудшения качества донных отложений предполагаемого района захоронения.

Данные о возможных вариантах использования извлеченного грунта как на территории России, так и в мировой практике, рассматриваются в рамках проработки раздела проектной документации «Оценка воздействия на окружающую среду» (ОВОС). Вариантами размещения вынутого грунта при проведении дноуглубительных работ можно рассматривать создание искусственных островов

для Гонконгского аэропорта, при расширении порта в г. Роттердаме, в качестве строительного материала для других объектов в Лондоне и т. д.

Несмотря на повышенный интерес к экологическому состоянию донных отложений при оценке уровня загрязнения водных объектов, в настоящее время градостроительными, природоохранными и санитарными нормами на территории Российской Федерации недостаточно разработана система нормирования их состояния, что не позволяет дать обоснованную характеристику уровня их экологического состояния. В настоящее время оценка загрязненности донных отложений осуществляется при организации и проведении наблюдений в рамках мониторинга водных объектов согласно РД 52.24.609-2013 или в рамках инженерно-экологических изысканий для подготовки проектной документации, строительства и реконструкции объектов капитального строительства согласно СП 502.1325800.2021.

В нормативных документах РФ не предусмотрены требования к содержанию загрязняющих веществ в донных грунтах. Однако при обследовании участков работы по оценке уровня загрязнения донных отложений выполняются в соответствии со сводом правил для инженерно-экологических изысканий, являющихся основой для разработки ОВОС. В соответствии с указанными нормативными документами, анализ тяжелых металлов выполняется по следующим элементам: Hg, As, Cu, Zn, Cd, Pb, Ni. С учетом специфики источников загрязнения в пределах водосборной территории перечень металлов может быть скорректирован.

Для оценки экологического состояния донных отложений используется несколько подходов: фоновый (использование значений в фоновом створе или среднее массовой доли каждого определяемого металла для различных типов донных отложений); санитарно-гигиенический (использование ПДК для почв (грунтов) или региональных нормативов); комплексная интегральная оценка (суммарная оценка загрязнения Zc грунтов, извлекаемых со дна) (табл. 1).

Таблица 1. Правовой статус оценки загрязнения донных отложений

Table 1. Legal status of bottom sediment pollution assessment

Нормативные документы, регламентирующие оценку загрязнения тяжелыми металлами донных отложений Normative documents regulating the assessment of heavy metal contamination of bottom sediments		
РД 52.24.609-2013		СП 502.1325800.2021
Перечень приоритетных определяемых тяжелых металлов List of priority heavy metals to be determined (Hg, As, Cu, Zn, Cd, Pb, Cr, Ni)		
Санитарно-гигиенический Sanitary and hygienic	Фоновый Background	Комплексный Integrated
ПДК для почв (СанПиН 1.2.3685-21) и Нормы и критерии для донных отложений (Региональный норматив..., 1996) MPC for soils (SanPiN 1.2.3685-21) and Norms and Criteria for sediments (Regional Norm..., 1996)	Коэффициент загрязнения (РД 52.24.609-2013) Pollution factor (RD 52.24.609-2013)	Суммарная оценка загрязнения Zc Total assessment of pollution with Zc

Любой проект при проведении дноуглубительных работ, связанный с извлечением или перемещением донных отложений, является объектом государственной экологической экспертизы федерального уровня. Для предотвращения негативного воздействия вод и ликвидации его последствий, поддержания надлежащего санитарного состояния водных объектов и благоприятного состояния

окружающей среды существуют два варианта: захоронение грунта в специально отведенных районах дна, которые в соответствии со 16 ст. ФЗ «Об охране окружающей среды», не попадают под плату за негативное воздействие на окружающую среду, или грунты могут быть извлеченными на сушу и в таком случае будут считаться отходами [25].

Существующие технологии ремедиации загрязненных донных отложений

Для понимания специфики формирования загрязнения донных отложений необходим анализ путей поступления тяжелых металлов в пределах водосборной территории бассейна, что впоследствии поможет подобрать эффективную технологию ремедиации. Как правило, в пределах промышленно-урбанизированных территорий именно техногенные источники загрязнения являются доминирующими в поступлении тяжелых металлов в водотоки и их дальнейшем осаждении в толще донных отложений.

Современные подходы к ремедиации загрязненных донных отложений основаны на технологиях очистки загрязненных почв. Выделяют физическую, химическую, биологическую и гибридную ремедиацию, которые включают следующие методы: промывку, электроремедиацию, восстановление, стабилизацию, фитоэкстракцию, биоэкстракцию, фитостабилизацию, иммобилизацию и т. д. (рис. 3). Выбор метода ремедиации донных отложений зависит от большого количества факторов, таких как происхождение и природа загрязнителей, тип и свойства отложений, гранулометрический состав, формы нахождения металлов, содержание органического вещества, а также от себестоимости ремедиационных работ и экологических рисков.

Часто мероприятия по восстановлению или рекультивации затруднены из-за очень высоких финансовых затрат [26]. По данным Европейского агентства по окружающей среде (European Environment Agency – ЕЕА), стоимость проектов по восстановлению обычно составляет от 50000 до 500000 евро, а в случае сильнозагрязненных участков может достигать и до 5 млн [27]. Так, например, стоимость проекта по очистке русла р. Ролфстюн (Швеция) составила 11–13 млн долларов [28].

По месту реализации технологии ремедиации донных осадков подразделяются на применяемые *in situ* и *ex situ* (табл. 2). Следует отметить, что ряд исследователей считает второй подход более эффективным [19, 29–31]. При ремедиации загрязненных донных отложений *in situ* тяжелые металлы зачастую не удаляются из осадка полностью вследствие широкого распространения явлений адсорбции, осаждения и комплексообразования между тяжелыми металлами и осадками [32].

Источники загрязнения/ Sources of pollution

Геологическое строение и состав пород, атмосферное осаждение пыли и частиц, вынос частиц почвы с водосборной территории, добыча полезных ископаемых, промышленность, кислые шахтные воды, сбросы сточных вод, поверхностный сток с урбанизированных территорий/
 Geological structure and rock composition, atmospheric deposition of dust and particles, transport of soil particles from the catchment area, mining, industry, acid mine water, wastewater discharges, surface runoff from urbanized areas

Показатели оценки загрязнения/ Pollution assessment indicators

Изменение фациального состава ДО, тяжелые металлы и металлоиды (Hg, Cd, Pb, Ni, Cu, Zn, Cr, As, Co, Sb, Sn)/ Changes in facies composition of bottom sediments, heavy metals and metalloids (Hg, Cd, Pb, Ni, Cu, Zn, Cr, As, Co, Sb, Sn)

Ремедиация загрязненных донных отложений/ Remediation of contaminated sediments

Технологии очистки (ремедиация)/ Cleaning technologies (remediation)

- ✓ Физическая/Physical
- ✓ Химическая/Chemical
- ✓ Биологическая/Biological
- ✓ Гибридная/Hybrid

Вторичное использование/ Recycling

- ✓ Керамзит/Expanded clay
- ✓ Наполнители/Fillers
- ✓ Вспомогательные материалы для бетона/ Concrete auxiliaries
- ✓ Блоки, тротуарная плитка/ Blocks, paving slabs
- ✓ Пенобетон/Foamed concrete

Рис. 3. Примеры источников загрязнения и технологии ремедиации донных отложений
Fig. 3. Examples of pollution sources and bottom sediment remediation technologies

Таблица 2. Преимущества и недостатки методов ремедиации *in situ* и *ex situ*

Table 2. Advantages and disadvantages of *in situ* and *ex situ* remediation methods

	In situ	Ex situ
Преимущества Advantages	<ul style="list-style-type: none"> • Относительно недорогие/Relatively inexpensive; • Прост в использовании/Easy to use; • Быстрая ремедиация/Rapid; • Не нарушает естественные гидрологические условия Does not disturb natural hydrological conditions; • Сокращение объемов обработки и воздействия на отложения Reduced treatment and impact on deposits; • Низкий уровень повторного взмучивания при перемещении осадка Low re-suspension during sludge handling 	<ul style="list-style-type: none"> • Контроль источника загрязнения Pollution source control; • Процесс ремедиации находится под контролем Remediation is under control; • Высокая эффективность восстановления High recovery efficiency
Недостатки Disadvantages	<ul style="list-style-type: none"> • Отсутствие контроля над процессом/Lack of process control; • Низкая эффективность восстановления по сравнению с <i>ex situ</i> Low recovery efficiency compared to <i>ex situ</i>; • Риск вторичного загрязнения при проведении ремедиации <i>in situ</i> из-за недостаточного снижения общего содержания ТМ Risk of secondary contamination during <i>in situ</i> remediation due to insufficient reduction of total HM content 	<ul style="list-style-type: none"> • Высокая стоимость/High cost; • Нарушение естественных гидрологических условий Disturbance of natural hydrological conditions; • Возможность вторичного загрязнения вследствие изъятия отложения для ремедиации <i>ex-situ</i> Potential for secondary contamination due to removal of sediment for <i>ex situ</i> remediation

Физическая и химическая ремедиация донных отложений

Традиционно выделяют физическую, химическую и физико-химическую ремедиацию донных отложений (табл. 3). Существующие методы очистки донных отложений применимы для большого перечня загрязняющих веществ, при этом не всегда тот или иной метод будет эффективен для удаления любых тяжелых металлов из них. Так, например, *термическая* очистка, основанная на

термической экстракции и витрификации, применима для большинства органических загрязнителей. Однако среди тяжелых металлов только As, Cd и Hg восприимчивы к такому методу восстановления.

Промывка осадка является простым и полезным вариантом восстановления *ex situ*. Она заключается в подборе растворителя для переноса загрязняющих веществ из осадка в водный раствор. Как правило, в качестве растворителя применяют неорга-

нические кислоты (соляная, серная, азотная), органические кислоты (щавелевая, лимонная, аскорбиновая), хелаторы и поверхностно-активные вещества, использование которых имеет высокую эффективность очистки [32]. Промывка не подходит для мелкодисперсных отложений из-за большей площади поверхности, доступной для адсорбции.

Таблица 3. Физические и химические методы ремедиации
Table 3. Physical and chemical methods of remediation

Физические Physical	Физико-химические Physical-chemical	Химические Chemical
<ul style="list-style-type: none"> • Механические Mechanical • Гидродинамические Hydrodynamic • Аэродинамические Aerodynamic • Термические Thermic • Электрические Electric • Магнитные Magnetic • Электромагнитные Electromagnetic 	<ul style="list-style-type: none"> • Коагуляционные Coagulation • Ионнообменные Ion-exchange • Сорбционные Sorption • Экстрагирование или выщелачивание Extraction or leaching 	<ul style="list-style-type: none"> • Осаждение Precipitation • Окисление-восстановление Oxidation-reduction • Замещение Substitution • Комплексообразование Complexation

Использование подхода *стабилизации* применяется *in situ* и *ex situ* при восстановлении донных отложений путем добавления неорганических (кремнекальциевые материалы, железосодержащие, фосфаты, соли алюминия и т. д.), органических (дёрн, навоз) и комплексных реагентов. Этот метод активно используется в дноуглубительных работах. Так, эффект стабилизации Cd в морских и речных отложениях был успешно реализован в Корее и Китае, где для стабилизации донных осадков применялась красная глина, апатит, цеолит, бентонит, апатит, ферригидрит [32].

Наиболее широко распространённым вариантом ремедиации донных отложений при дноуглубительных работах является *экскавация* в рамках физической ремедиации и захоронение грунта на других участках акватории. Результаты оценки затрат [33] показывают, что использование дноуглубительных отложений в качестве строительных материалов для строительства порта является наиболее экономически эффективным вариантом (36 USD/м³). Вторым наименее затратным вариантом является утилизация в море и захоронение на полигоне ТБО (66 USD/м³). Использование электролиза как метода с очень ограниченным опытом применения по извлечению металлов, за счет при-

влечения дорогостоящих материалов и конфигурации электродов, химикатов и т. д., будет являться наиболее экономически эффективным вариантом, расходы которого могут варьироваться от 23,6 до 32,0 USD/м³. В России такой способ возможен в случае отсутствия превышений металлов в извлеченном грунте относительно участка захоронения.

Следует отметить наличие негативного эффекта при механическом перемещении больших объемов грунта. Он проявляется при взмучивании, образовании взвеси из мелких фракций извлеченного грунта при его складировании на целевом участке. В результате оказывается влияние на абиотическую (например, изменения рельефа дна) и биотическую компоненту (уничтожение части придонной биоты) дна [22].

Для борьбы с взмучиванием применяют специализированные покрытия, представляющие собой активную и пассивную изоляцию, с целью перекрытия загрязненных осадков на месте их залегания при переносе грунта в ходе производства дноуглубительных работ. Методы, связанные с использованием покрытий, объединяют понятием «remedial sediment capping», или «кэппинг». Как правило, к пассивному кэппингу относится использование песка, глины, щебня на геотекстиле, а к активному – использование материалов, вступающих в реакцию с тяжелыми металлами отложения, способствуя их деградации *in situ*. В табл. 4 представлены результаты использования активного материала по извлечению тяжелых металлов из донных отложений во всем мире.

Использование многослойной изоляции, состоящей из песчаных (чистый песок, гравий) и сорбирующих материалов (апатит, известь, цеолит), позволяет снизить растворимость, подвижность и скорость переноса тяжелых металлов, за счет физико-химической изоляции и стабилизации отложений [32]. Использование такого варианта кэппинга при низкой стоимости и экологичности процесса имеет ряд недостатков, таких как высокая трудоемкость и сложность поддержания однородности этой многослойной изоляции в условиях расчлененного рельефа русла реки и при сильном течении.

Кроме того, к недостаткам кэппинга можно отнести рост стоимости работ, связанный с необходимостью предварительной подготовки дна, а также нанесение вреда представителям бентосного сообщества при перекрытии осадков. Так, показано, что восстановление некоторых видов бентоса после их перекрытия строительными материалами происходит в течение нескольких лет [20].

Таблица 4. Примеры использования материалов для активного кэппинга in situ

Table 4. Examples of materials used for in situ active capping

Для одного элемента/For one element			Для нескольких элементов/For multiple elements			
Место/Location	Сорбент/Sorbent	TM Metal	Место/Location	Сорбент/Sorbent	TM Metal	
Эстуарий р. Хёнсан, Южная Корея Hyeongsan River estuary, South Korea	Цеолит, активированный уголь, песок Zeolite, activated carbon, sand	Hg	Залив Балтийского моря, Швеция Gulf of the Baltic Sea, Sweden	Al, полонит (силикат кальция) и AC Al, polonite (calcium silicate) and AC	Cd, Zn	
Устьевой пруд на территории бывшего хлорно-щелочного завода, Китай Estuary pond within a former chlor-alkali plant, China	Активированный уголь, бентонит, каолин, монтмориллонит Activated carbon, bentonite, kaolin, montmorillonite		Озеро Кивиярви, Финляндия Lake Kivijärvi, Finland	Гранулы активированного доменного шлака Activated blast furnace slag granules		Fe, Zn, Ni, Cr
р. Саут-Ривер, Вирджиния, США South River in Virginia, USA	Биоуголь из древесины твёрдых пород Biochar from hardwood		Река Маочжоу, Китай Maozhou River, China	CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , цеолит, каолин, FeCl ₂ CaCO ₃ , Ca(OH) ₂ , zeolite, kaolin, FeCl ₂		
Новый район Пудун, Шанхай, Китай Pudong New Area, Shanghai, China	Апатит, смесь апатита и кальцита Apatite, mixture of apatite and calcite	Cd	Ручей Пухуитан, Шанхай, Китай Puhuitan Creek, Shanghai, China	Нитрат кальция и фосфат Calcium nitrate and phosphate	Zn, Pb, Cu	
р. Вулонг, Китай Wulong River, China	Биоуголь и наноразмерное нульвалентное железо Biochar and nanoscale nulvalent iron		Загрязненное водохранилище, Китай Polluted reservoir, China	Природный цеолит (N-цеолит) Natural zeolite (N-zeolite)		Pb, Cd, Mn, Zn
р. Гуанданг, Яньтай, Китай Guangdang River, Yantai, China	Биоуголь и наноразмерное нульвалентное железо Biochar and nanoscale nulvalent iron		Озеро Пюхьярви и озеро Кивиярви, Финляндия Lake Pyhäjärvi and Lake Kivijärvi, Finland	Активированный доменный шлак, метакаолин геополимер, отшелушенный вермикулит Activated blast furnace slag, metakaolin geopolymer, exfoliated vermiculite		
Бывший горный карьер Лейк, Арканзас, США Former Lake Mountain Quarry, Arkansas, USA	Известняк, бентонит глина и гравий Limestone, bentonite, clay and gravel	Zn				
Река Наньфэй, Хэфэй, Китай Nanfei River, Hefei, China	Биоуголь из рисовой шелухи Biochar from rice husks	Cu				

Биологическая ремедиация донных отложений

Традиционно биоремедиация включает в себя фиторемедиацию и микробную ремедиацию. В настоящее время выделяют несколько механизмов *фиторемедиации* при извлечении тяжелых металлов растениями: фитоэкстракция, фитодеграда-

ция, фитоволатилизация, ризодеградация (фитостимуляция), фитостабилизация [34]. Для восстановления донных отложений обычно используют гидрофиты: *Hydrilla verticillata*, *Elodea Canadensis*, микроводоросли, мангровые растения (табл. 5).

Таблица 5. Опыт биоремедиации загрязненных тяжелыми металлами донных отложений

Table 5. Experience of bioremediation of heavy metal contaminated bottom sediments

Место/Location	Биосорбент/Biosorbent	TM/Metal
р. Калаус, Ставропольский край, Россия Kalaus River, Stavropol Territory, Russia	Вермиремедиация Vermiremediation	Mn, Cu, Pb, Zn
р. Ходца, Московская область, Россия Khodtsa river, Moscow region, Russia	Ряска малая (Lemna minor) Lemna minor	Cd, Pb, Zn, Cu
р. Ваньюй, провинция Цзянсу, Китай Wangyu River, Jiangsu Province, China	<i>Hydrilla verticillata</i> , <i>Elodea canadensis</i>	Cd
Прибрежная приливно-отливная зона Восточно-Китайского моря Coastal intertidal zone of the East China Sea	Рамнолипидные биосурфактанты, полученные из <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Rhamnolipid biosurfactants derived from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	Pb, Hg
Побережье провинции Районг, Таиланд Coast of Rayong province, Thailand	Мангровое дерево Mangrove plant	Mn, Pb, Cr, Cu, Zn
Бассейн Лерма-Чапала, Мексика Lerma-Chapala Basin, Mexico	Бактерии (в основном, включая <i>Delftia</i> и <i>Pseudomonas</i>) Bacteria (mainly including <i>Delftia</i> and <i>Pseudomonas</i>)	Zn, As, Ni

Биоремедиация с помощью бактерий при очистке компонентов окружающей среды от тяжелых металлов обладает рядом преимуществ, в т. ч. связанных с высокой выживаемостью бактерий даже в экстремальных условиях, высокой скоростью размножения и способностью разлагать широкий спектр загрязняющих веществ при использовании следующих механизмов: биосорбции, биоаккумуляции, биоминерализации, биотрансформации и метилирования [35]. Исследованиями показана высокая эффективность использования бактерий (в основном, включая *Delftia* и *Pseudomonas*), а также цианобактерий для извлечения тяжелых металлов (Cr, Fe, Ni, As, Pb, Cu, Zn) из донных отложений [36].

Биосурфуканты используются как альтернативный вариант ремедиации загрязненных донных отложений. Эти поверхностно-активные биомолекулы, производимые микроорганизмами, имеют широчайшее использование в различных сферах деятельности от нефтяной промышленности до медицины. Биосурфуканты интересны для ремедиации загрязненных участков за счет уникальности физико-химических свойств, низкой токсичности, способности эффективно изменять поверхностное и межфазное натяжение, кислото- и температуростойчивости, биоразлагаемости и экологичности. Сведения об успешном применении биосурфукантов приводятся на примере очистки морских отложений в прибрежной приливно-отливной зоне Восточно-Китайского моря [37, 38].

Вместе с этим следует отметить направление *вермиремедиации* – развивающуюся технологию, которая использует дождевых червей для восстановления органически и химически загрязненных почв, и донных отложений. Успешные результаты апробирования этого способа описаны на примере работ по очистке донных отложений от Mn, Cu, Pb, Zn в Ставропольском крае [39]. Также на территории России имеется успешный опыт применения ряски малой (*Lemna minor*) в реке Ходца (Московская область) в ходе работ по извлечению Cd, Pb, Zn, Cu из донных отложений.

К преимуществам использования биотехнологий в сравнении с физико-химическими методами при ремедиации донных осадков относятся их низкая трудоёмкость и стоимость, экологичность и относительная простота реализации. Так, суммарная стоимость работ по восстановлению загрязненной территории в 1 га составляет 5 млн р., из которых более половины расходов связаны с подготовкой и транспортировкой мелиоранта [40]. Однако зачастую их применение существенно ограничивается климатическими условиями и низкой продолжительностью вегетационного периода [41]. Так, на большей части территории России решающим фактором в ограничении использования биоремедиации *in situ* является малое количество дней с положительной температу-

рой, что влечет за собой низкую эффективность восстановления загрязненных участков как донных отложений, так и почв [42].

Гибридная (комбинированная) ремедиация донных отложений

Использование комбинированных технологий ремедиации, совмещающих несколько методов, способствует повышению эффективности очистки и учету многообразия факторов формирования загрязненных осадков, таких как географическое положение, уровень pH, размер частиц, минеральный состав, тип отложений, формы нахождения тяжелых металлов, глубина, гидрохимия воды, климат, типы сопутствующих загрязнителей и т. д. [43].

Исследователи выделяют физико-химическую (электрокинетическую ремедиацию, химическое выщелачивание, ультразвуковое/микроволновое/химическое извлечение тяжелых металлов), химико-биологическую (фитостабилизирующий препарат, фитоактиватор), комбинированную межорганизменную (фито-микроорганизменную, фито-животная) и другие варианты ремедиации, объединяющие более трех методов [44].

Использование комбинированного способа ремедиации при загрязнении почв тяжелыми металлами нефтяного генезиса является наиболее эффективным подходом при сочетании биокомпостирования, фитоэкстракции (например, использование горчицы сизой или сарептской *Brassica juncea* в течение одного вегетационного сезона) и внесения в почву хелатоотрабазующих агентов [45].

Опыт совмещения методов химического выщелачивания осадков и их последующей стабилизации описан в [46] на примере осадков р. Цзехэ (Китай). На основе полученных результатов по восстановлению осадков в реке Цзехэ был разработан комбинированный метод очистки, включающий комплект ступенчатого автоматического оборудования для очистки воды, просеивания, стабилизации и промывки осадков. Отличительной особенностью метода является также дифференцированный подход к восстановлению различных гранулометрических фракций отложений, варьирующих от <0,075 до 4,75 мм. В результате более 90 % загрязненных осадков (из общего объема $9,3 \times 10^4 \text{ м}^3$) были повторно использованы в многоэтапной рекультивации, что является наиболее эффективным по сравнению с традиционной технологией очистки, связанной с конечным захоронением осадков без возможности вторичного использования.

Вторичное использование донных отложений

Вторичное использование очищенных донных отложений соответствует требованиям экономики замкнутого цикла и является частью нового технологического подхода многоразового использова-

ния. Сокращение объемов утилизации загрязненных донных отложений на полигонах ТКО должно быть проведено за счет увеличения пилотных проектов по опробованию технологий ремедиации загрязненных донных отложений, как это успешно реализуется в Северной Европе. Так, в период 2001–2002 гг. в Тромсё, Тронхейме, Сандефьорде, Кристиансанде и Хортене (Норвегия) были осуществлены пять пилотных проектов для получения новых знаний, изучения способов очистки загрязненных отложений, как лучше организовать и провести очистку отложений, и приобретения практического опыта, на которые было потрачено около 100 млн норвежских крон (или 9,6 млн долларов) [47].

По данным исследований, загрязненные донные отложения успешно используются при производстве строительных материалов в изготовлении керамзита, цементирующих материалов, брусчатки, перегородочных блоков, бетонных смесей, пенобетона и т. д., обеспечивая надежный способ утилизации отложений [19]. В Китае в производстве строительных материалов используют и осадок сточных вод как основу для изготовления кирпича, керамзита и бетона, что является эффективным способом утилизации осадка [48].

Также одним из возможных вариантов утилизации осадков с высоким содержанием Al, Fe, Mn, Cu, Zn, Co, Ni, сформированных в результате сброса недостаточно очищенных сточных вод горнодобывающих и перерабатывающих предприятий, оказалось использование контейнеров для создания многосекционных отстойников с целью повышения эффективности очистки сточных вод хвостохранилища, а также контейнеров для наращивания дамбы хвостохранилища [49].

Заключение

Интенсивная хозяйственная деятельность человека, связанная с нарушением залегания донных осадков водоёмов и водотоков, приводит к необходимости оценки степени их загрязнения и учета возможных экологических последствий при реализации строительных проектов и проведении дноуглубительных работ. При этом в системе экологического нормирования РФ присутствуют определённые пробелы, прежде всего, связанные с подходами к оценке загрязнения осадков тяжелыми металлами. Решением проблемы достоверной оценки состояния донных осадков, формирующихся в разнообразных природных и техногенных условиях, по нашему мнению, может являться законодатель-

ное закрепление фонового принципа оценки концентраций тяжелых металлов.

Существующие подходы к ремедиации донных осадков, загрязненных тяжелыми металлами, обеспечивают достаточно широкий выбор технических методов и средств. В перечне возможных методов восстановления осадков выделяются физические, химические и биологические. Ведущими преимуществами физических методов очистки является их низкая стоимость и простота исполнения, химических – высокая эффективность, биологических – низкая степень воздействия на другие компоненты среды при их применении. Применение перечисленных методов возможно как в условиях естественного залегания отложений в водоёме, так и с извлечением осадков. В обоих случаях существуют преимущества и ограничения, связанные с достигаемой степенью очистки, сохранением естественных гидрологических условий и рисками вторичного загрязнения. В связи с этим выбор технологий и методов ремедиации осадков в каждом случае является уникальным и зависит от комплекса условий, включающего в себя геологическое строение, гидрологические особенности, специфику техногенной нагрузки и возможности финансирования проекта.

Учитывая преимущества и недостатки каждого отдельного метода восстановления, перспективным решением при планировании ремедиации донных осадков является комплексирование методов для достижения максимального эффекта очистки при снижении экономических издержек. Так, в климатических условиях большей части территории Российской Федерации применение методов биоремедиации существенно ограничено коротким теплым периодом, однако такие методы могут являться важным дополнением к физическим и химическим способам очистки осадков.

Перспективным направлением обращения с загрязненными осадками, особенно при извлечении и очистке *ex situ*, а также при условии отсутствия возможности их эффективного восстановления, является поиск способов переработки загрязненных осадков в товарную продукцию. Цементирование осадков, создание из них вяжущих веществ и конструкционных материалов способствует эффективной иммобилизации тяжелых металлов и охране биотических компонентов среды от токсического воздействия, а также может обеспечить частичное возмещение средств, затрачиваемых на природоохранные мероприятия.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Состав и свойства донных отложений р. Мойки и Обводного канала (Санкт-Петербург) / А.Ю. Опекунов, С.Ф. Мануйлов, В.А. Шахвердов, А.В. Чураков., Н.А. Куринный // Вестник Санкт-Петербургского университета. Серия 7. Геология. География. – 2012. – № 2. – С. 65–80.

2. Химический состав и токсичность донных отложений малых водотоков Санкт-Петербурга / А.Ю. Опекунов, Е.С. Митрофанова, В.В. Спасский, М.Г. Опекунова, Н.А. Шейнерман, А.В. Чернышова // *Водные ресурсы*. – 2020. – Т. 47. – № 2. – С. 196–207. DOI: 10.31857/S032105962002011X.
3. Ciszewski D., Grygar M.A Review of flood-related storage and remobilization of heavy metal pollutants in river systems // *Water, Air, & Soil Pollution*. – 2016. – Vol. 227. – P. 239. DOI: 10.1007/s11270-016-2934-8.
4. Middelkoop H. Heavy-metal pollution of the river Rhine and Meuse floodplains in the Netherlands // *Netherlands Journal of Geosciences*. – 2000. – Vol. 79 (4). – P. 411–428.
5. Trends in heavy metals, polychlorinated biphenyls and toxicity from sediment cores of the inner River Thames estuary, London, UK / C.H. Vane, G.H. Turner, S.R. Chenery, M. Richardson, M.C. Cave, R. Terrington, C.J.B. Gowing, V. Moss-Hayes // *Environmental Science: Processes & Impacts*. – 2020. – Vol. 22. – P. 364–380. DOI: 10.1039/C9EM00430K.
6. Hewage S.A., Batagoda J.H., Meegoda J.N. Remediation of contaminated sediments containing both organic and inorganic chemicals using ultrasound and ozone nanobubbles // *Environmental pollution*. – 2021. – Vol. 274. – P. 116538. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116538.
7. Jawed Z., Krantzberg G. A comparative analysis of practitioners' experience in sediment remediation projects to highlight best practices // *Water Quality Research Journal*. – 2019. – Vol. 54. – P. 10–33. DOI: 10.2166/wqrj.2018.020.
8. Попов А.Н., Штыков В.И. К вопросу о ликвидации водохранилищ и последующей рекультивации их ложа и береговой полосы. Сообщение 1. К вопросу о ликвидации водохранилищ и возможных экологических последствиях при реализации мероприятия // *Водное хозяйство России: проблемы, технологии, управление*. – 2012. – № 5. – С. 31–41.
9. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Малые водохранилища: экология и безопасность: монография. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2012. – 256 с.
10. Kondolf G.M. et al. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents // *Earth's Future*. – 2014. – Vol. 2. – P. 256–280. DOI: 10.1002/2013EF000184.
11. Controlled reservoir drawdown – challenges for sediment management and integrative monitoring: an Austrian case study – part A: Reach scale / C. Hauer, M. Haimann, P. Holzapfel, P. Flödl, B. Wagner, M. Hubmann, B. Hofer, H. Habersack, M. Schletterer // *Water*. – 2020. – Vol. 12. – P. 1058. DOI: 10.3390/w12041058
12. Просеков А.Ю. Влияние затопления территорий при строительстве водохранилищ на сохранность их биологических ресурсов // *Экосистемы*. – 2021. – № 28. – С. 5–15.
13. Гидродинамические процессы и их роль в формировании донных осадков водохранилищ Волжско-Камского каскада / В.В. Законнов, А.В. Законнова, А.И. Цветков, Н.Г. Шерышева // *Труды Института биологии внутренних вод РАН*. – 2018. – № 81 (84). – С. 35–46. DOI: 10.24411/0320-3557-2018-10004.
14. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe potash deposit / E. Ushakova, A. Perevoshchikova, E. Menshikova, E. Khayrulina, R. Perevoshchikov, P. Belkin // *Mining*. – 2023. – Vol. 3. – P. 176–204. DOI: 10.3390/mining3020011.
15. Особенности изменений экологических функций абиотических сфер земли в районах гидроэнергетических комплексов / В.Т. Трофимов, М.А. Харьковина, Т.А. Барабошкина, А.Д. Жигалин // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. – 2017. – Т. 92. – № 1. – С. 57–70.
16. Ворончихина Е.А., Блинов С.М., Меньшикова Е.А. Технофильные металлы в естественных и урбанизированных экосистемах Пермского края // *Экология урбанизированных территорий*. – 2013. – № 1. – С. 103–108.
17. Геоэкологическое обоснование рациональной организации территории в границах осушаемого участка Нижнезырянского водохранилища / Н.Г. Максимович, Е.А. Ворончихина, И.Ю. Дылдин, В.И. Каменщикова, А.В. Сунцов // *Географический вестник*. – 2008. – № 2 (8). – С. 230–238.
18. Ворончихина Е.А. Рекультивация нарушенных ландшафтов: теория, технологии, региональные аспекты: монография. – Пермь, 2010. – 163 с.
19. Sustainable ex-situ remediation of contaminated sediment: a review / Y. Zhang, C. Labianca, L. Chen et al. // *Environmental Pollution*. – 2021. – Vol. 287. – P. 117333. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117333.
20. Rämö R.A. Sediment remediation using activated carbon: amending knowledge gaps. – Stockholm: Stockholm University, Department of Ecology, Environment and Plant Sciences, 2022. – 57 p.
21. Status of contaminated marine sediments in four Nordic countries: assessments, regulations, and remediation approaches / A.P. Lehoux, K. Petersen, M.T. Leppänen, I. Snowball, M. Olsen // *Journal of Soils and Sediments*. – 2020. – Vol. 20. – P. 2619–2629. DOI: 10.1007/s11368-020-02594-3.
22. Царькова Н.С. Геоэкологический мониторинг дноуглубительных работ в морском торговом порту Усть-Луга: автореф. дис. ... канд. географ. наук. – СПб., 2016. – 22 с.
23. Ситнов А.Н., Воронина Ю.Е. Оценка динамики свободной поверхности и глубин в нижнем бьефе Нижегородского гидроузла при возведении третьей нитки шлюзов или их третьей ступени // *Научные проблемы водного транспорта*. – 2019. – № 61. – С. 28–38.
24. Официальный сайт ФГУП «Росморпорт». URL: <http://www.rosmporport.ru> (дата обращения 20.12.2023).
25. Агаханянц П.Ф., Агранова Ю.С. Оценка состояния донных отложений в целях принятия решения о природоохранном дноуглублении в Российской Федерации // *Здоровье – основа человеческого потенциала: проблемы и пути их решения*. – 2018. – Т. 13. – № 2. – С. 744–753.
26. Копчик Г.Н. Современные подходы к ремедиации почв, загрязненных тяжелыми металлами (обзор литературы) // *Почвоведение*. – 2014. – № 7. – С. 851–868. DOI: 10.7868/S0032180X14070077.
27. Human health risk assessment in restoring safe and productive use of abandoned contaminated sites / E. Weislo, J. Bronder, A. Bubak, E. Rodriguez-Valdés, J.L.R. Gallego // *Environment international*. – 2016. – Vol. 94. – P. 436–448. DOI: 10.1016/j.envint.2016.05.028.
28. Янин Е.П. Особенности и экономические аспекты организации работ по ремедиации загрязненных территорий в зарубежных странах // *Экономика природопользования*. – 2012. – № 3. – С. 140–148.

29. Xu Q., Wu B. Recent progress on ex situ remediation technology and resource utilization for heavy metal contaminated sediment // *Toxics*. – 2023. – Vol. 11. – P. 207. DOI: 10.3390/ijerph192416767.
30. Lasheen M.R., Ammar N.S. Ex situ remediation technology for heavy metals in contaminated sediment // *Desalination and Water Treatment*. – 2016. – Vol. 57. – P. 827–834. DOI: 10.1080/19443994.2014.979444.
31. Metal removal and associated binding fraction transformation in contaminated river sediment washed by different types of agents / H. Wang, T. Liu, S. Feng, W. Zhang // *PLoS One*. – 2017. – Vol. 12. – P. e0174571. DOI: 10.1371/journal.pone.0174571.
32. Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals / W.H. Peng, X.M. Li, S.T. Xiao, W.H. Fan // *Journal of Soils and Sediments*. – 2018. – Vol. 18. – P. 1701–1719. DOI: 10.1007/s11368-018-1921-7.
33. Integrated cost and environmental impact assessment of management options for dredged sediment / N. Svensson, A. Norén, O. Modin, K. Karlfeldt Fedje, S. Rauch, A.M. Strömvall, Y. Andersson-Sköld // *Waste management*. – 2022. – Vol. 138. – P. 30–40. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.11.031.
34. Лапушкин М.Ю., Лукьянова Н.Н., Васильева Г.К. Фиторемедиация как метод рекультивации земель, загрязненных хлороорганическими соединениями // *Мелиорация и водное хозяйство*. – 2021. – № 4. – С. 35–41.
35. Биологические методы очистки окружающей среды от тяжелых металлов / М.Г. Искужина, Е.В. Кузина, С.Р. Мухаматдырова, Т.Ю. Коршунова // *Экобиотех*. – 2023. – Т. 6. – № 2. – С. 120–138.
36. Xu Q., Wu B., Chai X. In situ remediation technology for heavy metal contaminated sediment: a review // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2022. – Vol. 19. – P. 16767. DOI: 10.3390/ijerph192416767.
37. Рудакова М.А., Галицкая П.Ю., Селивановская С.Ю. Биосурфактанты: современные тренды применения // *Ученые записки Казанского университета. Серия: Естественные науки*. – 2021. – Т. 163. – № 2. – С. 177–208. DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.177-208.
38. Removal of Pb and Hg from marine intertidal sediment by using rhamnolipid biosurfactant produced by a *Pseudomonas aeruginosa* strain / Q. Chen, Y. Li, M. Liu, B. Zhu, J. Mu, Z. Chen // *Environmental Technology & Innovation* – 2021. – Vol. 22. – P. 101456. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101456.
39. Биоремедиация донных отложений рек как способ повышения плодородия почв / А.А. Коровин, Т.Г. Зеленская, Е.Е. Степаненко, С.В. Окрут, Н.Ю. Хасай // *Вестник Воронежского государственного аграрного университета*. – 2022. – Т. 15 – № 2 (73). – С. 71–78. DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_2_71-78.
40. Слуковская М.В., Кременецкая И.П., Иванова Л.А. Применение технологии ремедиации с использованием отходов промышленности в арктических условиях // *Современные проблемы четвертичной геологии и географии Северо-запада европейской части России и сопредельных стран: Материалы научной сессии (с участием иностранных специалистов), посвященной 100-летию со дня рождения Галины Сергеевны Бискэ / под ред. Т.С. Шелеховой*. – Петрозаводск, 9–10 марта 2017. – Петрозаводск: Карельский научный центр РАН, 2017. – С. 105–109.
41. Sayqal A., Ahmed O.B. Advances in heavy metal bioremediation: an overview // *Applied bionics and biomechanics*. – 2021. – P. 1609149. DOI: 10.1155/2021/1609149.
42. Янкевич М.И., Хадеева В.В., Мурыгина В.П. Биоремедиация почв: вчера, сегодня, завтра // *Биосфера*. – 2015. – Т. 7. – № 2. – С. 199–208.
43. Integrated remediation processes toward heavy metal removal/recovery from various environments-a review / A. Selvi, A. Rajasekar, J. Theerthagiri, A. Ananthaselvam, K. Sathishkumar, J. Madhavan, K.S.M. Rahman // *Frontiers in Environmental Science*. – 2019. – Vol. 7. – P. 66. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00066.
44. Research on progress in combined remediation technologies of heavy metal polluted sediment / M. Zhang, X. Wang, L. Yang, Y. Chu // *International Journal of Environmental Research and Public Health*. – 2019. – Vol. 16. – P. 5098. DOI: 10.3390/ijerph16245098.
45. Башкин В.Н., Галиулин Р.В., Галиулина Р.А. Ремедиация почв, загрязненных тяжелыми металлами нефтяного генезиса // *Трубопроводный транспорт: теория и практика*. – 2011. – № 6 (28). – С. 46–49.
46. Multistage remediation of heavy metal contaminated river sediments in a mining region based on particle size / T. Ma, Y. Sheng, Y. Meng, J. Sun // *Chemosphere*. – 2019. – Vol. 225. – P. 83–92. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.03.018.
47. Contaminated sediments: review of solutions for protecting aquatic environments / M. Olsen, K. Petersen, A.P. Lehoux, M. Leppänen, M. Schaanning, I. Snowball, S. Øxnevad, E. Lund // *TemaNord*. – 2019. – 514 p. DOI: 10.6027/TN2019-514.
48. Ушакова Е.С., Белкин П.А., Дробинина Е.В. Особенности осадкообразования и экологический статус промышленного канала сточных вод // *Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов*. – 2023. – Т. 334. – № 6. – С. 75–91. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/3994.
49. Петрова В.А., Пашкевич М.А. Утилизация обезвоженных техногенных донных отложений водных объектов горно-промышленных регионов // *Записки Горного института*. – 2013. – Т. 206. – С. 160–162.

Информация об авторах

Евгения Сергеевна Ушакова, младший научный сотрудник Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, 4. ushakova.evgeniya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2016-7356>

Павел Андреевич Белкин, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник Естественнонаучного института Пермского государственного национального исследовательского университета, Россия, 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, 4. pashabelkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8884-6024>

Поступила в редакцию: 27.12.2023

Поступила после рецензирования: 12.01.2024

Принята к публикации: 27.09.2024

REFERENCES

1. Opekunov A.Y., Manuilov S.F., Shakhverdov V.A., Churakov A.V., Kurinniy N.A. Composition and properties of bottom sediments of the Moika river and bypass canal (St. Petersburg). *Bulletin of St. Petersburg University. Series 7. Geology. Geography*, 2012, no. 2, pp. 65–80. (In Russ.)
2. Opekunov A.Y., Spasskii V.V., Opekunova M.G., Sheinerman N.A., Chernyshova A.V., Mitrofanova E.S. Chemistry and toxicity of bottom sediments in small watercourses of St. Petersburg. *Water Resources*, 2020, vol. 47, no 2, pp. 282–293. (In Russ.) DOI: 10.31857/S032105962002011X.
3. Ciszewski D., Grygar M.A. Review of flood-related storage and remobilization of heavy metal pollutants in river systems. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2016, vol. 227, pp. 239. DOI: 10.1007/s11270-016-2934-8.
4. Middelkoop H. Heavy-metal pollution of the river Rhine and Meuse floodplains in the Netherlands. *Netherlands Journal of Geosciences*, 2000, vol. 79, no. 4, pp. 411–428.
5. Vane C.H., Turner G.H., Chenery S.R., Richardson M., Cave M.C., Terrington R., Gowing C.J.B., Moss-Hayes V. Trends in heavy metals, polychlorinated biphenyls and toxicity from sediment cores of the inner River Thames estuary, London, UK. *Environmental Science: Processes & Impacts*, 2020, vol. 22, pp. 364–380. DOI: 10.1039/C9EM00430K.
6. Hewage S.A., Batagoda J.H., Meegoda J.N. Remediation of contaminated sediments containing both organic and inorganic chemicals using ultrasound and ozone nanobubbles. *Environmental pollution*, 2021, vol. 274, pp. 116538. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.116538.
7. Jawed Z., Krantzberg G. A comparative analysis of practitioners' experience in sediment remediation projects to highlight best practices. *Water Quality Research Journal*, 2019, vol. 54, no. 1, pp. 10–33. DOI: 10.2166/wqrj.2018.020.
8. Popov A.N., Shtykov V.I. To the question of reservoirs liquidation and subsequent reclamation of their bed and coastal strip. Message 1. To the question of water reservoirs liquidation and possible ecological consequences at realization of the measure. *Water economy of Russia: problems, technologies, management*, 2012, no. 5, pp. 31–41. (In Russ.)
9. Maksimovich N.G., Pyankov S.V. *Small reservoirs: ecology and safety: a monograph*. Perm, Perm State National Research University Publ., 2012. 256 p. (In Russ.)
10. Kondolf G.M. Sustainable sediment management in reservoirs and regulated rivers: Experiences from five continents. *Earth's Future*, 2014, vol. 2, pp. 256–280. DOI: 10.1002/2013EF000184.
11. Hauer C., Haimann M., Holzzapfel P., Flödl P., Wagner B., Hubmann M., Hofer B., Habersack H., Schletterer M. Controlled reservoir drawdown – challenges for sediment management and integrative monitoring: an Austrian case study – part A: Reach scale. *Water*, 2020, vol. 12, pp. 1058. DOI: 10.3390/w12041058.
12. Prosekov A.Yu. Influence of flooding of territories during the construction of reservoirs on the conservation of their biological resources. *Ecosystems*, 2021, no. 28, pp. 5–15. (In Russ.)
13. Zakonov V.V., Zakonova A.V., Tsvetkov A.I., Sherysheva N.G. Hydrodynamic processes and their role in the formation of bottom sediments of reservoirs of the Volga-Kama cascade. *Proceedings of the Institute of Inland Waters Biology RAS*, 2018, no. 81 (84), pp. 35–46. (In Russ.) DOI: 10.24411/0320-3557-2018-10004.
14. Ushakova E., Perevoshchikova A., Menshikova, E., Khayrulina E., Perevoshchikov R., Belkin P. Environmental aspects of potash mining: a case study of the Verkhnekamskoe potash deposit. *Mining*, 2023, vol. 3, pp. 176–204. DOI: 10.3390/mining3020011.
15. Trofimov V.T., Kharkina M.A., Baraboshkina T.A., Zhigalin A.D. Features of changes in the ecological functions of abiotic spheres of the earth in the areas of hydropower complexes. *Bulletin of the Moscow Society of Nature Researchers. Department of geology*, 2017, vol. 92, no. 1, pp. 57–70. (In Russ.)
16. Voronchikhina E.A., Blinov S.M., Menshikova E.A. Technophilic metals in natural and urbanized ecosystems of Perm Krai. *Ecology of urbanized areas*, 2013, no. 1, pp. 103–108. (In Russ.)
17. Maksimovich N.G., Voronchikhina E.A., Dyldin I.Yu., Kamenshchikova V.I., Suntsov A.V. Geo-ecological substantiation of the rational organization of the territory within the boundaries of the drained area of the Nizhnezyryansk water reservoir. *Geographical bulletin*, 2008, no. 2 (8), pp. 230–238. (In Russ.)
18. Voronchikhina E.A. *Recultivation of disturbed landscapes: theory, technologies, regional aspects: monograph*. Perm, 2010. 163 p. (In Russ.)
19. Zhang Y., Labianca C., Chen L., et al. Sustainable ex-situ remediation of contaminated sediment: a review. *Environmental Pollution*, 2021, vol. 287, pp. 117333. DOI: 10.1016/j.envpol.2021.117333.
20. Rämö R.A. *Sediment remediation using activated carbon: amending knowledge gaps*. Stockholm, Department of Ecology, Environment and Plant Sciences, Stockholm University, 2022. 57 p.
21. Lehoux A.P., Petersen K., Leppänen M.T., Snowball I., Olsen M. Status of contaminated marine sediments in four Nordic countries: assessments, regulations, and remediation approaches. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, vol. 20, pp. 2619–2629. DOI: 10.1007/s11368-020-02594-3.
22. Tsarkova N.S. *Geoecological monitoring of dredging operations in the commercial seaport of Ust-Luga*. Cand. Diss. Abstract. St. Petersburg, 2016. 22 p. (In Russ.)
23. Sitnov A.N., Voronina Yu.E. Estimation of free surface and depths dynamics in downstream of Nizhny Novgorod hydropower complex when constructing the third line of locks or their third stage. *Scientific problems of water transport*, 2019, no. 61, pp. 28–38. (In Russ.)
24. *Official website of FSUE Rosmorport*. (In Russ.) Available at: <http://www.rosport.ru> (accessed 20 December 2023).
25. Agakhanyants P.F., Agranova Y.S. Assessment of the state of bottom sediments in order to make a decision on environmental dredging in the Russian Federation. *Health is the basis of human potential: problems and ways of their solution*, 2018, vol. 13, no. 2, pp. 744–753. (In Russ.)
26. Koptsik G.N. Modern approaches to remediation of soils contaminated with heavy metals (literature review). *Soil Science*, 2014, no. 7, pp. 851–868. (In Russ.) DOI: 10.7868/S0032180X14070077.
27. Wcisło E., Bronder J., Bubak A., Rodríguez-Valdés E., Gallego J.L.R. Human health risk assessment in restoring safe and productive use of abandoned contaminated sites. *Environment international*, 2016, vol. 94, pp. 436–448. DOI: 10.1016/j.envint.2016.05.028.

28. Yanin E.P. Peculiarities and economic aspects of organization of works on remediation of contaminated territories in foreign countries. *Economics of Nature Management*, 2012, no. 3, pp. 140–148. (In Russ.)
29. Xu Q., Wu B. Recent progress on ex situ remediation technology and resource utilization for heavy metal contaminated sediment. *Toxics*, 2023, vol. 11, pp. 207. DOI: 10.3390/toxics11030207.
30. Lasheen, M.R., Ammar N.S. Ex situ remediation technology for heavy metals in contaminated sediment. *Desalination and Water Treatment*, 2016, vol. 57, pp. 827–834. DOI: 10.1080/19443994.2014.979444.
31. Wang H., Liu T, Feng S. Zhang W. Metal removal and associated binding fraction transformation in contaminated river sediment washed by different types of agents. *PLoS One*, 2017, vol. 12, pp. e0174571. DOI:10.1371/journal.pone.0174571.
32. Peng W.H., Li X.M., Xiao S.T., Fan W.H. Review of remediation technologies for sediments contaminated by heavy metals. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, vol. 18, pp. 1701–1719. DOI: 10.1007/s11368-018-1921-7.
33. Svensson N., Norén A., Modin O., Karlfeldt Fedje K., Rauch S., Strömvall A.M., Andersson-Sköld Y. Integrated cost and environmental impact assessment of management options for dredged sediment. *Waste management*, 2022, vol. 138, pp. 30–40. DOI: 10.1016/j.wasman.2021.11.031.
34. Lapushkin M.Y., Lukyanova N.N., Vasilieva G.K. Phytoremediation as a method of reclamation of lands contaminated with organochlorine compounds. *Land Reclamation and Water Management*, 2021, no. 4, pp. 35–41. (In Russ.)
35. Iskuzhina M.G., Kuzina E.V., Mukhamatdyarova S.R., Korshunova T.Y. Biological methods of environmental treatment of heavy metals. *Ecobiotech*, 2023, vol. 6, no. 2, pp. 120–138. (In Russ.)
36. Xu Q., Wu B., Chai X. In situ remediation technology for heavy metal contaminated sediment: a review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2022, vol. 19, pp. 16767. DOI: 10.3390/ijerph192416767.
37. Rudakova M.A., Galitskaya P.Yu., Selivanovskaya S.Yu. Biosurfactants: current application trends. *Uchenye Zapiski Kazanskogo Universiteta. Seriya Estestvennye Nauki*, 2021, vol. 163, no. 2, pp. 177–208. (In Russ.) DOI: 10.26907/2542-064X.2021.2.177-208.
38. Chen Q., Li Y., Liu M., Zhu B., Mu J., Chen Z. Removal of Pb and Hg from marine intertidal sediment by using rhamnolipid biosurfactant produced by a *Pseudomonas aeruginosa* strain. *Environmental Technology & Innovation*, 2021, vol. 22, pp. 101456. DOI: 10.1016/j.eti.2021.101456.
39. Korovin A.A., Zelenskaya T.G., Stepanenko E.E., Okrut S.V., Hasay N.Y. Bioremediation of river bottom sediments as a way to improve soil fertility. *Bulletin of Voronezh State Agrarian University*, 2022, vol. 15, no. 2 (73), pp. 71–78. (In Russ.) DOI: 10.53914/issn2071-2243_2022_2_71-78.
40. Slukovskaya M.V., Kremenetskaya I.P., Ivanova L.A. Application of remediation technology using industrial waste in Arctic conditions. *Modern problems of Quaternary geology and geography of the North-West European part of Russia and neighboring countries. Proc. of the scientific session (with the participation of foreign experts) dedicated to the 100th anniversary of the birth of Galina S. Biske*. Petrozavodsk, March 9–10, 2017. Petrozavodsk, Karelian Scientific Center of the Russian Academy of Sciences Publ., 2017. pp. 105–109. (In Russ.)
41. Sayqal A., Ahmed O.B. Advances in heavy metal bioremediation: an overview. *Applied bionics and biomechanics*, 2021, pp. 1609149. DOI: 10.1155/2021/1609149.
42. Yankevich M.I., Khadeeva V.V., Murygina V.P. Bioremediation of soils: yesterday, today, tomorrow. *Biosphere*, 2015, vol. 7, no. 2, pp. 199–208. (In Russ.)
43. Selvi A., Rajasekar A., Theerthagiri J., Ananthaselvam A., Sathishkumar K., Madhavan J., Rahman K.S.M. Integrated remediation processes toward heavy metal removal/recovery from various environments—a review. *Frontiers in Environmental Science*, 2019, vol. 7, pp. 66. DOI: 10.3389/fenvs.2019.00066.
44. Zhang M., Wang X., Yang L., Chu Y. Research on progress in combined remediation technologies of heavy metal polluted sediment. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, vol. 16, pp. 5098. DOI: 10.3390/ijerph16245098.
45. Bashkin V.N., Galiulin R.V., Galiulina R.A. Remediation of soils contaminated with heavy metals of oil genesis. *Truboprovodnyi transport: theory and practice*, 2011, no. 6, pp. 46–49. (In Russ.)
46. Ma T., Sheng Y., Meng Y., Sun J. Multistage remediation of heavy metal contaminated river sediments in a mining region based on particle size. *Chemosphere*, 2019, vol. 225, pp. 83–92. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2019.03.01.
47. Olsen M., Petersen K., Lehoux A.P., Leppänen M., Schaanning M., Snowball I., Øxnevad S., Lund E. Contaminated sediments: review of solutions for protecting aquatic environments. *TemaNord*, 2019, 514 p. DOI: 10.6027/TN2019-514.
48. Ushakova E.S., Belkin P.A., Drobinina E.V. Sewage sludge formation characteristics and environmental status of the industrial wastewater channel. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, 2023, vol. 334, no 6, pp. 75–91. DOI: 10.18799/24131830/2023/6/3994. (In Russ.)
49. Petrova V.A., Pashkevich M.A. Utilization of dehydrated technogenic bottom sediments of water bodies of mining-industrial regions. *Notes of the Mining Institute*, 2013, vol. 206, pp. 160–162. (In Russ.)

Information about the authors

Evgeniya S. Ushakova, Junior Researcher, Perm State University, 4, Genkel street, Perm, 614068, Russian Federation. ushakova.evgeniya@gmail.com, <https://orcid.org/0000-0002-2016-7356>

Pavel A. Belkin, Cand. Sc., Researcher, Perm State University, 4, Genkel street, Perm, 614068, Russian Federation. pashabelkin@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0001-8884-6024>

Received: 27.12.2023

Revised: 12.01.2024

Accepted: 27.09.2024