

## ОЧИСТКА КАРЬЕРНЫХ ВОД ГОРНОРУДНЫХ ПРЕДПРИЯТИЙ ОТ АЗОТСОДЕРЖАЩИХ СОЕДИНЕНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РЕДОКС-БАРЬЕРОВ

И.С. Глушанкова<sup>1</sup>, Е.Н. Бессонова<sup>1</sup>, С.М. Блинов<sup>2</sup>, Л.В. Рудакова<sup>1</sup>, П.А. Белкин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,  
Пермь, Россия, e-mail: el-81@yandex.ru

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет, Пермь, Россия

**Аннотация:** При добыче руды открытым способом с применением буровзрывных работ формируются карьерные и дренажные воды, загрязненные неорганическими соединениями азота, представляющими продукты разложения и неполного расходования взрывчатых веществ на основе аммиачной селитры. Сброс сточных карьерных вод в открытые водоемы приводит к их эвтрофикации, провоцирует активное развитие микрофлоры, в донном грунте усиливаются анаэробные процессы, интенсивно накапливаются продукты распада органических веществ, такие как сероводород и аммиак, что приводит к гибели гидробионтов, утрате их рекреационной функции. Для снижения негативного воздействия сточных вод на поверхностные и подземные воды необходимо при выборе способов и технологий их очистки учитывать многогранность образования стоков, низкое содержание в них органических соединений. Для очистки сточных вод необходима разработка эффективных, экономически и технологически реализуемых технологий, основанных на физико-химических методах очистки. Один из них — создание искусственных геохимических редокс-барьеров. Представлены результаты исследования использования метода гальванокоагуляции в искусственных проницаемых барьерах, содержащих гальванопару — железный скраб и углеродные материалы — для очистки карьерных вод от нитрат-ионов. Установлено, что нульвалентное железо и образующиеся при электрохимическом взаимодействии гальванопары ионы Fe(II) способны восстанавливать нитрат-ионы и обеспечивать очистку воды на 99%. Представлены результаты исследований по применению торфа для очистки сточных вод от ионов аммония  $\text{NH}_4^+$ . Показана эффективность применения технологии проницаемого реактивного барьера в сочетании с природными механизмами снижения содержания соединений азота в сточных водах горно-обогатительных предприятий. Разработан способ очистки карьерных сточных вод от соединений азота, включающий обустройство искусственного реактивного барьера (сорбционной траншеи), заполняемого смесью железного скраба, углеродного материала и песка для очистки от нитрат-ионов и торфяной площадки для доочистки сточных вод от  $\text{NH}_4^+$ -ионов.

**Ключевые слова:** карьерные воды, соединения азота, проницаемый реактивный барьер, гальванопара, нульвалентное железо, торф, редукция нитратов.

**Благодарность:** Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2021 г.

**Для цитирования:** Глушанкова И. С., Бессонова Е. Н., Блинов С. М., Рудакова Л. В., Белкин П. А. Очистка карьерных вод горнорудных предприятий от азотсодержащих соединений с использованием редокс-барьеров // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2021. – № 10. – С. 58–68. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_58.

---

## Removal of nitrogen compounds from mine process water using redox barriers

I.S. Glushankova<sup>1</sup>, E.N. Bessonova<sup>1</sup>, S.M. Blinov<sup>2</sup>, L.V. Rudakova<sup>1</sup>, P.A. Belkin<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia, e-mail: el-81@yandex.ru

<sup>2</sup> Perm State University, Perm, Russia

---

**Abstract:** Open pit mining with drilling and blasting results in formation of quarry water and drainage water impure with inorganic nitrogen compounds (ions of ammonium, nitrite and nitrate) which are the products of decomposition and incomplete consumption of explosives made of ammonium nitrate. Discharge of quarry effluents in open water bodies results in eutrophication of water, triggers active development of microflora, stimulates anaerobic processes in beds and intensifies accumulation of decay products of organic substances, such as hydrogen sulfide and ammonia, which leads to ruin of organic organisms and to deprivation of their recreational functionality. Abatement of the impact exerted by mine effluents on surface and ground water requires purification technologies and methods to be selected with regard to heavy tonnage of effluents and to low content of organic compounds in them. Treatment of effluent requires development of efficient, economical and feasible technologies based on physicochemical cleaning procedures. One of such approaches is creation of artificial geochemical redox barriers. This article describes research findings on application of galvanocoagulation in manmade permeable barriers containing a galvanic couple composed of broken iron and carbon materials to remove nitrate ions from mine water. It is found that zerovalent iron and ions Fe (II) formed in electrochemical interaction of the galvanic couple are capable to recover nitrate ions and to ensure water purification to 99%. The article also gives data on application of peat for removal of ammonium ions  $\text{NH}_4^+$  from effluents. Efficiency of the permeable reactive barrier in combination with natural mechanisms in reduction of content of nitrogen compounds in effluents of mining and processing plants is demonstrated. The method developed for removal of nitrogen compounds from open mine effluents involves construction of a reactive barrier (sorption trench) filled with broken iron, carbon materials and sand for removal of nitrogen ions from effluents, and arrangement of peat sites for fine purification of effluents from ions  $\text{NH}_4^+$ .

**Key words:** open pit mine water, nitrogen compounds, permeable reactive barrier, galvanic couple, zerovalent iron, peat, reduction of nitrates.

**Acknowledgements:** The research was supported by the Perm Research and Education Centre for Rational Use of Subsoil, 2021.

**For citation:** Glushankova I. S., Bessonova E. N., Blinov S. M., Rudakova L. V., Belkin P. A. Removal of nitrogen compounds from mine process water using redox barriers. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2021;(10):58-68. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236\_1493\_2021\_10\_0\_58.

---

### Введение

Деятельность горнорудных и горно-обогатительных предприятий сопровождается образованием многотоннажных сточных вод сложного химического состава, условия формирования которых

зависят от целого ряда факторов: геологических, гидрогеологических, климатических, объема разработок, природы и состава руды, технологии ее обогащения и др. Сточные воды горных предприятий представляют собой карьерные,

дренажные и ливневые воды, производственные сточные воды и хвосты обогащения.

При добыче руды с применением буровзрывных работ для отделения скальных горных пород от массива формируются карьерные и дренажные воды, загрязненные мелкодисперсными минеральными частицами, химическими растворами, используемыми при бурении взрывных скважин и при пылеподавлении, растворенными минеральными соединениями, экстрагируемыми из пород, а также продуктами распада взрывчатых веществ. Основным компонентом взрывчатых веществ, используемых в горном деле, является нитрат аммония. Загрязнение дренажных вод соединениями азота связано с рядом процессов, среди которых, кроме непосредственно использования аммиачной селитры, выделены просыпания и разливы взрывчатых веществ при зарядке скважин, отказы зарядов в скважинах, вымывание аммиачной селитры при зарядке обводненных скважин, вымывание атмосферными осадками адсорбированных горной массой оксидов азота, образующихся при взрыве, и др.

Расширение применения в открытых горных выработках мощного транспортного и технологического оборудования

с двигателями внутреннего сгорания привело к повышению загрязнения карьерных вод нефтепродуктами.

Промышленные сточные воды горно-обогатительных предприятий чаще всего представляют собой хвосты обогащения и сливы сгустителей концентратов. Они характеризуются высоким содержанием взвешенных веществ, ионов тяжелых металлов, повышенной минерализацией, щелочностью. На рисунке представлен карьер по добыче железной руды открытым способом.

Для снижения негативного воздействия сточных вод горных предприятий на поверхностные и подземные воды необходимо создавать способы и технологии их очистки, при выборе которых следует учитывать, что объемы образования карьерных и дренажных вод составляют более 1 млн т в год, и для очистки экономически целесообразно применение достаточно дешевых и в то же время эффективных методов.

Наиболее сложно решается проблема очистки сточных вод от соединений азота (ионов аммония, нитрат- и нитрит-ионов). Хорошо известны способы очистки хозяйственно-бытовых сточных вод от азотсодержащих соединений (нитрификация и денитрификация). Особенностью карьерных и дренажных вод



*Карьер по добыче железной руды открытым способом  
Open pit iron ore mine*

являются невысокое содержание в них органических примесей, бактериальной микрофлоры, что не позволяет использовать для их очистки традиционные технологии.

Анализ научно-технической информации показал, что для очистки карьерных вод предлагаются биологические методы, основанные на использовании высших растений и микроводорослей для снижения содержания нитратов, применение анаэробных методов очистки, а также физико-химические и химические методы с использованием геохимических барьеров, адсорбционных технологий с применением природных сорбентов [1–9].

Например, технология «constructed wetland» предполагает использование природных механизмов очистки сточных вод с помощью произрастающей в водоеме или поблизости от него растительности. Чаще всего технологию реализуют на заболоченных участках, что позволяет сочетать физические, химические и биологические процессы, в частности ассимиляцию нитратов растениями, аэробное окисление аммонийного и нитритного азота, а также анаэробную денитрификацию в донных слоях [1].

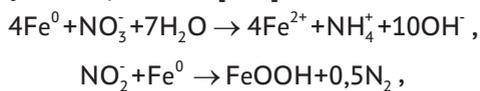
В работах Г.А. Евдокимовой, Л.А. Ивановой и др. предложены технологии использования ботанических площадок, плавающих биоплато и фитоматов [2, 3] с созданием фитоценозов из характерных для данной местности видов водной растительности. Оптимальная величина покрытия водоема растительностью биоплато определена авторами на уровне 50% общей площади очищаемого водоема при исходной концентрации нитрат-ионов, не превышающей 30–50 мг/дм<sup>3</sup> [2].

Факторами, ограничивающими применение природных механизмов денитрификации, являются температура ок-

ружающей среды и освещенность, что может значительно затруднять реализацию метода в отдельных макроклиматических районах, а также в зимнее время года.

В настоящее время для глубокой очистки грунтовых вод от соединений азота используются искусственные проницаемые барьеры, содержащие восстановители (редокс-системы). Обычно для этого используют металлическое железо в виде крупнозернистых отходов производства (железные опилки) или микрометровых частиц (нульвалентное железо). Проницаемый реактивный барьер устраивают поперек движения грунтовых вод в виде, например, траншеи, заполненной смесью железа с грунтом или песком, что позволяет эксплуатировать ее в течение длительного времени с минимальным обслуживанием [4, 5].

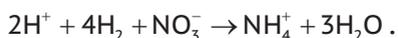
Механизм очистки сточных вод с использованием нульвалентного железа заключается в прямом восстановлении Fe<sup>0</sup> нитрат- и нитрит-ионов иона и косвенном восстановлении нитрата продуктом коррозии железа в слабоокислой среде — водородом. Показано, что восстановление нитрат- и нитрит-ионов железом возможно при протекании следующих реакций [5, 6]:



полнота протекания которых зависит от pH среды, времени контакта, дозы реагента и исходной концентрации нитратов. Однако ряд авторов допускает также возможность образования других продуктов — свободного азота, оксидов азота (II, III) [7, 9].

Авторами работ [7] показано, что в анаэробных условиях при очистке грунтовых вод от азотсодержащих соединений процессы восстановления ускоряются по действием микроорганизмов —

денитрификаторов. Водород, образующийся при коррозии железа, участвует в редукции нитратов денитрификаторами согласно упрощенной реакции:



Известно, что для очистки сточных вод от мелковзвешенных и коллоидных примесей, а также от ионов тяжелых металлов, ионов, обладающих окислительной способностью, например, хромат-ион, используется метод гальванокоагуляции [10, 11], в основе которого лежит принцип работы короткозамкнутого гальванического элемента. Очищаемая вода обрабатывается смесью материалов, один из которых обладает коагулирующей и восстанавливающей способностью (например, смесью железа и кокса, либо углеродсодержащего материала, или смесью железа и меди). За счет разности электрохимических потенциалов на контакте железная стружка–углеродсодержащий материал возникает множество гальванопар, что вызывает интенсивное окисление и растворение металла, электролиз воды, смещение величины рН, гидролиз и другие физико-химические процессы. Можно полагать, что в этих условиях возможно восстановление нитрат-ионов как нульвалентным железом, так и ионами железа (II), а на образующемся осадке гидроксида железа (II, III) способны адсорбироваться ионы тяжелых металлов. На катодных участках (углеродсодержащий материал) могут протекать процессы восстановления кислорода, растворенного в воде, или водорода, что сопровождается повышением величины рН среды.

Для очистки сточных вод от ионов аммония используются методы отдувки аммиака воздухом, окисление хлорсодержащими соединениями — хлор, гипохлорит натрия или кальция, а также ионообменные и сорбционные методы

с использованием природных цеолитов или торфа [12, 13]. Известно, что гуминовые соединения торфа способны связывать ионы аммония в комплексные соединения — гуматы аммония, что позволяет использовать его для извлечения ионов аммония с получением комплексного удобрения [14].

Проведенный анализ научно-технической информации показал актуальность проведения исследований по разработке природоподобных низкочастотных технологий очистки карьерных вод от соединений азота с использованием процессов естественного восстановления нитратов в присутствии металлического железа путем создания редокс-барьеров, а также сорбционных барьеров для очистки воды от ионов аммония.

Целью настоящей работы являлось исследование процессов очистки карьерных вод, образующихся при добыче железосодержащих руд буровзрывным методом, от соединений азота с использованием редокс-систем и сорбционных барьеров.

### **Материалы и методы**

Карьерные воды формируются за счет трещинных вод скальной толщи и атмосферных осадков, поступающих с водосборной площади карьера. Они собираются в зумпфы, устроенные в нижней точке карьера, откуда передвижными насосными установками перекачиваются по напорным водоводам в технический буферный водоем. Из буферного водоема вода по трубе перетекает в отстойник, который обустроен в естественном понижении рельефа посредством сооружения дамб обвалования. После отстаивания осветленная вода сбрасывается в поверхностный водный объект.

Химический анализ проб проводили в аккредитованной лаборатории по стандартным методикам. Содержание нитрат-ионов определялось фотометрически

Таблица 1

**Химический состав карьерной воды**  
**Chemical composition of pit water**

Место отбора пробы	рН	Химический состав, мг/дм <sup>3</sup>									
		Cl <sup>-</sup>	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	NO <sub>2</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Ca <sub>2</sub> <sup>+</sup>	Fe <sub>общ</sub>	Mn	сухой остаток
Буферный пруд	7,14	35,5	9,7	3,030	204,3	50,4	42,1	153,6	0,102	0,28	947,5
ПДКрыбхоз		34,92	0,5	0,08	40,0	95	40	180	0,1	0,01	1000

в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.4-95, содержание ионов аммония определялось методом капиллярного электрофореза согласно ГОСТ 31869-2012 (Вода. Методы определения содержания катионов (аммония, бария, калия, кальция, лития, магния, натрия, стронция) с использованием капиллярного электрофореза).

Исследования процессов очистки сточных вод от соединений азота проводили на модельных лабораторных установках с использованием реальных сточных вод, отобранных из буферного пруда горного предприятия. При исследовании процесса очистки сточных карьерных вод методом гальванокоагуляции в качестве гальванопары использовали железные опилки (отходы машиностроительного предприятия) и углеродный сорбент — отход производства березового активного угля БАУ. Исследовалось влияние соотношения Fe<sup>0</sup> — С, Fe — С: сточная вода, величины рН, времени обработки на эффективность очистки воды от нитрат-иона.

Контролировали процесс по остаточному содержанию соединений азота (нитрат-ион, ион аммония) в очищенной воде.

Для определения сорбционной емкости торфа по ионам аммония в статических условиях навески высушенного торфа массой 1 — 5 г обрабатывали сточной водой заданного объема при перемешивании до установления рав-

новесия. Исследования проводили при рН 6 и 8. Для регулирования рН сточной воды использовали оксид кальция. В работе использовали образцы низинного торфа. Основные характеристики образцов высушенного торфа: влажность — 10%; зольность — 16%; рН водной вытяжки — 5,8 — 6,0 ед. рН, содержание гуминовых веществ (%) — 31%.

### Результаты и обсуждения

Состав исследуемой сточной воды, отобранной из буферного пруда, представлен в табл. 1.

#### *Результаты исследования процессов очистки сточных вод от соединений азота методом гальванокоагуляции*

Для активизации процесса гальванокоагуляции (окисления Fe<sup>0</sup>) токообразующие материалы обрабатывали раствором кислоты в течение суток при рН = 4,0 — 4,5. После этого в емкость добавляли предварительно подкисленную очищаемую воду и проводили процесс очистки при перемешивании суспензии. Предварительные эксперименты показали, что гальванокоагуляция протекает до равновесного состояния в течение 0,5 — 3 ч, поэтому длительность эксперимента во всех опытах составляла 3 ч. Токообразующие материалы использовали многократно. После проведения первого цикла обработанную воду сли-

Таблица 2

**Показатели очистки карьерных вод методом гальванокоагуляции**  
**Data of pit water treatment by galvanocoagulation method**

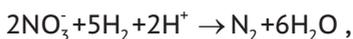
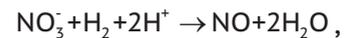
№ п/п	Соотношение масс реагентов		Концентрация $\text{NO}_3^-/\text{N-NO}_3^-$ мг/дм <sup>3</sup>		Концентрация $\text{NH}_4^+/\text{N-NH}_4^+$ мг/дм <sup>3</sup>	Концентрация Mn, мг/дм <sup>3</sup>	рН
	уголь	Fe <sup>0</sup>	очищенная вода	эффективность очистки, %			
1	0	0	204,3/45,24	0	9,7/9	0,277	7,14
<b>Первый цикл</b>							
2	1	1	42/9,5	79	11,2/8,7	0,011	7,2
3	1	2	38/8,6	81	12,4/9,5	0,007	7,3
4	1	3	20/4,5	90	13,8/10,6	0.008	7,4
<b>Второй цикл</b>							
5	1	1	25/5,65	87,5	12,8/9,8	Н.п.о.*	7,2
6	1	2	22/4,97	89	13,1/10,1	Н.п.о.	7,3
7	1	3	14/3,16	93	13,4/10,3	Н.п.о.	7,4
<b>Третий цикл</b>							
5	1	1	4,2/1,0	98,0	14,1/10,9	Н.п.о.	7,3
6	1	2	0,06/0,012	99,9	13,9/10,4	Н.п.о.	7,4
7	1	3	0,06/0,012	99,9	14,0/10,9	Н.п.о.	7,5

\* Н.п.о — ниже предела обнаружения

вали и добавляли свежую порцию подкисленной сточной воды заданного объема. Результаты экспериментов представлены в табл. 2.

Как видно из представленных данных, применение метода гальванокоагуляции обеспечивает очистку сточной воды от нитрат-ионов до ПДК рыбхоз [15], при этом несколько возрастает концентрация ионов аммония, что согласуется с литературными данными.

Расчет баланса по азоту в исходной и очищенной воде показывает, что только часть нитрат ионов (10 – 15%) восстанавливается до ионов аммония. Возможно, выделяющийся на катодных участках водород также может принимать участие в реакциях восстановления нитрат-ионов по схеме



Определено оптимальное массовое соотношение токообразующих реагентов – уголь- Fe<sup>0</sup> = 1:2.

Величина рН очищенной воды составляла 7,3–7,5 ед. рН. Повышение величины рН реакционной смеси объясняется образованием гидроксидных форм металла кислоты при протекании электрохимических процессов в гальванопаре.

Установлено, что при работе в циклах не наблюдалось снижения эффективности очистки воды от нитрат-ионов, она несколько увеличивалась (на 7–8%), что можно объяснить накоплением в системе водорода и ионов Fe<sup>2+</sup>, образующихся при электрохимических процессах.

При очистке карьерных вод исследуемым методом наблюдалось значи-

тельное снижение концентрации ионов марганца в очищенной воде в результате адсорбции ионов на свежееобразующем осадке гидроксидов железа (II, III).

Эксперименты, проведенные в статических условиях, показали принципиальную возможность применения метода гальванокоагуляции для очистки карьерных вод от нитрат-ионов и ионов тяжелых металлов.

На практике способ может быть реализован созданием проницаемого барьера в виде траншеи, заполненной гальванопарой и грунтом или песком. В лабораторных условиях проведены эксперименты на модельной установке, имитирующей проницаемый барьер, представляющий смесь элементов гальванопары и песка в массовом соотношении песок:  $Fe^0$  (железные опилки): уголь — 20:2:1. Установлено, что эффективность очистки от нитрат-ионов при этом не снизилась и составила 95 — 99%.

Применение метода гальванокоагуляции не обеспечивает очистку карьерных вод от ионов аммония. В работе исследовалась возможность использования торфа для извлечения из воды ионов аммония. Эксперименты проводили на реальной сточной воде с содержанием ионов аммония 10 мг/дм<sup>3</sup>. При дозе торфа 1 г/дм<sup>3</sup> остаточная концентрация ионов аммония составила 0,7 мг/дм<sup>3</sup>, при обработке сточной воды смесью торфа с оксидом кальция при массовом соотношении 10:1 и дозой 1 г/дм<sup>3</sup> остаточная концентрация составила 0,2 мг/дм<sup>3</sup>. В слабощелочной среде (pH 8,5) наблюдалось усиление поглотительной способности торфа по отношению к ионам аммония.

Установлена возможность доочистки карьерной воды от ионов аммония с использованием торфа. Для очистки карьерных вод способ может быть реализован обустройством торфяной площадки, при этом очистка сточных вод будет

осуществляться как в результате адсорбционного и ионообменного механизмов поглощения ионов аммония торфом, так и под действием физических, химических и биологических процессов, а также аэробного окисления аммонийного азота.

### **Выводы**

Таким образом, применение взрывчатых веществ, содержащих аммиачную селитру при ведении взрывных работ на предприятиях горной промышленности, является основной причиной загрязнения дренажных вод предприятия минеральными соединениями азота.

Денитрификация и деаммонификация физико-химическими, биологическими и микробиологическими методами является наиболее широко используемым механизмом в процессе удаления минерального азота из сточных вод.

Физико-химические методы экономически обоснованы в связи со значительными объемами сточных вод, требующих очистки.

Фильтрующие дамбы, геохимические барьеры находят широкое применение на предприятиях горнодобывающей промышленности. Редокс-барьеры также демонстрируют эффективность, однако применение разного рода восстановителей может привести к накоплению более токсичного нитрит-иона, а также образованию значительного количества аммония, требующих дальнейшей очистки сточных вод.

Биологические методы приемлемы с точки зрения применения природоподобных технологий — денитрификация протекает в искусственно созданных болотных экосистемах, «constructed wetland», использующих растения (в основном болотные), почвы и микроорганизмы для обеспечения физических, химических и биологических процессов очистки сточных вод.

Технологии «constructed wetland» могут являться альтернативой использования реагентной очистки сточных вод. Однако редукция нитратов растениями и микроорганизмами в значительной степени зависит от внешних факторов — поступления органического вещества в качестве источника электронов при мик-

робной денитрификации, благоприятных для фотосинтеза условий при денитрификации высшими растениями и водорослями. Для снижения содержания в сточных водах ионов аммония, образующихся в результате восстановления нитрат-ионов, могут быть использованы торфяные площадки.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Студенок А. Г., Студенок Г. А., Ревво А. В. Оценка методов очистки сточных вод от соединений азота для дренажных вод горных предприятий // Известия УГГУ. — 2013. — № 2. — С. 26 — 30.
2. Евдокимова Г. А., Иванова Л. А., Мозгова Н. П., Мязин В. А., Фокина Н. В. Плавающие биоплато для очистки сточных карьерных вод от минеральных соединений азота в арктических условиях // Экология и промышленность России. — 2015. — № 9. — С. 35 — 41.
3. Студенок А. Г., Студенок Г. А. Очистка карьерных дренажных вод горных предприятий от соединений азота на ботанических площадках с высшей водной растительностью / Актуальные проблемы экономики и управления. Сборник научных статей Шестой всероссийской научно-практической конференции с международным участием. — Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2018. — С. 193 — 195.
4. Obiri-Nyarko F., Grajales-Mesa S. J., Malina G. An overview of permeable reactive barriers for in situ sustainable groundwater remediation // Chemosphere. 2014, vol. 111, pp. 243 — 259. DOI: [10.1016/j.chemosphere.2014.03.112](https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.112).
5. Водяницкий Ю. Н., Шоба С. А. Биогеохимические барьеры для ремедиации почв и очистки почвенно-грунтовых вод // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. — 2016. — № 3. — С. 3 — 15.
6. Ziajahromi S., Khanizadeh M., Khiadani M. Experimental evaluation of nitrate reduction from water using synthesis nanoscale zero-valent iron (NZVI) under aerobic conditions // Middle-East Journal of Scientific Research. 2013, vol. 16, no. 2, pp. 205 — 209. DOI: [10.5829/idosi.mejsr.2013.16.02.11661](https://doi.org/10.5829/idosi.mejsr.2013.16.02.11661).
7. Sicilian A. Use of nanoscale zero-valent iron (NZVI) particles for chemical denitrification under different operating conditions // Metals. 2015, vol. 5, no. 3, pp. 1507 — 1519. DOI: [10.3390/met5031507](https://doi.org/10.3390/met5031507).
8. Liu Y., Wang J. Reduction of nitrate by zero valent iron (ZVI)-based materials. A review // Science of the Total Environment. 2019, vol. 671, pp. 388 — 403. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2019.03.317](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.03.317).
9. Ona-Nguema G., Guerbois D., Pallud C., Brest J., Abdelmoula M., Morin G. Biogenic hydroxycarbonate green rust enhances nitrate removal and decreases ammonium selectivity during heterotrophic denitrification // Minerals. 2020, vol. 10, p. 818. DOI: [10.3390/min10090818](https://doi.org/10.3390/min10090818).
10. Чантурия В. А., Соложенкин П. М. Гальванохимические методы очистки техногенных вод: Теория и практика. — М.: Академкнига, 2005. — 204 с.
11. Кулаков А. А., Кузнецова Ю. Н., Денисова А. Е. Об очистке сточных вод от ионов тяжелых металлов с помощью гальванокоагуляционного метода / Химия и инженерная экология. XVII Международная научная конференция: Сборник статей. — Казань: Изд-во «Бриг», 2017. — С. 26 — 28.
12. Коноплев Е. В., Тимаков М. В., Софронова А. В., Лобанов С. А., Пойлов В. З. Патент RU 2253626. Способ очистки сточных вод от ионов аммония.

13. Глушанкова И. С., Бессонова Е. Н., Рудакова Л. В., Власова О. М., Давлетова С. Ф. Очистка сточных вод производства минеральных фторсодержащих солей от ионов аммония // Экология и промышленность России. — 2015. — № 7. — С. 16–19. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-7-16-19.

14. Тишкович А. В. Теория и практика аммонизации торфа. — Минск: Наука и техника, 1972. — 170 с.

15. Приказ Минсельхоза России от 13.12.2016 № 552 (ред. от 10.03.2020) «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения» (Зарегистрировано в Минюсте России 13.01.2017 № 45203). Доступ из справ.-правовой системы «КонсультантПлюс». **ПЛБ**

## REFERENCES

1. Studenok A. G., Studenok G. A., Revvo A. V. Evaluation of wastewater treatment methods from nitrogen compounds for drainage waters of mining enterprises. *Izvestiya ural'skogo gosudarstvennogo gornogo universiteta*. 2013, no. 2, pp. 26–30.

2. Evdokimova G. A., Ivanova L. A., Mozgova N. P., Myazin V. A., Fokina N. V. Floating bioplato for purification of quarry waste water from mineral nitrogen compounds in arctic conditions. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2015, no. 9, pp. 35–41. [In Russ].

3. Studenok A. G., Studenok G. A. Purification of open pit drainage waters of mining enterprises from nitrogen compounds at botanical sites with higher aquatic vegetation. *Aktual'nye problemy ekonomiki i upravleniya. Sbornik nauchnykh statey Shestoy vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiem* [Actual problems of economics and management. Collection of scientific articles of the Sixth All-Russian scientific and Practical conference with international participation], Ekaterinburg, Izd-vo UGGU, 2018, pp. 193–195. [In Russ].

4. Obiri-Nyarko F., Grajales-Mesa S. J., Malina G. An overview of permeable reactive barriers for in situ sustainable groundwater remediation. *Chemosphere*. 2014, vol. 111, pp. 243–259. DOI: org/10.1016/j.chemosphere.2014.03.112.

5. Vodyanitskiy Yu. N., Shoba S. A. Biogeochemical barriers for soil remediation and soil-groundwater treatment. *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 17: Pochvovedenie*. 2016, no. 3, pp. 3–15. [In Russ].

6. Ziajahromi S., Khanizadeh M., Khiadani M. Experimental evaluation of nitrate reduction from water using synthesis nanoscale zero-valent iron (NZVI) under aerobic conditions. *Middle-East Journal of Scientific Research*. 2013, vol. 16, no. 2, pp. 205–209. DOI: 10.5829/idosi.mejsr.2013.16.02.11661.

7. Sicilian A. Use of nanoscale zero-valent iron (NZVI) particles for chemical denitrification under different operating conditions. *Metals*. 2015, vol. 5, no. 3, pp. 1507–1519. DOI: 10.3390/met5031507.

8. Liu Y., Wang J. Reduction of nitrate by zero valent iron (ZVI)-based materials. A review. *Science of the Total Environment*. 2019, vol. 671, pp. 388–403. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.03.317.

9. Ona-Nguema G., Guerbois D., Pallud C., Brest J., Abdelmoula M., Morin G. Biogenic hydroxycarbonate green rust enhances nitrate removal and decreases ammonium selectivity during heterotrophic denitrification. *Minerals*. 2020, vol. 10, p. 818. DOI: 10.3390/min10090818.

10. Chanturiya V. A., Solozhenkin P. M. *Gal'vanokhimicheskie metody ochistki tekhnogennykh vod: Teoriya i praktika* [Galvanochemical methods of industrial water purification: Theory and practice], Moscow, Akademkniga, 2005, 204 p.

11. Kulakov A. A., Kuznetsova Yu. N., Denisova A. E. About wastewater treatment from heavy metal ions using galvanic coagulation method. *Khimiya i inzhenernaya ekologiya. XVII Mezhdunarodnaya nauchnaya konferentsiya: Sbornik statey* [Chemistry and Environmen-

tal Engineering. XVII International Scientific Conference: Collection of articles], Kazan, Izd-vo «Brig», 2017, pp. 26 – 28. [In Russ].

12. Konoplev E. V., Timakov M. V., Sofronova A. V., Lobanov S. A., Poylov V. Z. *Patent RU 2253626*. [In Russ].

13. Glushankova I. S., Bessonova E. N., Rudakova L. V., Vlasova O. M., Davletova S. F. Purification of waste water from the production of mineral fluorinated salts from ammonium ions. *Ekologiya i promyshlennost' Rossii*. 2015, no. 7, pp. 16 – 19. [In Russ]. DOI: 10.18412/1816-0395-2015-7-16-19.

14. Tishkovich A. V. *Teoriya i praktika ammonizatsii torfa* [Theory and practice of peat ammonification], Minsk, Nauka i tekhnika, 1972. 170 c.

15. *Ob utverzhdenii normativov kachestva vody vodnykh ob"ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya, v tom chisle normativov predel'no dopustimykh kontsentratsiy vrednykh veshchestv v vodakh vodnykh ob"ektov rybokhozyaystvennogo znacheniya. Prikaz Minsel'khoza Rossii ot 13.12.2016 № 552 (red. ot 10.03.2020)*. [On approval of water quality standards for fishery water bodies, including standards for maximum permissible concentrations of pollutants in the waters of fishery water bodies. Order of the Ministry of Agriculture of Russia of 13.12.2016 no. 552], Moscow, 2016. [In Russ].

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Глушанкова Ирина Самуиловна<sup>1</sup> — д-р техн. наук, профессор,

Бессонова Елена Николаевна<sup>1</sup> — инженер,

e-mail: el-81@yandex.ru,

Блинов Сергей Михайлович<sup>2</sup> — канд. геол.-минерал. наук,

доцент, зав. лабораторией,

Рудакова Лариса Васильевна<sup>1</sup> — д-р техн. наук,

профессор, зав. кафедрой,

Белкин Павел Андреевич<sup>2</sup> — канд. геол.-минерал. наук,

научный сотрудник,

<sup>1</sup> Пермский национальный исследовательский политехнический университет,

<sup>2</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет.

**Для контактов:** Бессонова Е. Н., e-mail: el-81@yandex.ru.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

I.S. Glushankova<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor,

E.N. Bessonova<sup>1</sup>, Engineer, e-mail: el-81@yandex.ru,

S.M. Blinov<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.),

Assistant Professor, Head of Laboratory,

L.V. Rudakova<sup>1</sup>, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of Chair,

P.A. Belkin<sup>2</sup>, Cand. Sci. (Geol. Mineral.), Researcher,

<sup>1</sup> Perm National Research Polytechnic University, Perm, Russia,

<sup>2</sup> Perm State University, Perm, Russia.

**Corresponding author:** E.N. Bessonova, e-mail: el-81@yandex.ru.

Получена редакцией 15.01.2021; получена после рецензии 01.03.2021; принята к печати 10.09.2021.

Received by the editors 15.01.2021; received after the review 01.03.2021; accepted for printing 10.09.2021.

