

Научная статья
УДК 628.3
doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.003

ОЧИСТКА ПРОМЫШЛЕННЫХ СТОЧНЫХ ВОД ОТ ВЗВЕШЕННЫХ ВЕЩЕСТВ МЕТОДОМ ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКОЙ КОАГУЛЯЦИИ

**Андрей Александрович Горячев^{1,2}, Антон Викторович Светлов³,
Любовь Павловна Кудрявцева⁴, Дмитрий Викторович Макаров⁵**

¹Лаборатория природоподобных технологий и техносферной безопасности Арктики
Центра наноматериаловедения КНЦ РАН, Апатиты, Россия

^{2–5}Институт проблем промышленной экологии Севера КНЦ РАН, Апатиты, Россия

^{1,2}a.goryachev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

³a.svetlov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3254-0808>

⁴l.kudryavceva@ksc.ru

⁵makarov@inep.ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Аннотация

Проведены лабораторные эксперименты по очистке промышленных сточных вод (исходная концентрация — 396 мг/л) и речной воды (исходная концентрация — 122 мг/л) от взвешенных веществ методом электрохимической коагуляции. При использовании стальных пластин в качестве электродов и силе тока 6 А эффективность очистки сточных вод от взвешенных веществ составила 98,2 %. Отмечена высокая эффективность очистки от фосфат- и фторид-ионов. Для эффективной работы при большом объеме сточных вод рекомендовано соблюдение условий установки и эксплуатации электродов: предварительное удаление грубодисперсных примесей, поддержание заданной силы тока и напряжения, соблюдение режима переполюсовки электродов, очистка межэлектродного пространства от пены. На примере загрязнённой воды из заполярной реки показана эффективность проведения процесса электрокоагуляции при пониженных температурах.

Ключевые слова:

промышленные сточные воды, взвешенные вещества, электрохимическая коагуляция, шлам водоочистки

Благодарности:

исследования выполнены в рамках тем НИР № FMEZ-2022-0022 и № FMEZ-2022-0010.

Для цитирования:

Очистка промышленных сточных вод от взвешенных веществ методом электрохимической коагуляции / А. А. Горячев [и др.] // Труды Кольского научного центра РАН. Серия: Естественные и гуманитарные науки. 2025. Т. 4, № 3. С. 33–44. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.003.

Original article

REMOVAL OF SUSPENDED SOLIDS FROM INDUSTRIAL WASTEWATER BY ELECTROCHEMICAL COAGULATION

Andrey A. Goryachev^{1,2}, Anton V. Svetlov³, Lyubov P. Kudryavtseva⁴, Dmitriy V. Makarov⁵

¹Laboratory of Nature-Inspired Technologies and Environmental Safety of the Arctic, Nanomaterials Science Center of the Kola Science Centre of the RAS, Apatity, Russia

^{2–5}Institute of North Industrial Ecology Problems KSC RAS, Apatity, Russia

^{1,2}a.goryachev@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-9854-0659>

³a.svetlov@ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3254-0808>

⁴l.kudryavceva@ksc.ru

⁵makarov@inep.ksc.ru, <https://orcid.org/0000-0003-0097-6583>

Abstract

Laboratory experiments were conducted to remove suspended solids from industrial wastewater (initial concentration — 396 mg/l) and river water (initial concentration — 122 mg/l). Using electrocoagulation method with steel plates as electrodes and a current of 6 A, the suspended solids removal efficiency was 98.2 %. High efficiency of phosphate and fluoride ion removal was also noted. For the efficient operation of electrodes, especially in the case of large volumes of wastewater, it is important to comply with the operating conditions of the equipment and electrodes, namely, preliminary removal of coarse impurities, maintaining a given current and voltage, observing the electrode reversal mode, as well as cleaning the interelectrode space from foam. The efficiency of the electrocoagulation process at low temperatures is demonstrated using contaminated river water.

Keywords:

industrial wastewater, total suspended solids, electrochemical coagulation, water treatment sludge

Acknowledgements:

The research was carried out within the framework of the NIR No. FMEZ-2022-0022, FMEZ-2022-0010.

For citation:

Removal of suspended solids from industrial wastewater by electrochemical coagulation / A. A. Goryachev [et al.]
// Transactions of the Kola Science Centre of RAS. Series: Natural Sciences and Humanities. 2025. Vol. 4, no. 3.
P. 33–44. doi:10.37614/2949-1185.2025.4.3.003.

Введение

Процесс обогащения руды сопряжён с высоким потреблением пресной воды, загрязняемой в ходе технологического цикла широким спектром веществ. Различают два типа использования свежей воды в процессе обогатительного производства — прямоточный и оборотный. Оборотный тип подразумевает многократное использование воды без сброса в водоём; её очистку проводят перед кондиционированием для эффективного повторного использования. При прямоточном использовании вода задействуется в процессе обогащения однократно, после чего подаётся на очистку и сброс в водоём.

Обогатительное производство связано с интенсивным поступлением взвешенных веществ (ВВ) в технологическую воду, поэтому в ряде случаев её повторное использование невозможно. Кроме того, многие предприятия сталкиваются с несовершенством систем очистных сооружений, износом оборудования и необходимостью его модернизации. Подобные недостатки приводят к значительному негативному воздействию на окружающую среду, особенно на крупномасштабных производствах. Эта проблема проявляется наиболее остро на горно-обогатительных предприятиях, где образуются огромные объёмы сточных вод. Негативное воздействие выражается в изменении химического состава воды, нарушении функционирования водных экосистем и угнетении гидробионтов [1, 2]. В составе сточных вод предприятий Мурманской области основными загрязняющими веществами, помимо ВВ, являются фосфаты, аммонийный азот, нефтепродукты, ионы железа и никеля, СПАВ, а также нефтепродукты.

Электрохимические методы очистки демонстрируют высокую эффективность удаления ВВ из сточных вод, приводя к значительному (до 95 %) снижению их концентрации и позволяя селективно разделять загрязнители различной природы. Эти методы обеспечивают быстрое протекание реакций за счёт управления электрическим потенциалом, что позволяет минимизировать использование химических реагентов и сокращать время обработки по сравнению с традиционными методами.

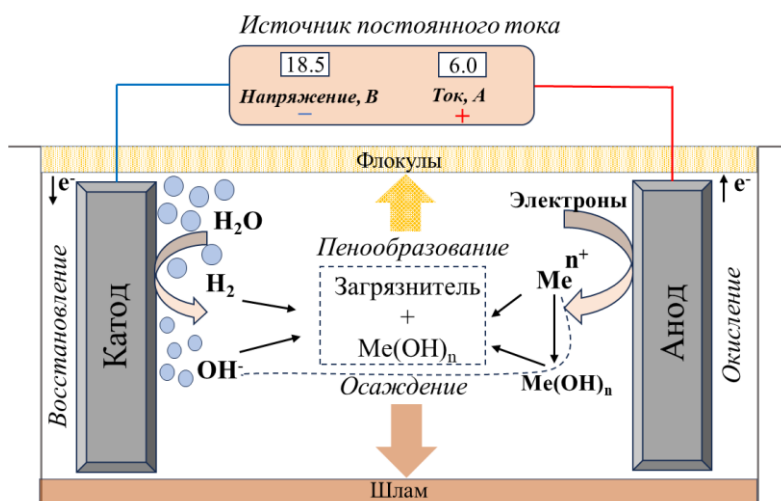


Рис. 1. Схема процесса электрокоагуляции
Fig. 1. Diagram of the electrocoagulation process

Наиболее распространены технологии электрофлотации, гальванокоагуляции, электродиализа и электрического окисления. Для очистки промышленных сточных вод особенно важна возможность

применения электрохимической коагуляции (ЭК) [3–6]. При очистке воды с высоким уровнем загрязнения методом ЭК применяются растворимые аноды из стали и алюминия. Под воздействием тока происходит растворение этих металлов и в воду переходят катионы железа и алюминия. Взаимодействуя с гидроксильными группами, они образуют гидроксиды металлов, что содействует коагуляции. Механизм электрохимической коагуляции (рис. 1) схож с химической, но коагулянт формируется в результате электрохимического растворения анода [7].

В рамках данной работы были исследованы и подобраны оптимальные условия для ЭК для очистки промышленных сточных вод, загрязнённых взвешенными веществами.

Опыт применения электрокоагуляции для очистки промышленных вод от взвешенных веществ

В отечественной практике накоплен значительный опыт применения метода ЭК в лабораторном и полупромышленном масштабах, а также ряд примеров успешного применения данной технологии на промышленных объектах. В исследовании З. Р. Шамсутдиновой и О. Р. Каратаева [8] рассмотрена возможность использования метода ЭК для очистки сточных вод предприятий нефтеперерабатывающей промышленности и способы совершенствования данного процесса. Авторами предложено несколько вариантов сочетания электролизёров с другими методами водоподготовки для повышения эффективности очистки воды: электролизёр-отстойник, электролизёр-флотатор, гальванокоагулятор-электролизёр. Наиболее эффективно очистка проходила в электролизёре-отстойнике: концентрация ВВ снизилась на 95,5 %.

Л. В. Боровская и С. П. Доценко исследовали эффективность ЭК для очистки сточных вод предприятия масложировой промышленности, загрязнённых поверхностно-активными веществами [9]. Очистка сточных вод от ПАВ осложнена тем, что они обладают выраженными поверхностно-активными свойствами. Авторы добились высокого уровня очистки сточных вод и сделали ряд важных выводов: в поле постоянного тока ускоряются процессы формирования и осаждения коагулированной взвеси и улучшается отделение эмульгированных жиров; с увеличением концентрации ВВ и ростом напряжения электрического поля эффективность очистки от остальных загрязнителей возрастает, а газы, выделяющиеся на электродах, облегчают условия очистки за счёт окисления органических примесей.

Примером водоподготовки с использованием метода ЭК может служить технология «Водопад», разработанная специалистами ООО «ТюменНИИгипрогаз» и успешно реализуемая на предприятиях нефтегазовой отрасли по всей России. На данный момент действует более 100 станций «Водопад» мощностью от 5 до 8000 м³ в сутки. На их примере было проведено сравнение с иными способами очистки вод и показано, что схема на основе ЭК экономичнее ультрафильтрационных баромембранных станций аналогичной производительности [10]. Станция электрокоагуляционной очистки показала свою эффективность и применимость в климатических условиях Крайнего Севера.

Зачастую предприятия отдают предпочтение реагентному методу очистки сточных вод, однако имеется и опыт перехода от реагентного метода к электрохимическому. В работе Л. Ф. Долиной представлены результаты исследования сточных вод гальванического цеха с повышенной концентрацией ионов хрома, никеля, меди, железа, цинка, а также нитратов, хлоридов, сульфатов, жиров и нефтепродуктов [11]. На предприятии было решено отказаться от используемого реагентного метода вследствие снижения эффективности процесса очистки сточных вод и внедрить систему очистки по методу ЭК. Это позволило сравнить эффективность двух методов и выявить значительное повышение эффективности очистки методом ЭК сточных вод гальванического цеха от ВВ и ионов металлов, в особенности железа. В результате внедрения метода ЭК предприятие достигло требуемых нормативов очистки сточных вод, более того, внедрённая очистная установка оказалась компактной и заняла небольшую производственную площадь.

Целесообразно упомянуть основные работы по использованию метода ЭК для очистки сточных вод от ВВ. Отмечено [12], что с повышением концентрации ВВ до 100 мг/л сточных вод эффективность процесса ЭК снижается. Ими представлен теоретический расчёт расхода энергии на растворение 1 г металла, составляющий 2,9 и 12 Вт·ч на 1 г железа и алюминия соответственно.

В зарубежной литературе механизм очистки сточных вод от ВВ представлен более полно. Так, эффективность очистки воды с концентрацией ВВ 143 мг/л при силе тока 0,4 и 0,8 А и продолжительности воздействия 5 мин достигла 92,1 и 95,4 % соответственно [13]. При плотности тока 5,3 мА/см² и продолжительности воздействия 30 мин эффективность очистки от ВВ составила 76,5 %, от ионов тяжёлых металлов — от 60 % (хром) до 82 % (медь) и 99 % (цинк) [14]. При плотности тока 25 А/м² эффективность очистки промышленных сточных вод от ВВ равнялась 81 % [15]. В зависимости от скорости расхода воды — 1,1, 1,7 и 3,3 мл/с эффективность очистки от ВВ составила 92, 86 и 62 % соответственно [16]. Обобщая литературные данные, можем заключить, что в основе очистки промышленных сточных вод от ВВ лежит наличие у них заряда, разрушение которого в межэлектродном пространстве приводит к укрупнению и осаждению взвешенных частиц. Для очистки от взвесей целесообразно использовать железные или алюминиевые электроды.

Метод ЭК детально рассмотрен и для очистки от основных анионов, при которой выбор материала электродов имеет гораздо большее значение. Для удаления аммоний-иона показана высокая (более 90 %) эффективность применения комбинации алюминиевых (Al/Al блок) и стальных (Al/SS блок) электродов [17], тогда как использование исключительно алюминиевых электродов при схожих условиях позволяло достигать лишь 80 % очистки [18], а стальных (Fe/Fe блок) — лишь 15 % [19]. Наиболее высокая степень очистки от фторид-иона достигалась Al/Al блоком электродов в кислой среде (рН < 7,0), что объясняется способностью алюминиевых электродов инициировать образование нерастворимого фторида алюминия, который осаждается в процессе электрохимической обработки [20]. Для очистки от фосфатов одинаково эффективны алюминиевые и железные блоки электродов, позволяющие снизить концентрацию фосфатов 170 мг/л на 98 % [21].

При очистке от нитрит-иона положительный результат (97 %) достигался Fe/Fe блоком электродов [19], тогда как при использовании алюминиевых пластин степень очистки составляла лишь 80 % [18]. Нитрат-ион более эффективно (на 92 %) удалялся из загрязнённой воды комбинированным Al/Fe блоком электродов, так как восстановительная среда в электрокоагуляторе, состоящем только из железных электродов, препятствовала эффективной очистке более 80 % [16].

Основная проблема применения ЭК для очистки от анионов, в особенности от нитратов и сульфатов, заключается в том, что для достижения требуемых концентраций загрязнителей энергетические затраты чрезвычайно высоки и данный подход не представляется целесообразным.

Вопрос эффективной очистки от ионов тяжёлых металлов стоит особенно остро для Мурманской области. Многократно показана эффективность очистки промышленных вод методом ЭК от ионов меди. Выявлено, что очистка от меди существенно не зависит ни от традиционно используемого материала электродов, ни от наличия в очищаемой воде анионов — сульфатов, нитратов, хлоридов [22]. В большинстве исследований эффективность очистки промышленных вод от ионов меди превышала 99 %. Особенность очистки от ионов никеля заключается в том, что при концентрации от 50 до 400 мг/л она проходит при невысоких значениях тока. Эффективность очистки от ионов кобальта рассмотрена не столь детально. Высокая (от 95 до 100 %) степень очистки Al/Al блоком электродов получена при использовании NaCl для поддержания уровня рН, равного 7 [20].

Имеющийся опыт применения метода ЭК показывает, что при осуществлении процесса необходимо обращать внимание на следующие показатели: плотность тока, напряжение, коэффициент эффективности использования напряжения, выход по току и выход по энергии. При рациональном определении этих параметров процесса технологии ЭК могут быть перспективны и для внедрения на крупных предприятиях, в том числе горнопромышленных.

Методика лабораторных испытаний метода электрокоагуляции для очистки сточных вод горно-обогатительного предприятия

Использовали образцы сточных вод горно-обогатительного предприятия, характеризующихся следующими концентрациями загрязнителей (мг/л): Al^{3+} — 0,263, $\text{Fe}_{\text{общ}}$ — < 0,011, NH_4^+ — 0,213, NO_2^- — 0,09, NO_3^- — 19,5, SO_4^{2-} — 165, PO_4^{3-} — 0,292. Общая концентрация ВВ ($C_{\text{ВВ}}$) — 396 мг/л.

Эксперименты по очистке воды методом ЭК выполняли по следующей схеме: в ёмкость из органического стекла, заполненную загрязнённой водой (1 л), помещали электродный блок из девяти пластин. Материал электродов: сталь марки Ст3, алюминий, комбинированный блок из алюминиевых и стальных пластин (5 анодов и 4 катода). Площадь одной пластины — 142,5 см² (L — 15 см, B — 9,5 см, s — 0,1 см), расстояние между пластинами — 1,5 см. Напряжение на электроды подавали с помощью источника постоянного тока MPS-3020 (Matrix Technology Inc., Китай). Ток варьировали от 1 до 9 А, продолжительность электрокоагуляции — от 1 до 5 мин. После электролиза воду отстаивали в течение 30 мин и 24 ч, затем измеряли концентрации ВВ и величину pH.

Проводили исследования по очистке загрязнённой воды реки Саамка (г. Кировск, Мурманская обл.) методом ЭК при различной исходной температуре воды. Воду охлаждали в климатической камере до различных температур: 5, 10, 15, 20 °С, затем проводили ЭК при токе 6 А (Fe/Fe блок), варьируя продолжительность процесса от 1 до 5 мин. В образцах воды определяли концентрацию ВВ (TSS — total suspended solids), общее содержание растворённых твёрдых веществ (TDS — total dispersed solids), электропроводность (ЕС) и величину pH после 30 мин и 24 ч отстаивания. Показатели исходной воды были следующими: $C_{ВВ}$ — 122 мг/л, TDS — 212 ppm, ЕС — 424 мкСм/см, pH — 7,937.

Концентрации ВВ определяли с помощью портативного измерителя мутности HI98713-02 (Hanna Instruments Inc., Италия), величину pH — на иономере И-160 МИ (ООО «Измерительная техника», Москва, Россия). Концентрации ионов алюминия, железа, аммоний-иона, нитрат-нитрит ионов, сульфат-иона и фосфат-иона определены в Центре коллективного пользования ИППЭС КНЦ РАН. Исходные взвеси и шлам после обработки воды электрокоагуляцией анализировали методом рентгенофазового анализа на дифрактометре Rigaku MiniFlex-600 (Rigaku Corp., Япония). Построение дифрактограмм выполняли с использованием программного продукта Origin (OriginLab Corp., США). Результаты обрабатывали в программе Microsoft Excel.

Результаты

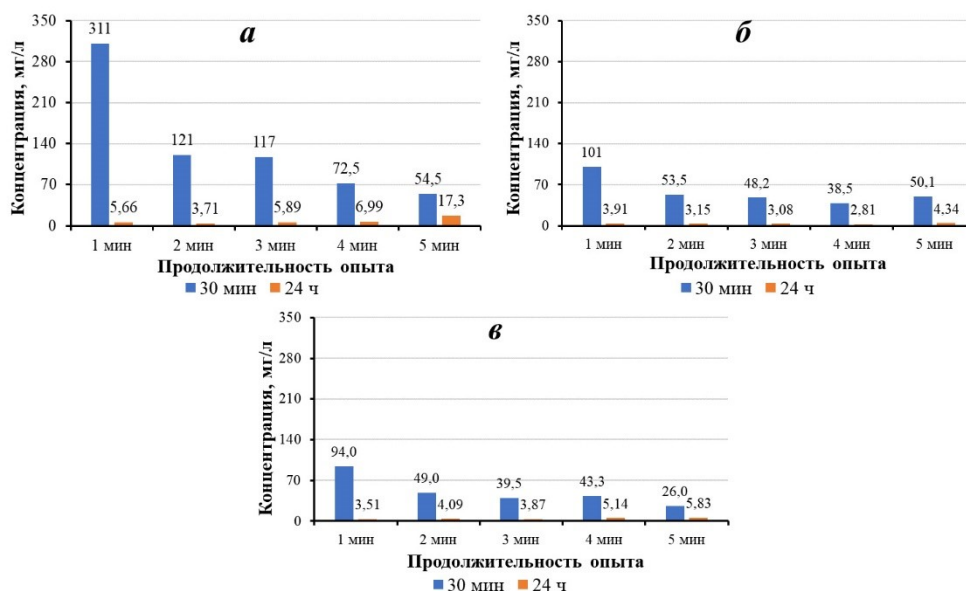


Рис. 2. Изменение концентрации взвешенных веществ в сточных водах (мг/л) после их очистки Fe/Fe блоком электродов при разной силе тока: *a* — 3 А (плотность тока: $i_{\text{анод}}$ — 42,11 А/м²; $i_{\text{катод}}$ — 52,63 А/м²); *б* — 6 А ($i_{\text{анод}}$ — 84,21 А/м²; $i_{\text{катод}}$ — 105,26 А/м²); *в* — 9 А ($i_{\text{анод}}$ — 126,32 А/м²; $i_{\text{катод}}$ — 157,89 А/м²)

Fig. 2. Suspended solids concentration (mg/L) in wastewater after treatment with an Fe/Fe electrode unit at various current densities. Current: *a* — 3 А (current density: i_{anode} — 42.11 А/м²; i_{cathode} — 52.63 А/м²), *б* — 6 А (i_{anode} — 84.21 А/м²; i_{cathode} — 105.26 А/м²), *в* — 9 А (i_{anode} — 126.32 А/м²; i_{cathode} — 157.89 А/м²)

В лабораторном эксперименте эффективность очистки сточных вод от ВВ методом ЭК была выше при использовании Fe/Fe электродного блока. При силе тока 6 А и взаимодействии в течение 4 мин концентрацию ВВ удалось снизить до 7,3 мг/л, то есть эффективность очистки составила 98,2 % (рис. 2).

При использовании Al/Al и Al/Fe блоков для значительного снижения концентрации ВВ ток приходилось повышать до 9 А, что позволяло снизить концентрацию ВВ до 10 мг/л (табл. 1). Для всех блоков электродов увеличение продолжительности процесса до 5 мин не приводило к росту эффективности очистки. Вероятно, при увеличении продолжительности электролиза происходит пассивация поверхности электродов и эффективность очистки сточных вод снижается.

Таблица 1

Изменение химического состава сточных вод после обработки электродами
(ток — 9 А, время обработки — 5 мин)
Variation in the wastewater chemical composition after electrotreatment (at 9 A current for 5 min)

Очистка	Компонент									
	Al ³⁺	Fe _{общ}	NH ₄ ⁺	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	F ⁻	PO ₄ ³⁻	ВВ	pH
	мг/л							мгР/л	мг/л	ед.
Исходная вода	0,263	0,011	0,213	0,09	19,47	165	13,90	0,292	396	8,21
Al/Al блок	19,81	<0,008	0,559	0,99	11,45	154	0,353	0,002	48,7	9,34
Al/Fe блок	18,76	0,011	0,557	0,64	12,01	158	0,293	0,001	13,1	9,32
Fe/Fe блок	0,831	0,013	0,084	0,15	16,07	126	11,29	0,002	6,41	10,6

Наряду с ВВ наблюдалось значительное уменьшение концентрации иных загрязняющих компонентов. Образование в процессе ЭК ионов железа и алюминия способствовало формированию мелкокристаллического осадка фосфатов, что позволило снизить концентрацию фосфат-иона более чем на 99 % при использовании всех трёх блоков электродов. Применение Al/Fe и Al/Al блоков обеспечило значительное снижение концентрации фторид-ионов до 0,293 и 0,353 мг/л соответственно от их начальной концентрации 13,9 мг/л, то есть эффективность очистки составила 97,9 и 97,5 % соответственно. Высокая степень очистки объяснялась тем, что хлопья гидроксида алюминия формировали агломераты плохо растворимого фторида, который выпадал в осадок. Стоит отметить значительное увеличение концентрации ионов алюминия в очищенной воде при использовании Al/Fe и Al/Al блоков, а также незначительный рост pH обработанной воды. Использование Fe/Fe блока оказалось оптимальным для очистки загрязнённой воды данного состава, так как он не допускал вторичного загрязнения.

Фазовый состав шлама, полученного в процессе после ЭК, оказался схож с составом исходных взвесей по содержанию основных минералов. В исходных образцах были обнаружены следующие компоненты: нефелин Na[AlSiO₄], апатит Ca₅[PO₄]₃(F,Cl,OH) и титанит CaTi(SiO₄)O. На рентгеновских дифракционных картинах шлама не были выявлены пики, соответствующие апатиту (рис. 3). Это могло быть связано с образованием рентгеноаморфных алюминиевых и железистых гидроксидов, что привело к снижению относительного содержания апатита.

Учитывая инертность минералов шлама и большой объём загрязнённых промышленных вод (при эффективности очистки 98,2 % масса шлама при обработке 1 м³ воды составит 388,9 г), стоит рассмотреть варианты использования шлама после ЭК. Шлам, полученный при использовании стального электрода, представляет собой густую влажную массу коричневатого цвета, которая при высушивании становится светло-коричневой. Основным направлением применения этого шлама, вероятно, является строительная индустрия (создание композитных строительных материалов, использование в качестве пигмента или наполнителя).

В табл. 2 представлены показатели воды после обработки ЭК и отстаивании в течение 30 мин и 24 ч. Наиболее эффективно очистка от ВВ и TDS проходила при температуре 5 °С: концентрацию этих загрязнителей удалось снизить до 5,8 мг/л (4 мин взаимодействия) и 181 ppm (5 мин взаимодействия) соответственно. Эффективность очистки составила 95,2 и 14,6 %. После 24 ч отстаивания получилось

снизить концентрацию ВВ до уровня менее 1 мг/л, это было достигнуто в опыте с охлаждением воды до 10 °С и последующим электролизом в течение 4 мин, эффективность очистки при таком режиме составила 99,2 %.

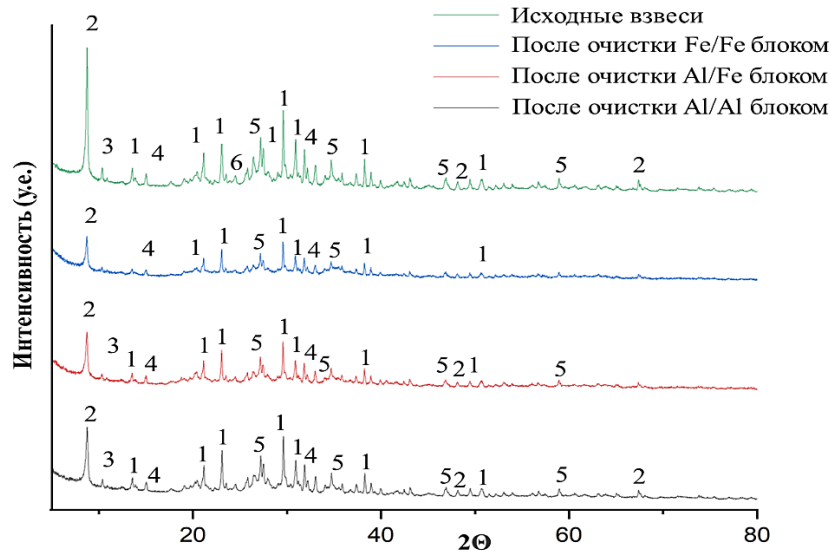


Рис. 3. Дифрактограммы исходного образца взвешенных веществ и образцов после очистки методом электрокоагуляции при силе тока 9 А в течение 5 минут с использованием различных электродных блоков.

Рефлексы: 1 — нефелин; 2 — флогопит $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; 3 — амфибол; 4 — натролит $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 5 — титанит (сфен); 6 — апатит (приводится по: [23])

Fig. 3. XRD-patterns of the initial suspended solids sample and the samples after treatment by electrocoagulation at a current of 9 A for 5 minutes using different electrode units.

Reflections: 1 — nepheline; 2 — phlogopite $\text{KMg}_3(\text{AlSi}_3\text{O}_{10})(\text{OH})_2$; 3 — amphibole; 4 — natrolite $\text{Na}_2[\text{Al}_2\text{Si}_3\text{O}_{10}] \cdot 2\text{H}_2\text{O}$; 5 — titanite (sphene); 6 — apatite (according to [23])

Таблица 2

Результаты очистки охлаждённой до различной температуры воды р. Саамка методом электрокоагуляции (Fe/Fe блок, сила тока — 6 А)
Electrocoagulation treatment results (Fe/Fe electrode unit, 6 A) for Saamka River water cooled to different temperatures

Температура воды, °С	Время взаимодействия, мин	30 мин отстаивания				24 часа отстаивания			
		С, мг/л	TDS, ppm	ЕС, мкСм/см	pH	С, мг/л	TDS, ppm	ЕС, мкСм/см	pH
5	1	24,9	187	374	9,15	2,65	202	404	9,02
	2	17,9	182	364	10,0	2,74	190	380	9,88
	3	7,02	190	380	9,65	1,64	199	398	9,35
	4	5,80	185	370	9,49	1,46	201	402	9,24
	5	9,11	181	362	9,47	1,49	191	382	9,24
10	1	18,4	172	344	9,36	2,24	208	416	8,80
	2	11,4	181	360	9,67	1,40	199	398	9,33
	3	10,7	184	368	10,1	1,29	199	398	9,69
	4	9,69	209	418	10,4	0,99	199	398	9,89
	5	10,6	274	548	10,7	2,29	210	420	10,3

Окончание таблицы 2

Температура воды, °С	Время взаимодействия, мин	30 мин отстаивания				24 часа отстаивания			
		С, мг/л	TDS, ppm	ЕС, мкСм/см	pH	С, мг/л	TDS, ppm	ЕС, мкСм/см	pH
15	1	22,3	211	422	9,25	2,03	211	422	8,28
	2	9,74	211	422	9,95	1,66	196	392	8,86
	3	7,89	222	444	10,3	2,60	198	396	9,24
	4	5,97	244	488	10,6	2,56	198	396	9,53
	5	6,79	297	594	10,8	2,17	208	416	9,95
20	1	19,1	213	416	9,21	2,89	198	396	8,66
	2	17,7	210	420	9,43	6,44	192	384	8,93
	3	12,2	217	434	10,1	3,23	200	400	9,08
	4	12,5	219	438	10,1	2,17	200	400	9,13
	5	14,4	207	414	10,3	3,66	217	434	8,30

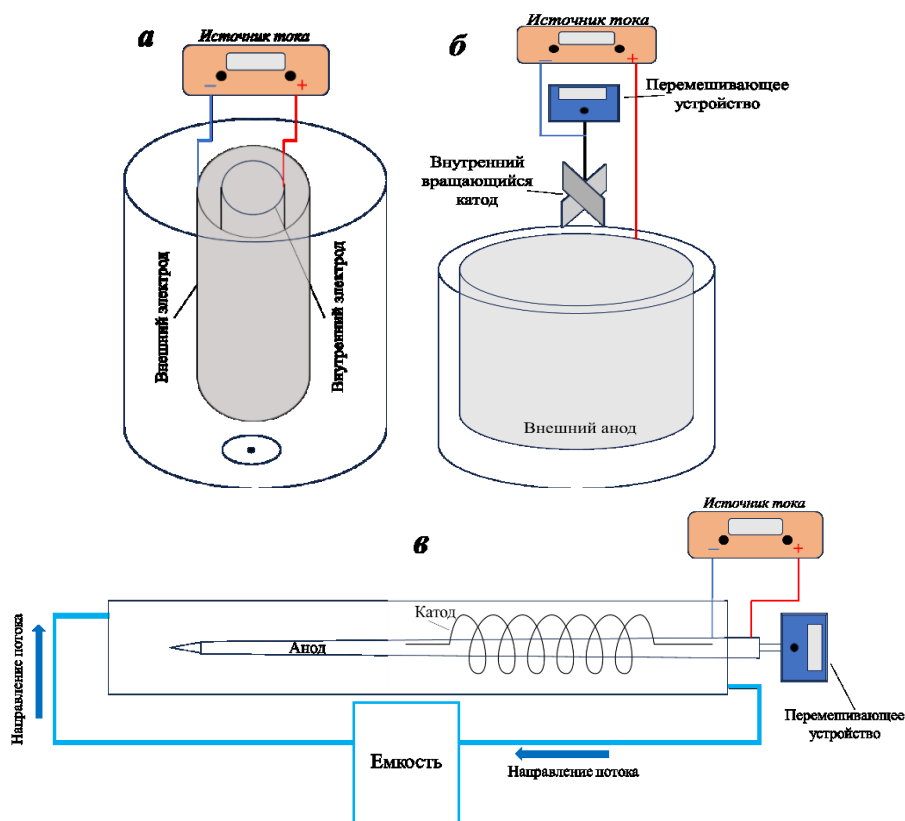


Рис. 4. Конструктивные разновидности электрокоагуляторов: *а* — с цилиндрическими электродами; *б* — с вращающимся катодом; *в* — со стержневым анодом и спиральным катодом
Fig. 4. Design varieties of electrocoagulators: *a* — with cylindrical electrodes, *б* — with a rotating cathode, *в* — with a rod anode and a spiral cathode

В промышленном масштабе проведение процесса ЭК подразумевает использование электрокоагулятора — камеры со сменным набором электродов. Отечественные электрокоагуляторы производительностью от 5 до 100 м³/ч выпускает АО «Гормашэкспорт» (г. Новосибирск). Наиболее

широко используемый тип электрокоагулятора представляет собой открытую ёмкость с пластинчатыми электродами (см. рис. 1), однако типы электрокоагуляторов довольно разнообразны и подбираются с учётом требований по составу и объёму очищаемой жидкости. Применение нашли электрокоагуляторы с цилиндрическими электродами, в которых катод размещён внутри анода (рис. 4а). Предложена разновидность электрокоагулятора с перемешивающим устройством [24], в качестве импеллера в нём выступают две металлические пластины (катод), а анод представлен внешним цилиндром (рис. 4б). Такой подход позволяет гомогенизировать очищаемую жидкость, предотвращая осаждение ВВ на дне камеры. Перспективным является использование электрокоагулятора с электродами винтового типа (рис. 4в) для равномерного распределения жидкости вокруг анодного стержня и расположенного вокруг него спирального катода. Такую установку можно сделать вращающейся, что увеличит эффективность очистки.

Для поддержания высокой эффективности процесса ЭК, особенно при большом объёме сточных вод, важно соблюдать условия эксплуатации установки и электродов: предварительно удалять грубодисперсные примеси, поддерживать заданный ток и напряжение, соблюдать режим переполюсовки электродов, очищать межэлектродное пространство от пены. В ходе лабораторных исследований была отмечена пассивация поверхности электродов, тормозящая процесс ЭК. Для снижения действия этого эффекта применяются главным образом переполюсовка электродов, их механическая очистка и промывка очищающими растворами.

Заключение

При условии подбора оптимального режима электрохимическая коагуляция позволит эффективно удалять из сточных вод взвешенные вещества и сопутствующие загрязнители, а следовательно, она кажется эффективным и перспективным методом очистки промышленных сточных вод. Образующийся при очистке осадок малотоксичен и представляет собой соединение, пригодное для использования в качестве вторичного сырья для переработки на других предприятиях. Особенностью метода электрохимической коагуляции является слабая зависимость обрабатываемой жидкости от температуры, что может сделать данный способ очистки востребованным на горнопромышленных предприятиях Арктической зоны РФ.

Список источников

1. Зиновьев Е. А., Китаев А. Б. О воздействии взвешенных частиц на гидрофауну // Известия Самарского НЦ РАН. 2015. Т. 17, № 5–1. С. 283–288.
2. Методы снижения концентрации сульфатов в сточных водах горнорудных предприятий / В. А. Маслобоев [и др.] // Вестник Кольского НЦ РАН. 2017. № 1. С. 99–115.
3. Николаенко И. В., Катышев С. Ф. Электрокоагуляционная очистка сточных вод. 2016. 18 с.
4. Очистка шахтных вод рудника «Северный» АО «Кольская ГМК» методом электрохимической коагуляции / А. В. Светлов [и др.] // Цветные металлы. 2019. № 11. С. 52–56. doi:10.17580/tsm.2019.11.06.
5. Методы очистки сточных вод горнопромышленных предприятий от взвешенных веществ / Е. А. Красавцева [и др.] // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. 2022. Т. 58, № 3. С. 136–146. doi:10.15372/FTPRPI20220314.
6. Neutralization of Acidity (pH) and Reduction of Total Suspended Solids (TSS) by Solar-Powered Electrocoagulation System / E. Fikri [et al.] // Civil Engineering J. 2023. Vol. 9, no. 5. P. 1160–1172. doi:10.28991/CEJ-2023-09-05-09.
7. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches / J. N. Hakizimana [et al.] // Desalination. 2017. Vol. 404. P. 1–21. doi:10.1016/J.DESAL.2016.10.011.
8. Шамсутдинова З. Р., Каратаев О. Р. Применение электрокоагуляции в очистке сточных вод нефтеперерабатывающих предприятий // Science Time. 2015. Т. 24, № 12. С. 840–845.
9. Боровская Л. В., Доценко С. П. Электрокоагуляционная очистка воды от коллоидных ПАВ // Современные наукоёмкие технологии. 2010. № 4. С. 76–78.
10. Эколого-технический анализ состояния систем водоподготовки на объектах ОАО «Газпром» в Тюменской области / Л. Г. Шиблева [и др.] // Известия вузов. Нефть и газ. 1999. № 5. С. 45–51.
11. Долина Л. Ф. Современная техника и технологии для очистки сточных вод от солей тяжёлых металлов. Днепрпетровск: Континент, 2008. 254 с.

12. Назаров В. Д., Фурсов С. В. Очистка природных и сточных вод от цветности и мутности // *Экология и промышленность России*. 2014. № 8. С. 4–7. doi:10.18412/1816-0395-2014-8-4-7.
13. Bukhari A. A. Investigation of the electro-coagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater // *Bioresource technology*. 2008. Vol. 99, no. 5. P. 914–921. doi:10.1016/j.biortech.2007.03.015.
14. Singh H., Mishra B. K. Assessment of kinetics behavior of electrocoagulation process for the removal of suspended solids and metals from synthetic water // *Environ. Eng. Res.* 2017. Vol. 22. P. 141–148. doi:10.4491/eer.2016.029.
15. El-Shazly A. H., Daous M. A. Kinetics and performance of phosphate removal from hot industrial effluents using a continuous flow electrocoagulation reactor // *Int. J. Electrochem. Sci.* 2013. Vol. 8. P. 184–194. doi:10.1016/S1452-3981(23)14012-0.
16. Ni'am M. F., Othman F. Experimental design of electrocoagulation and magnetic technology for enhancing suspended solids removal from synthetic wastewater // *International J. Science and Engineering*. 2014. Vol. 7, no. 2. P. 178–192. doi:10.12777/ijse.7.2.178-192.
17. Performance evaluation of a continuous bipolar electrocoagulation/electrooxidation-electroflotation (ECEO-EF) reactor designed for simultaneous removal of ammonia and phosphate from wastewater effluent / A. H. Mahvi [et al.] // *J. Hazardous Materials*. 2011. Vol. 192, no. 3. P. 1267–1274.
18. Ugurlu M. Effluents by the electrocoagulation method // *Gazi University J. Science*. 2004. Vol. 17, no. 3. P. 85–99.
19. Lin S. H., Wu C. L. Electrochemical removal of nitrite and ammonia for aquaculture // *Water research*. 1996. Vol. 30, no. 3. P. 715–721.
20. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies / S. Garcia-Segura [et al.] // *J. Electroanalytical Chemistry*. 2017. Vol. 801. P. 267–299. doi:10.1016/j.jelechem.2017.07.047.
21. Removal of phosphate from landscape water using an electrocoagulation process powered directly by photovoltaic solar modules / S. Zhang [et al.] // *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 2013. Vol. 117. P. 73–80. doi:10.1016/j.solmat.2013.05.027.
22. Ferreira A. M., Marchesiello M., Thivel P. X. Removal of copper, zinc and nickel present in natural water containing Ca^{2+} and HCO_3^- ions by electrocoagulation // *Sep. Purif. Technol.* 2013. Vol. 107. P. 109–117. doi:10.1016/j.seppur.2013.01.016.
23. Способы очистки загрязнённых промышленных сточных вод от взвешенных веществ / А. А. Горячев [и др.] // *Минералогия техногенеза*. 2024. № 25. С. 161–170.
24. Un T. U., Koparal A. S., Ogutveren U. B. Fluoride removal from water and wastewater with a batch cylindrical electrode using electrocoagulation // *Chem. Eng. J.* 2013. Vol. 223. P. 110–115. doi:10.1016/J.CEJ.2013.02.126.

References

1. Zinoviev E. A., Kitaev A. B. O vozdeystvii vzveshennykh chastits na gidrofaunu [About the impact of suspended particles on hydrofauna]. *Izvestiya Samarskogo NC RAN* [Proceedings of the Samara Scientific Centre of the Russian Academy of Sciences], 2015, Vol. 17, no. 5–1, pp. 283–288. (In Russ.).
2. Masloboev V. A., Vigdergauz V. E., Makarov D. V., Svetlov A. V., Seleznev S. G. Metody snizheniya kontsentratsii sul'fatov v stochnykh vodakh gornorudnykh predpriyatiy [The methods of reducing sulphate concentrations in the waste water of mining enterprises]. *Vestnik Kol'skogo nauchnogo tsentra RAN* [Bulletin of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2017, no. 1, pp. 99–115 (In Russ.).
3. Nikolaenko I. V., Katyshev S. F. *Elektrokoagulyatsionnaya ochistka stochnykh vod* [Electrocoagulation Treatment of Wastewater], 2016, 18 p.
4. Svetlov A. V., Minenko V. G., Samusev A. L., Salakhov E. M. Ochistka shakhtnykh vod rudnika “Severnyy” AO “Kol'skaya GMK” metodom elektrokhimicheskoy koagulyatsii [Purification of mine water using electrochemical coagulation technology at Kola MMC's Severny mine]. *Tsvetnyye metally* [Non-ferrous Metals], 2019, no. 11, pp. 52–56. doi:10.17580/tsm.2019.11.06 (In Russ.).
5. Krasavtseva E. A., Maksimova V. V., Makarov D. V., Masloboev V. A. Metody ochistki stochnykh vod gornopromyshlennykh predpriyatiy ot vzveshennykh veshchestv [Removal of suspended solids from industrial wastewater]. *Fiziko-tekhnicheskiye problemy razrabotki poleznykh iskopayemykh* [Journal of Mining Science], 2022, Vol. 58, no. 3, pp. 136–146. doi:10.15372/FTPRI20220314 (In Russ.).
6. Fikri E., Sulistiawan I. A., Riyanto A., Saputra A. E. Neutralization of Acidity (pH) and Reduction of Total Suspended Solids (TSS) by Solar-Powered Electrocoagulation System. *Civil Engineering Journal*, 2023, Vol. 9, no. 5, pp. 1160–1172. doi:10.28991/CEJ-2023-09-05-09.

7. Hakizimana J. N., Gourich B., Chafi M., Stiriba Y., Vial C., Drogui P., Naja J. Electrocoagulation process in water treatment: A review of electrocoagulation modeling approaches. *Desalination*, 2017, Vol. 404, pp. 1–21. doi:10.1016/J.DESAL.2016.10.011.
8. Shamsutdinova Z. R., Karataev O. R. Primeneniye elektrokoagulyatsii v ochistke stochnykh vod neftepererabatyvayushchikh predpriyatiy [Application of electrocoagulation in the oil refineries wastewater treatment]. *Science Time* [Science Time], 2015, Vol. 24, no. 12, pp. 840–845. (In Russ.).
9. Borovskaya L. V., Dotsenko S. P. Elektrokoagulyatsionnaya ochistka vody ot kolloidnykh PAV [Electrocoagulation purification of water from colloidal surfactants]. *Sovremennyye naukoemye tekhnologii* [Modern Science-Intensive Technologies], 2010, no. 4, pp. 76–78. (In Russ.).
10. Shibleva L. G., Krylov G. V., Demidovich V. N., Makarov V. V. Ekologo-tekhnicheskii analiz sostoyaniya sistem vodopodgotovki na ob"yektakh JSC "Gazprom" v Tyumenskoj oblasti [Ecological and technical analysis of the water treatment systems state at the facilities of OAO GAZPROM in the Tyumen region]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy* [News of Higher Educational Institutions], 1999, no. 5, pp. 45–51. (In Russ.).
11. Dolina L. F. *Sovremennaya tekhnika i tekhnologii dlya ochistki stochnykh vod ot soley tyazhelykh metallov* [Modern equipment and technologies for wastewater treatment from heavy metal salts]. Dnepropetrovsk, Continent, 2008, 254 p.
12. Nazarov V. D., Fursov S. V. Ochistka prirodnnykh i stochnykh vod ot tsvetnosti i mutnosti [Removal of color and turbidity from natural and waste water]. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii* [Ecology and Industry of Russia], 2014, no. 8, pp. 4–7. doi:10.18412/1816-0395-2014-8-4-7 (In Russ.).
13. Bukhari A. A. Investigation of the electro-coagulation treatment process for the removal of total suspended solids and turbidity from municipal wastewater. *Bioresource technology*, 2008. Vol. 99. no. 5, pp. 914–921. doi:10.1016/j.biortech.2007.03.015.
14. Singh H., Mishra B. K. Assessment of kinetics behavior of electrocoagulation process for the removal of suspended solids and metals from synthetic water. *Environ. Eng. Res.*, 2017, Vol. 22, pp. 141–148. doi:10.4491/eer.2016.029.
15. El-Shazly A. H., Daous M. A. Kinetics and performance of phosphate removal from hot industrial effluents using a continuous flow electrocoagulation reactor. *Int. J. Electrochem. Sci.*, 2013, Vol. 8, pp. 184–194. doi:10.1016/S1452-3981(23)14012-0.
16. Ni'am M. F., Othman F. Experimental design of electrocoagulation and magnetic technology for enhancing suspended solids removal from synthetic wastewater. *International J. of Science and Engineering*, 2014, Vol. 7, no. 2, pp. 178–192. doi:10.12777/ijse.7.2.178-192.
17. Mahvi A. H., Ebrahimi S. J., Mesdaghinia A., Gharibi H., Sowlat M. H. Performance evaluation of a continuous bipolar electrocoagulation/electrooxidation–electroflotation (ECEO-EF) reactor designed for simultaneous removal of ammonia and phosphate from wastewater effluent. *J. of Hazardous Materials*, 2011, Vol. 192, no. 3, pp. 1267–1274.
18. Ugurlu M. Effluents by the electrocoagulation method. *Gazi University J. of Science*, 2004. Vol. 17, no. 3, pp. 85–99.
19. Lin S. H., Wu C. L. Electrochemical removal of nitrite and ammonia for aquaculture. *Water research.*, 1996, Vol. 30, no. 3, pp. 715–721.
20. Garcia-Segura S., Eiband M. M. S., de Melo J. V., Martínez-Huitle C. A. Electrocoagulation and advanced electrocoagulation processes: A general review about the fundamentals, emerging applications and its association with other technologies. *J. of Electroanalytical Chemistry*, 2017. Vol. 801, pp. 267–299. doi:10.1016/j.jelechem.2017.07.047.
21. Zhang S., Zhang J., Wang W., Li F., Cheng X. Removal of phosphate from landscape water using an electrocoagulation process powered directly by photovoltaic solar modules. *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.*, 2013, Vol. 117, pp. 73–80. doi:10.1016/j.solmat.2013.05.027.
22. Ferreira A. M., Marchesiello M., Thivel P. X. Removal of copper, zinc and nickel present in natural water containing Ca^{2+} and HCO_3^- ions by electrocoagulation. *Sep. Purif. Technol.*, 2013, Vol. 107, pp. 109–117. doi:10.1016/j.seppur.2013.01.016.
23. Goryachev A. A., Svetlov A. V., Kudryavtseva L. P., Makarov D. V. Sposoby ochistki zagryaznennykh promyshlennykh stochnykh vod ot vzveshennykh veshchestv [Methods of polluted industrial wastewater treatment for suspended solids removal]. *Mineralogiya tekhnogeneza* [Mineralogy of Technogenesis], 2024, no. 25, pp. 161–170. (In Russ.).
24. Un T. U., Koparal A. S., Ogutveren U. B. Fluoride removal from water and wastewater with a batch cylindrical electrode using electrocoagulation. *Chem. Eng. J.*, 2013, Vol. 223, pp. 110–115. doi:10.1016/J.CEJ.2013.02.126.

Информация об авторах

А. А. Горячев — кандидат технических наук;

А. В. Светлов — кандидат технических наук;

Л. П. Кудрявцева — кандидат географических наук;
Д. В. Макаров — доктор технических наук

Information about the authors

A. A. Goryachev — PhD (Engineering);
A. V. Svetlov — PhD (Engineering);
L. P. Kudryavtseva — PhD (Geography);
D. V. Makarov — Dr. Sc. (Engineering)

Статья поступила в редакцию 05.01.2025; одобрена после рецензирования 17.04.2025; принятая к публикации 29.05.2025.
The article was submitted 05.01.2025; approved after reviewing 17.04.2025; accepted for publication 29.05.2025.