

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МЕЛИОРАТИВНО- ВОДОХОЗЯЙСТВЕННОГО КОМПЛЕКСА И ПУТИ ИХ РЕШЕНИЯ

Обзорная статья
УДК 626/627

Условия использования сорбентов в локальных гидротехнических сооружениях на мелиоративных системах в жарком климате

Хала Кабтул¹, Ирина Викторовна Глазунова²

^{1, 2}Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева,
Москва, Российская Федерация

¹halak93@gmail.com

²ivglazunova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>

Аннотация. Цель. Анализ условий эффективного применения сорбентов в локальных гидротехнических сооружениях (ЛГС) мелиоративных систем в условиях жаркого климата. **Обсуждение.** Антропогенная нагрузка, засоление, а также попадание пестицидов и тяжелых металлов делают воду непригодной для орошения. Традиционные методы очистки, часто энергоемкие и дорогостоящие, не всегда справляются с высокой нагрузкой и спецификой рассредоточенных источников загрязнения в мелиоративных сетях. Это диктует настоятельную необходимость внедрения рентабельных, энергоэффективных и адаптивных технологий, таких, как сорбционные методы, интегрированные непосредственно в конструкцию ЛГС. Такая интеграция позволяет осуществлять очистку воды в месте ее использования или транспортировки, минимизируя потери и затраты. Рассмотрены основные типы ЛГС, наиболее перспективные для модификации сорбентами: валы-фильтры, сорбционные облицовки каналов, фильтрующие колодцы и подземные противодиффузионные и сорбционные барьеры. Для каждого типа определены потенциальные места установки и функциональное назначение. Выявлены ключевые факторы, ограничивающие работу сорбентов в жарком климате: физико-механическая деградация (кольматация, абразивный износ), химико-минералогические изменения (солевая деградация, термоокислительная деструкция), биологическое обрастание и термодинамические влияния, связанные с обратимостью сорбционных процессов. Для противодействия этим процессам необходимы специализированные термостабильные, механически прочные материалы, демонстрирующие устойчивость к гидролизу и фотодеструкции. Перспективными представляются модифицированные природные материалы (цеолиты, шунгит), а также синтетические композиты и наноматериалы с заданными свойствами. Эффективность долговременной эксплуатации напрямую зависит не только от свойств материала, но и от точного дозирования, оптимизированных методов внесения в конструкцию сооружения, а также от регулярного мониторинга состояния сорбционного блока и качества фильтрата. **Выводы.** Применение сорбентов в ЛГС является высокоэффективным решением для повышения устойчивости мелиоративных систем. Успех зависит от комплексного подхода, объединяющего выбор адаптивных материалов, специализированное проектирование сооружений и внедрение гибкой системы контроля, что обеспечит качество воды и сохранение плодородия почв.

Ключевые слова: мелиоративные системы, жаркий климат, локальные гидротехнические сооружения, сорбенты, очистка воды, деградация сорбентов, термостабильность

Апробация результатов исследования: основные положения статьи доложены на Всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы мелиоративно-водохозяйственного комплекса и пути их решения» (г. Новочеркасск, 10 октября 2025 г.).

Для цитирования: Кабтул Х., Глазунова И. В. Условия использования сорбентов в локальных гидротехнических сооружениях на мелиоративных системах в жарком

MODERN PROBLEMS OF LAND RECLAMATION AND WATER INDUSTRIAL COMPLEX AND WAYS TO SOLVE THEM

Review article

Conditions for sorbent application in local hydraulic structures on reclamation systems in hot climates

Hala Kabtoul¹, Irina V. Glazunova²

^{1, 2}Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow,
Russian Federation

¹halak93@gmail.com

²ivglazunova@mail.ru, <https://orcid.org/0000-0003-4931-2008>

Abstract. Purpose: to analyze the conditions for the effective use of sorbents in local hydraulic structures (LHS) of reclamation systems in hot climates. **Discussion.** Anthropogenic load, salinization, and the presence of pesticides and heavy metals make water unsuitable for irrigation. The traditional treatment methods, often energy-consuming and expensive, are not always able to cope with the high load and specific nature of diffuse pollution sources in reclamation networks. This dictates the urgent need to implement cost-effective, energy-efficient, and adaptive technologies, such as sorption methods integrated directly into the LHS design. This integration allows for water treatment at the point of its use or transportation, minimizing losses and costs. The main types of LGS that are most promising for modification with sorbents are considered: filter shafts, sorption channel linings, filter wells, and underground impermeable and sorption barriers. Potential installation locations and functional purposes are determined for each type. Key factors limiting the performance of sorbents in hot climates are identified: physical and mechanical degradation (colmatation, abrasive wear), chemical and mineralogical changes (salt degradation, thermal-oxidative destruction), biological fouling, and thermodynamic influences associated with the reversibility of sorption processes. The specialized thermally stable, tenacious materials demonstrating resistance to hydrolysis and photodegradation are necessary to counteract these processes. The modified natural materials (zeolites, shungite), as well as synthetic composites and nanomaterials with desired properties, appear promising. Long-term operational efficiency depends directly not only on the material's properties but also on precise dosing, optimized application methods within the structure, and regular monitoring of the sorption unit's condition and filtrate quality. **Conclusions.** The sorbent application in local hydraulic structures is a highly effective solution for increasing the sustainability of reclamation systems. Success depends on an integrated approach combining the selection of adaptive materials, specialized structure design, and the implementation of a flexible control system, ensuring water quality and maintaining soil fertility.

Keywords: reclamation systems, hot climate, local hydraulic structures, sorbents, water treatment, sorbent degradation, thermal stability

Evaluation of the research results: the main provisions of the article were reported at the All-Russian scientific and practical conference “Modern problems of land reclamation and water industrial complex and ways to solve them” (Novocherkassk, October 10, 2025).

For citation: Kabtoul H., Glazunova I. V. Conditions for sorbent application in local hydraulic structures on reclamation systems in hot climates. *Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture*. 2025;97(3):122–137. (In Russ.).

Введение. В условиях глобального изменения климата аридные и полупустынные регионы сталкиваются с усилением дефицита водных ресурсов, повышенной испаряемостью и ухудшением качества воды. Мелиоративные системы в таких зонах критически важны для обеспечения продовольственной безопасности, однако их эффективная работа зачастую нарушается из-за загрязнения дренажных и сточных вод тяжелыми металлами, нефтепродуктами, органическими соединениями и взвешенными частицами. Традиционные методы очистки воды на локальных гидротехнических сооружениях (прудах-отстойниках, фильтрующих колодцах) не всегда справляются с растущей нагрузкой, особенно в периоды паводков и «цветения» воды. Это диктует необходимость внедрения дополнительных, более эффективных и рентабельных технологий для обеспечения устойчивого водообеспечения и минимизации антропогенного воздействия на окружающую среду [1].

Одним из наиболее универсальных и экономически оправданных методов глубокой очистки является сорбционный. Использование сорбентов в локальных гидротехнических сооружениях (ЛГС) мелиоративных систем, таких, как габионные фильтрационные кассеты, позволяет достичь высокой степени извлечения специфических загрязнителей, включая эмульсированные нефтепродукты и ионы тяжелых металлов, которые сложно удалить традиционными способами. В условиях жаркого климата мелиоративные системы сталкиваются с рядом сложностей, связанных с высокой температурой, интенсивным испарением и специфическими особенностями загрязнений. Эффективное использование сорбентов требует учета климатических и технологических условий, а также выбора подходящего материала.

Традиционные централизованные очистные сооружения часто экономически нецелесообразны для рассредоточенных мелиоративных систем. В этой связи все большее распространение получают локальные гидротехнические сооружения, интегрированные непосредственно в инфраструктуру

ру мелиоративной сети и использующие в основе своей работы природоподобные технологии, в том числе сорбцию [2].

Локальные ГТС с сорбентами предназначены для перехвата, фильтрации и очистки воды на ограниченных участках мелиоративной системы. Их ключевое преимущество – низкая капиталоемкость, простота эксплуатации и возможность использования местных материалов.

Цель исследования – изучение условий использования сорбентов в локальных гидротехнических сооружениях на мелиоративных системах в жарком климате.

Обсуждение. Сооружения для перехвата поверхностного стока предназначены для предотвращения попадания загрязнений с водосборной площади в открытую мелиоративную сеть. Валы-фильтры и траншеи-ловушки – это линейные сооружения, располагаемые по контуру загрязненных территорий (площадки заправки техники, склады удобрений). Конструктивно они представляют собой канаву или вал, заполненный фильтрующей загрузкой многослойной структуры. Верхние слои (щебень, гравий) задерживают взвешенные вещества, а нижний слой-сердцевина, содержащий сорбент (торф, цеолит, опилки), сорбирует такие растворенные загрязнения, как нефтепродукты, пестициды и тяжелые металлы [3]. Сооружения для очистки воды в каналах могут быть представлены матами, элементами облицовки, сорбирующими дамбами-перегородками. Традиционные облицовки (бетонные, полимерные) решают задачу борьбы с фильтрацией и зарастанием, но не с качеством воды. Перспективным направлением является создание облицовок каналов с сорбционной составляющей, композитных облицовок, где внешний слой обеспечивает механическую прочность, а внутренний содержит сорбент. Например, маты из геосинтетиков, наполненные гранулированным цеолитом или активированным углем, укладываются на откосы и дно канала. Протекающая вода контактирует с сорбентом, который извлекает из нее биогены и органические загрязнители [4].

Фильтрующие сооружения на дренажно-сбросной сети устанавливаются в узловых точках системы для финишной очистки воды перед сбросом в водный объект или возвратом в оборотную систему. Фильтрующие колодцы сооружаются на выходе закрытых дренажных коллекторов или сбросных каналов. Представляют собой шахту из железобетонных колец или полимерных материалов, заполненную фильтрующей загрузкой. Многослойная засыпка включает дренирующий слой (крупный щебень), несколько фильтрующих слоев (песок, гравий разных фракций) и основной сорбционный слой (цеолит, шунгит, керамзит, импрегнированный оксидами металлов). Такие колодцы эффективны для удаления взвешенных веществ, аммонийного азота, фосфатов и части тяжелых металлов [5]. Съёмные фильтрующие элементы (картриджи, кассеты) – это наиболее гибкое и технологичное решение. Конструкции представляют собой перфорированные контейнеры, заполненные сорбентом, которые устанавливаются в специальные пазы в лотках, переездах, устьях дренажных труб. Главное преимущество – легкость замены отработанного сорбента без проведения земляных работ. Это позволяет оперативно реагировать на изменение состава загрязнений и использовать дорогостоящие, но высокоэффективные сорбенты (ионообменные смолы, специфические модифицированные материалы) [6].

Сооружения подземной очистки (в грунте) могут быть представлены сорбирующими экраны (барьерами). Это вертикальные или наклонные конструкции, создаваемые в толще грунта для перехвата и очистки фильтрационного потока. Технология их создания включает прорезь в грунте, которая заполняется пастообразной или суспензионной смесью сорбента (бентонит + цеолит, бентонит + зола) с последующим уплотнением. Такие экраны эффективны для защиты подземных вод от фильтрата со свалок, хранилищ удобрений, а также для создания гидрохимических барьеров на пути загрязненных дренажных вод [7].

Эксплуатация сорбционных материалов в локальных гидротехниче-

ских сооружениях мелиоративных систем, функционирующих в условиях жаркого климата, характеризуется рядом специфических процессов, которые ограничивают их эффективность и долговечность. Ключевые факторы, снижающие работоспособность сорбентов, включают:

- физико-механическую деградацию, проявляющуюся в закупорке пор взвешенными и коллоидными частицами (кольтматация), механическом уплотнении под воздействием давления грунта и гидростатической нагрузки, абразивном износе при турбулентном фильтрационном режиме, а также разрушении структуры материала вследствие циклических процессов насыщения и высыхания [8];

- химико-минералогические изменения, включающие солевую деградацию, обусловленную кристаллизацией солей с образованием цементирующих налетов в порах, термоокислительную деструкцию под воздействием высоких температур (45–60 °С) и ультрафиолетового излучения, гидролиз с изменением химической структуры сорбента, а также растворение его компонентов в зависимости от сдвигов кислотно-щелочного баланса [9];

- биологическую деградацию, выражающуюся в биообрастании порового пространства микроорганизмами, формировании биопленок, приводящих к механической закупорке пор, биокоррозии поверхности сорбента под действием микробных метаболитов и анаэробном разложении органических компонентов [10];

- термодинамические влияния, связанные с обратимостью сорбционных процессов и десорбцией при температурных колебаниях, снижением сорбционной емкости при повышении температуры для экзотермических реакций, а также изменением кинетики сорбции из-за температурной зависимости диффузионных процессов.

Основные преимущества локального применения сорбентов – возможность выборочного удаления загрязнителей, высокая эффективность при малых объемах загрязнений (до 80–95 %), возможность совместного

использования с биологическими методами очистки, а также безопасность и экономичность эксплуатации [11].

В условиях жаркого климата эффективность сорбентов в ЛГС мелиоративных систем напрямую зависит от их физико-химических свойств. Ключевым требованием является высокая термостабильность, обеспечивающая сохранение сорбционной емкости и структурной целостности при высоких температурах окружающей среды. Современные термостойкие сорбенты, в том числе полимерные, могут сохранять функциональность при температурах до 480–500 °С, что критично для эксплуатации в экстремальных климатических условиях [12].

При оценке рабочих характеристик сорбентов в стандартизированных условиях ключевым параметром является температурный режим испытаний. Согласно ГОСТ, базовые исследования проводятся при температуре 21–23 °С, что соответствует типичным комнатным условиям [13]. Однако для моделирования различных условий эксплуатации температурный диапазон может быть расширен: от 10–12 °С, характерных для северных регионов, до 30 °С и выше в зависимости от специфики климатической зоны и целевого применения материала [14].

Отдельное внимание уделяется тестированию термостойких сорбентов, для которых предусмотрены испытания при температурах до 100 °С и выше. Это позволяет оценить их эффективность в условиях жаркого климата или в технологических процессах, связанных с нагревом [15]. Кроме того, некоторые стандартные методики предусматривают оценку сорбционной емкости в условиях высокой влажности. В таких случаях испытания проводятся при строго контролируемой температуре $(30,0 \pm 0,5)$ °С и относительной влажности около 90 %, что позволяет получить репрезентативные данные о поведении материала в реальных условиях [14].

Важной характеристикой является водоудерживающая способность, которая позволяет сорбентам сохранять необходимый уровень влажности в порах материала. Это не только способствует поддержанию сорбционной

активности, но и положительно сказывается на микроклимате мелиорируемых почв, препятствуя их пересыханию и деградации. Такая способность особенно актуальна в условиях низкой влажности и высокой испаряемости. Ионообменные свойства сорбентов определяют их способность эффективно удалять из почвенных и водных объектов тяжелые металлы, соли жесткости и органические загрязнители. Высокая ионообменная емкость по основным ионам загрязнителей (например, Mg^{2+} , Ca^{2+} , Cr^{3+}) достигается за счет оптимизации структуры и химического состава сорбентов, включая этапы термообработки и модификации [16].

Дополнительно следует учитывать устойчивость материалов к гидролизу и биологической деградации, что продлевает срок службы сорбентов и повышает их экологическую безопасность при длительной эксплуатации. Возможность регенерации сорбентов и сохранение рабочих характеристик после многократного цикла использования является важным технологическим аспектом. [17].

Оптимальные условия применения сорбентов в локальных гидротехнических сооружениях мелиоративных систем включают точное определение дозировки с учетом концентрации загрязнителей, объема сточных вод и задач по очистке. Так, дозировка сорбентов для удаления тяжелых металлов варьируется в пределах 0,5–2 г/л воды, тогда как для очистки от органических загрязнителей рекомендуются дозы 1–5 г/л. Выбор дозировки осуществляется на основе предварительного анализа воды с целью обеспечения максимальной эффективности очистки [18]. Частота внесения сорбентов определяется уровнем загрязнения и сезонностью. При высоком загрязнении целесообразно проводить внесение ежемесячно или еженедельно, а при низких концентрациях загрязнителей достаточно внесения один раз в сезон. Мониторинг качества воды служит основой для корректировки режимов внесения сорбентов [19]. Технологии введения сорбентов включают гидравлические методы, когда сорбент растворяется и распределяется

посредством орошения или насосных систем, что обеспечивает равномерное распределение в водоеме.

Механические методы предусматривают использование специализированных установок для внесения сорбентов с дополнительным смешиванием их с водными потоками для повышения сорбционной активности. Инъекционные технологии обеспечивают глубокое проникновение сорбентов в водные массы, что повышает эффективность очистки локальных сооружений [20]. В локальных гидротехнических сооружениях используются различные типы сорбентов, которые классифицируются по происхождению, составу и механизму действия. Они применяются в основном для очистки поверхностных и сточных вод от нефтепродуктов, масел и других загрязнений [21]. Приведена классификация сорбентов по нескольким основным критериям (таблица 1).

Таблица 1 – Систематизация сорбентов по ключевым признакам

Table 1 – Sorbent classification by key features

Критерий классификации	Тип сорбентов	Ключевые характеристики и примеры
1	2	3
По механизму сорбции	Абсорбенты	Поглощают вещества на развитой поверхности (активированный уголь, силикагель)
	Адсорбенты	Поглощают вещество во всем объеме, образуя раствор (некоторые полимерные пены, жиры)
	Химические поглотители	Связывают загрязнения за счет химической реакции (некоторые реагенты)
	Ионообменные сорбенты (иониты)	Поглощают из растворов одни ионы, выделяя другие (ионообменные смолы)
По происхождению и материалу	Углеродные	Производятся на основе углеродных материалов (активированный уголь, углеродные волокна). Высокая эффективность против органических веществ
	Неорганические	Включают природные материалы и синтетические продукты (цеолиты, сапропели, силикагели, алюмогели)
	Органические (природные и синтетические)	К ним относятся материалы на основе растительного сырья (опилки, лигнин, хитозан, кокосовые маты, торф, рисовая соломка, кукурузные рыльца, волокна сахарного тростника, шелуха орехов, семечек) и синтетические полимеры (полиуретановые пены)

Продолжение таблицы 1

Table 1 continued

1	2	3
По структуре пористости	Микропористые	Размер пор менее 2 мм. Эффективны для поглощения растворенных загрязнений
	Мезопористые	Размер пор от 2 до 5 мм
	Макропористые	Размер пор более 5 мм. Выполняют транспортную функцию

Современные сорбирующие материалы, используемые в гидротехнических сооружениях на мелиоративных системах, должны соответствовать ряду требований [22]:

- высокая эффективность: высокая сорбционная емкость по отношению к целевым загрязнителям (пестицидам, остаткам удобрений); хорошая удерживающая способность;
- экологичность: безопасность для окружающей среды как в процессе использования, так и после утилизации;
- экономичность: относительно низкая стоимость и, по возможности, возможность регенерации и повторного использования;
- долговечность: циклы фильтрации без кольматации должны продолжаться не менее 190–365 дней;
- работа и сохранение фильтрационных свойств в различных климатических условиях;
- технологичность: удобность применения, хранения и утилизации.

Композитные и металлоорганические сорбенты объединяют природные и синтетические компоненты, демонстрируя высокую селективность и устойчивость к агрессивным воздействиям окружающей среды. По способу применения сорбенты могут загружаться в фильтры и колодцы для очистки дренажного стока или смешиваться с загрязненными массами для абсорбции внутри грунта или воды. Основными характеристиками, определяющими эффективность сорбентов, являются пористость, химическая стабильность и термостойкость, механическая прочность, а также се-

лективность к определенным загрязнителям, таким, как органика и пестициды. В условиях жаркого климата рекомендуется использовать сорбенты, способные сохранять свою структуру и адсорбционные свойства при высоких температурах и под воздействием температурных колебаний, устойчивые к гидро- и фотодеструкции с учетом интенсивного солнечного излучения и возможного увлажнения. Для упрощения обслуживания эффективны съемные и легкозаменяемые фильтрующие элементы. При значительном загрязнении и механических нагрузках предпочтение отдается композитным и сорбентам на основе природных материалов.

Важны контроль и профилактика колюматации, а также регулярные регенерационные процедуры с применением тепловых и химических методов, что способствует продлению срока службы сорбентов и сохранению их эффективности в жарком климате [23]. Для жаркого климата рекомендуются сорбенты с высокой термостойкостью и механической прочностью, устойчивые к гидро- и фотодеструкции.

Выводы. Применение сорбентов в локальных гидротехнических сооружениях на мелиоративных системах представляет собой высокоэффективное и экономически целесообразное решение для повышения устойчивости мелиоративных систем в условиях жаркого климата. Интеграция сорбционных технологий в конструкции валов-фильтров, облицовок каналов, фильтрующих колодцев и подземных барьеров позволяет осуществлять целевую очистку воды непосредственно в местах возникновения загрязнений, предотвращая деградацию почв и водных объектов.

Ключевым выводом является необходимость учета специфических факторов аридной среды, которые существенно ограничивают долговечность и производительность сорбентов. Физико-механическая деградация, химико-минералогические изменения, интенсифицируемые высокими температурами и ультрафиолетовым излучением, а также биологическое обрастание диктуют жесткие требования к выбору материалов. Наибольшую

эффективность в таких условиях демонстрируют такие термостабильные, механически прочные сорбенты, устойчивые к гидролизу и фотодеструкции, как цеолиты, шунгит, модифицированные глины и специализированные композитные материалы. Успешная эксплуатация сорбционных ЛГС на мелиоративных системах невозможна без адаптивной системы управления, включающей точный расчет дозировок, выбор оптимальных технологий внесения (гидравлических, механических, инъекционных) и регулярный мониторинг качества воды. Практика использования легко заменяемых фильтрующих элементов (картриджей, кассет) и разработка эффективных методов регенерации, в том числе тепловых и химических, являются важнейшими направлениями для минимизации эксплуатационных затрат и продления срока службы систем. Таким образом, стратегия внедрения сорбционных технологий в мелиоративные системы в условиях жаркого климата должна базироваться на комплексном подходе, объединяющем выбор высоко адаптивных материалов, проектирование специализированных сооружений и внедрение гибкой системы эксплуатационного контроля. Это позволит не только обеспечить высокое качество воды, но и способствовать восстановлению и сохранению плодородия почв и воды в условиях нарастающего дефицита водных ресурсов и экстремальных температур.

Список источников

1. Гибридные сорбенты – мелиоранты для рекультивации загрязненных мышьяком почв / Р. А. Апакашев, М. С. Лебзин, В. В. Юрак, А. Н. Малышев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2022. № 11(1). С. 18–28. DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_18. EDN: XQVMFJ.
2. Перспективы применения биосорбентов для очистки водоемов при ликвидации аварийных разливов нефти / Е. А. Артюх, А. С. Мазур, Т. В. Украинцева, Л. В. Костюк // Известия Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета). 2014. № 26(52). С. 58–66. EDN: TBCVVZ.
3. Ким, А. Н., Михайлов, А. В. Очистка поверхностного стока с урбанизированных территорий на локальных пассивных системах. Вода и экология: проблемы и решения. 2017. № 4(72), С. 40–52. EDN: YPORMI.
4. Ханов Н. В., Еремеев А. В. Обзор применения современных геосинтетических материалов в гидротехническом строительстве //Междунар. науч. конф. молодых ученых и специалистов, посвящ. 150-летию РГАУ-МСХА имени К. А. Тимирязева: сб. ст., г. Москва, 2–3 июня 2015 г. М.: РГАУ, 2015. С 336-339. EDN: YTQIMY.
5. Bhatnagar A., Sillanpää M. Utilization of agro-industrial and municipal waste mate-

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 122–137.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 97, no. 3. P. 122–137.

rials as potential adsorbents for water treatment – A review // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 157, iss. 2-3. P. 277–296. DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.007.

6. Савкин, Д. А. Композитные водоотводные системы на мостовых и дорожных сооружениях // Дорожники. 2014. № 2(2). С. 50–53. EDN: YUNSOT.

7. Tsolaki E., Pitta P., Diamadopoulos E. Electrochemical disinfection of simulated ballast water using *Artemia salina* as indicator // Chemical Engineering Journal. 2010. Vol. 156, no. 2. P. 305–312. DOI: 10.1016/j.cej.2009.10.021. EDN: NWOZXH.

8. Васильева Ж. В., Тришина А. С. Оценка эффективности органических материалов в качестве сорбентов для ликвидации аварийных разливов нефти в условиях арктической акватории // Вестник Мурманского государственного технического университета. 2024. Т. 27, № 2. С. 142–157. DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-2-142-157. EDN: NYAMOP.

9. Соловьева Л. В., Ушакова Е. С. Изменение свойств углеродных сорбентов в результате введения в их состав минеральных добавок // Химия и химическая технология: достижения и перспективы: сб. материалов V Всеросс. конф., г. Кемерово, 26–27 нояб. 2020 г. Кемерово: Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, 2020. С. 87.1–87.5. EDN: OQTERK.

10. Improving the surface properties of adsorbents by surfactants and their role in the removal of toxic metals from wastewater: A review study / S. Tamjidi, B. K. Moghadas, F. Shakerian Khoo [et al.] // Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B. 2021. Vol. 148. P. 775–795. DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.003. EDN: TDDDYJ.

11. Gupta V.K., Suhas. Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review // Journal of Environmental Management. 2009. Vol. 90, iss. 8. P. 2313–2342. DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.11.017.

12. Денисенко О. С. Наиболее эффективные мероприятия по возмещению вреда водным биоресурсам с учетом региональных особенностей в экосистемах Азово-Черноморского рыбохозяйственного бассейна // Экологический вестник Северного Кавказа. 2019. Т. 15, № 1. С. 58–62. EDN: YYGDGP.

13. Современные методы анализа и средства измерения сорбционных свойств магнитосорбентов / И. В. Долбня, Е. А. Татаринцева, К. В. Козьмич, М. В. Комиссаренко, А. М. Захаревич // Стандартные образцы. 2017. № 1, С. 43–55. DOI: 10.20915/2077-1177-2017-13-1-43-55. EDN: YSZYNZ.

14. Веницианов Е. В. Роль процессов сорбции в окружающей среде // Сорбционные и хроматографические процессы. 2007. Т. 7. № 6. С. 926–935. EDN: KBDALJ.

15. Особенности очистки воды от нефтепродуктов с использованием нефтяных сорбентов, фильтрующих материалов и активных углей / Е. В. Веприкова, Е. А. Терещенко, Н. В. Чесноков, М. Л. Щипко, Б. Н. Кузнецов // Журнал СФУ. Серия: Химия. 2010. № 3. С. 285–304. EDN: NBPYOH.

16. Малышкина Е. С. Классификация сорбентов, используемых в технологиях очистки сточных вод от нефтепродуктов // Градостроительство и архитектура. 2020. Т. 10, № 3(40). С. 26–34. DOI: 10.17673/Vestnik.2020.03.5. EDN: JJXPRT.

17. Пашаян А. А., Нестеров А. В. Создание нефтепоглощающих сорбентов совместной утилизацией древесных опилок и нефтяных шламов // Вестник Казанского технологического университета. 2017. Т. 20, № 9. С. 144–147. EDN: YNTPUD.

18. Water sorption-based thermochemical storage materials: A review from material candidates to manufacturing routes / A. Palacios¹, M. E. Navarro, C. Barreneche, Y. Ding // Frontiers in Heat and Mass Transfer. 2022. Vol. 2. DOI: 10.3389/fther.2022.1003863.

19. Айдаржанкызы Б. Анализ окислительно-сорбционных технологий для подготовки питьевой воды // Молодой ученый. 2020. № 46(336). С. 3–6. EDN: GEAVKI.

20. Журкин Н. Н., Алибеков С. Я. Усовершенствование механической очистки

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 122–137.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 97, no. 3. P. 122–137.

сточных вод // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2013. №1(17). С. 92–97. EDN: PYCIRD.

21. Физико-химические свойства сорбентов для очистки водоземлюлионных сточных вод / Д. Д. Фазуллин, Г. В. Маврин, И. Г. Шайхиев, И. С. Гайсин // Вестник Казанского технологического университета. 2015. Т. 18, № 6. С. 259–262. EDN: TSXATZ.

22. Стрельбицкая Е. Б., Соломина А. П. Сорбционно-фильтрующие сооружения в технологиях очистки дренажного стока гидромелиоративных систем Нечерноземной зоны Российской Федерации // Природообустройство. 2020. №4. С. 28–36. DOI: 10.26897/1997-6011/2020-4-28-36. EDN: OFZJKU.

23. Портякова И. С., Мишин И. В., Кустов Л. М. Исследование структурных и адсорбционных свойств высокотемпературных адсорбентов углекислого газа на различных носителях // Журнал физической химии. 2020. Т. 94. № 1. С. 131–135. DOI: 10.31857/S0044453720010264. EDN: JPZNEU.

References

1. Apakashev R.A., Lebzin M.S., Yurak V.V., Malyshev A.N., 2022. *Gibridnye sorbenty – melioranty dlya rekul'tivatsii zagryaznennykh mysh'yakom pochv* [Hybrid sorbents – meliorants for recultivation of arsenic-contaminated soils]. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten' (nauchno-tekhnicheskiy zhurnal)* [Mining Information and Analytical Bulletin (Scientific and Technical Journal)], no. 11(1), pp. 18-28, DOI: 10.25018/0236_1493_2022_111_0_18, EDN: XQVMFJ. (In Russian).

2. Artyukh E.A., Mazur A.S., Ukrainseva T.V., Kostyuk L.V., 2014. *Perspektivy primeneniya biosorbentov dlya ochistki vodoemov pri likvidatsii avariynykh razlivov nefi* [Looking forward to biosorbents future application for ponds' cleaning after emergency oil spills]. *Izvestiya Sankt-Peterburgskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo instituta (tekhnicheskogo universiteta)* [Bulletin of St. Petersburg State Technological Institute (Technical University)], no. 26(52), pp. 58-66, EDN: TBCVVZ. (In Russian).

3. Kim A.N., Mikhailov A.V., 2017. *Ochistka poverkhnostnogo stoka s urbanizirovannykh territoriy na lokal'nykh passivnykh sistemakh* [Urban stormwater treatment on local passive systems]. *Voda i ekologiya: problemy i resheniya* [Water and Ecology: Problems and Solutions], no. 4(72), pp. 40-52, EDN: YPORMI. (In Russian).

4. Khanov N.V., Ereemeev A.V., 2015. *Obzor primeneniya sovremennykh geosinteticheskikh materialov v gidrotekhnicheskoy stroitel'stve* [Review of the application of modern geosynthetic materials in hydraulic engineering]. *Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya molodykh uchonykh i spetsialistov, posvyashchonnaya 150-letiyu RGAU-MSKHA imeni K. A. Timiryazeva: sb. st* [International Scientific Conf. of Young Scientists and Specialists, Dedicated to the 150th Anniversary of the K. A. Timiryazev Russian State Agrarian University – Moscow Agricultural Academy]. Moscow, Russian State Agrarian University, pp. 336-339, EDN: YTQIMY. (In Russian).

5. Bhatnagar A., Sillanpää M., 2010. Utilization of agro-industrial and municipal waste materials as potential adsorbents for water treatment – A review. *Chemical Engineering Journal*, vol. 157, pp. 2-3, pp. 277-296, DOI: 10.1016/j.cej.2010.01.007.es.

6. Savkin D.A., 2014. *Kompozitnye vodootvodnye sistemy na mostovykh i dorozhnykh sooruzheniyakh* [Composite drainage systems on bridge and road structures]. *Dorozhniki* [Road Builders], no. 2(2), pp. 50-53, EDN: YUNSOT. (In Russian).

7. Tsolaki E., Pitta P., Diamadopoulos E., 2010. Electrochemical disinfection of simulated ballast water using *Artemia salina* as indicator. *Chemical Engineering Journal*, vol. 156, no. 2, pp. 305-312, DOI: 10.1016/j.cej.2009.10.021, EDN: NWOZXH.

8. Vasilyeva Zh.V., Trishina A.S., 2024. *Otsenka effektivnosti organicheskikh materialov v kachestve sorbentov dlya likvidatsii avariynykh razlivov nefi v usloviyakh arkticheskoy akvatorii* [Assessing the effectiveness of local organic materials as sorbents for oil spill

response in Arctic waters]. *Vestnik Murmanskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta* [Bulletin of Murmansk State Technical University], vol. 27, no. 2, pp. 142-157, DOI: 10.21443/1560-9278-2024-27-2-142-157, EDN: NYAMOP. (In Russian).

9. Solovieva L.V., Ushakova E.S., 2020. *Izmenenie svoystv uglerodnykh sorbentov v rezul'tate vvedeniya v ikh sostav mineral'nykh dobavok* [Changes in the properties of carbon sorbents as a result of the introduction of mineral additives into their composition]. *Khimiya i khimicheskaya tekhnologiya: dostizheniya i perspektivy: sb. materialov V Vseross. konf.* [Chemistry and Chemical Technology: Achievements and Prospects: Collection of Proceed. of the V All-Russian Conference]. Kemerovo, Kuzbass State Technical University named after T. F. Gorbachev, pp. 87.1–87.5, EDN: OQTERK. (In Russian).

10. Tamjidi S., Moghadas B.K., Shakerian Khoo F., [et al.], 2021. Improving the surface properties of adsorbents by surfactants and their role in the removal of toxic metals from wastewater: A review study. *Process Safety and Environmental Protection: Transactions of the Institution of Chemical Engineers, Part B.*, vol. 148, pp. 775-795, DOI: 10.1016/j.psep.2021.02.003, EDN: TDDYJ.

11. Gupta V.K., Suhas, 2009. Application of low-cost adsorbents for dye removal – A review. *Journal of Environmental Management*, vol. 90, iss. 8, pp. 2313-2342, DOI: 10.1016/j.jenvman.2008.11.017.

12. Denisenko O.S., 2019. *Naibolee effektivnye meropriyatiya po vozmeshcheniyu vreda vodnym bioresursam s uchetom regional'nykh osobennostey v ekosistemakh Azovo-Chernomorskogo rybokhozyaystvennogo basseyana* [About scientific approaches to definition of the most effective compensation actions for compensation of damage to water biological resources taking into account regional features in the ecosystems of the Azov-Black Sea fishery basin]. *Ekologicheskii vestnik Severnogo Kavkaza* [The North Caucasus Ecological Herald], vol. 15, no. 1, pp. 58-62, EDN: YYGDGP. (In Russian).

13. Dolbnya I.V., Tatarintseva E.A., Koz'mich K.V., Komissarenko M.V., Zakharevich A.M., 2017. *Sovremennye metody analiza i sredstva izmereniya sorbtionnykh svoystv magnito-sorbentov* [Modern methods of analysis and instruments measuring sorption properties of magnetic sorbents]. *Standartnye obraztsy* [Measurement Standards], no. 1, pp. 43-55, DOI: 10.20915/2077-1177-2017-13-1-43-55, EDN: YSYNZ. (In Russian).

14. Venitsianov E.V., 2007. *Rol' protsessov sorbtitsii v okruzhayushchey srede* [The Role of Sorption Processes in the Environment]. *Sorbtionnye i khromatograficheskie protsessy* [Sorption and Chromatographic Processes], vol. 7, no. 6, pp. 926-935, EDN: KBDALJ. (In Russian).

15. Veprikova E.V., Tereshchenko E.A., Chesnokov N.V., Shchipko M.L., Kuznetsov B.N., 2010. *Osobennosti ochistki vody ot nefteproduktov s ispol'zovaniem neftyanykh sorbentov, fil'truyushchikh materialov i aktivnykh ugley* [Peculiarity of water purifying from oil products with make use of oil sorbents, filtering materials and active coals]. *Zhurnal SFU. Seriya: Khimiya* [Journal of SFU. Series: Chemistry], no. 3, pp. 285-304, EDN: NBPYOH. (In Russian).

16. Malysheva E.S., 2020. *Klassifikatsiya sorbentov, ispol'zuemykh v tekhnologiyakh ochistki stochnykh vod ot nefteproduktov* [Classification of sorbents used in wastewater purification technologies from petroleum products]. *Gradostroitel'stvo i arkhitektura* [Urban Construction and Architecture], vol. 10, no. 3(40), pp. 26-34, DOI: 10.17673/Vestnik.2020.03.5, EDN: JJXPRT. (In Russian).

17. Pashayan A.A., Nesterov A.V., 2017. *Sozdanie neftepogloshchayushchikh sorbentov sovmestnoy utilizatsiei drevesnykh opилоk i neftyanykh shlamov* [Creation of oil-absorbing sorbents by joint utilization of sawdust and oil sludge]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], vol. 20, no. 9, pp. 144-147, EDN: YNTPUD. (In Russian).

18. Palacios A., Navarro M.E., Barreneche C., Ding Y., 2022. Water sorption-based thermochemical storage materials: A review from material candidates to manufacturing routes. *Frontiers in Heat and Mass Transfer*, vol. 2, DOI: 10.3389/fther.2022.1003863.

19. Aidarzhankyzy B., 2020. *Analiz okislitel'no-sorbtionnykh tekhnologiy dlya pod-*

Пути повышения эффективности орошаемого земледелия. 2025. Т. 97, № 3. С. 122–137.
Ways of Increasing the Efficiency of Irrigated Agriculture. 2025. Vol. 97, no. 3. P. 122–137.

gotovki pit'yevoy vody [Analysis of oxidation-sorption technologies for drinking water treatment]. *Molodoy uchenyy* [Young Scientist], no. 46(336), pp. 3-6, EDN: GEAVKI. (In Russian).

20. Zhurkin N.N., Alibekov S.Ya., 2013. *Usovershenstvovanie mekhanicheskoy ochistki stochnykh vod* [Improvement of mechanical wastewater treatment]. *Vestnik Povolzhskogo gosudarstvennogo tekhnologicheskogo universiteta. Seriya: Les. Ekologiya. Prirodopol'zovanie* [Bulletin of the Volga Region State Technological University. Series: Forest. Ecology. Environmental Engineering], no. 1(17), pp. 92-97. EDN: PYCIRD. (In Russian).

21. Fazullin D.D., Mavrin G.V., Shaikhiev I.G., Gaysin I.S., 2015. *Fiziko-khimicheskie svoystva sorbentov dlya ochistki vodoemul'sionnykh stochnykh vod* [Physicochemical properties of sorbents for the treatment of water-emulsion wastewater]. *Vestnik Kazanskogo tekhnologicheskogo universiteta* [Bulletin of Kazan Technological University], vol. 18, no. 6, pp. 259-262, EDN: TSXATZ. (In Russian).

22. Strelbitskaya E.B., Solomina A.P., 2020. *Sorbtsionno-fil'truyushchie sooruzheniya v tekhnologiyakh ochistki drenazhnogo stoka gidromeliorativnykh sistem Nechernozemnoy zony Rossiyskoy Federatsii* [Sorption-filtration structures in technologies of drainage flow treatment of irrigation and drainage systems of the Non-Chernozem zone of the Russian Federation]. *Prirodoobustroystvo* [Environmental Engineering], no. 4, pp. 28-36, DOI: 10.26897/1997-6011/2020-4-28-36, EDN: OFZJKU. (In Russian).

23. Portyakova I.S., Mishin I.V., Kustov L.M., 2020. *Issledovanie strukturnykh i adsorbtsionnykh svoystv vysokotemperaturnykh adsorbentov uglekislogo gaza na razlichnykh nositelyakh* [Studying the structural and adsorption properties of high-temperature adsorbents of carbon dioxide supported on various carriers]. *Zhurnal fizicheskoy khimii* [Russian Journal of Physical Chemistry], vol. 94, no. 1, pp. 131-135, DOI: 10.31857/S0044453720010264, EDN: JPZNEU. (In Russian).

Информация об авторах

Х. Кабтул – аспирантка 4 курса, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, halak93@gmail.com;

И. В. Глазунова – доцент, кандидат технических наук, доцент, Российский государственный аграрный университет – МСХА имени К. А. Тимирязева, Москва, Российская Федерация, ivglazunova@mail.ru.

Information about the authors

H. Kabtoul – 4th year Postgraduate Student, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, halak93@gmail.com;

I. V. Glazunova – Associate Professor, Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Russian State Agrarian University – Moscow Timiryazev Agricultural Academy, Moscow, Russian Federation, ivglazunova@mail.ru.

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Все авторы в равной степени несут ответственность за нарушения в сфере этики научных публикаций.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

All authors are equally responsible for ethical violations in scientific publications.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 23.09.2025; одобрена после рецензирования 22.10.2025; принята к публикации 18.11.2025.

The article was submitted 23.09.2025; approved after reviewing 22.10.2025; accepted for publication 18.11.2025.