

ОЦЕНКА И АНАЛИЗ ГИДРОХИМИЧЕСКОГО РЕЖИМА ОБВОДНЕННЫХ КАРЬЕРОВ ПО ДОБЫЧЕ ФОСФОРИТОВЫХ РУД

Петров Д. С., Данилов А. С.

ANALYSIS AND ASSESSMENT OF THE HYDROCHEMICAL CONDITIONS OF FLOODED PHOSPHATE ROCK QUARRIES

Petrov D. S., Danilov A. S.

Аннотация

Введение. Приводятся результаты исследования современного экологического состояния поверхностных водных объектов, располагающихся в районе воздействия предприятий по добыче фосфатного сырья и в значительной степени измененных в результате техногенеза. Объекты накопленного экологического ущерба горных предприятий содержат основную массу (до 85 %) отходов, накопленных в отвалах, терриконах и хранилищах. Для условий Ленинградской области — это золошлаковые отвалы СПЗ «Сланцы» — 35 %, фосфогипс ПО «Фосфорит» и Волховского алюминиевого завода — около 18 %, кварцевые фосфоритсодержащие пески ПО «Фосфорит» — около 17 %, известняки — отходы обогащения горючих сланцев ПО «Ленинградсланец» — 12 %, золошлаковые отвалы ТЭЦ и ГРЭС — 5 %. Дается оценка гидрохимической обстановки, которая сформировалась на территории промышленной площадки ООО «ПГ «Фосфорит» в последние годы. **Методы.** В статье подробно описана методика проведения полевых и лабораторных исследований за период с 2017 по 2019 г., включая методику отбора проб и их анализа. Проанализировано содержание основных анионов и катионов ряда металлов методами высокоэффективной жидкостной хроматографии и атомно-абсорбционной спектроскопии. **Результаты.** В ходе проведенных исследований выявлен перечень загрязняющих веществ, содержание которых в поверхностных водных объектах превышает предельно допустимые концентрации. **Заключение.** В результате проведенных исследований сделан вывод об источниках накопленного экологического ущерба и посттехногенных процессах, влияющих на состояние водных объектов, определена трофность малых рек в зоне воздействия объектов горнодобывающей промышленности, выведенных из эксплуатации.

Ключевые слова: водохозяйственная рекультивация, посттехногенное воздействие, обводненные карьеры, техногенная сукцессия.

Abstract

Introduction. This article presents the results of studying the current environmental state of surface water bodies located in the affected area of phosphate mining enterprises and significantly altered as a result of technogenesis. Objects of accumulated environmental damage caused by mining enterprises contain the bulk (up to 85%) of waste accumulated in dumps, heaps and storages. In the Leningrad region, these are ash and slag dumps of the Slantsy Plant — about 35%, phosphogypsum of Fosforit Production Association and Volkhov Aluminum Smelter — about 18%, quartz sand with the content of phosphorite of Fosforit Production Association — about 17%, limestone — wastes from beneficiating oil shale of Leningradslanets Production Association — 12%, ash and slag dumps of CHPPs and state district power plants — 5%. In this regard, the authors assess the hydrochemical situation that has formed in the territory of the industrial site of OOO PG Fosforit in recent years. **Methods.** The article describes in detail a method for conducting field and laboratory studies for the period from 2017 to 2019, including a method for sampling and analysis. The authors analyze the content of basic anions and cations in a series of metals using high performance liquid chromatography and atomic absorption spectroscopy. **Results.** In the course of the studies, the authors revealed pollutants, the content of which in surface water bodies exceeds the maximum allowable concentrations. **Conclusions.** As a result of the studies, the authors identified sources of accumulated environmental damage and post-technological processes affecting the state of water bodies, and determined the trophicity of minor rivers in the affected area of decommissioned mining enterprises.

Keywords: water management reclamation, post-technological impact, flooded quarries, technogenic succession.

Введение

Одной из наиболее актуальных проблем современности является необходимость восстано-

ления продуктивности и народнохозяйственной ценности земель, нарушенных горными работами. Существует огромное количество научных

исследований, посвященных данной тематике, и сложившаяся нормативно-правовая база по рекультивации промплощадок отработанных рудников, шахт и карьеров. Однако после перевода нарушенных земель промышленности в категорию земель лесного или водного фонда остается проблема изучения сукцессионных процессов, которые развиваются на рекультивированных территориях [7, 11, 13, 15].

Можно выделить три фазы техногенеза на объектах горной промышленности в зависимости от стадии освоения месторождения: протехногенная — стадия развития геосистемы в период разведочных работ, прогрессивная (активная) и регрессивная (пассивная) [3, 4]. Акцентируя внимание на последних двух, следует отметить, что прогрессивная стадия техногенеза связана с периодом наиболее интенсивной эксплуатации объекта, когда техногенная нагрузка выражается в прямом вмешательстве в геологический комплекс и в изменении природного вещества. Регрессивный же техногенез связан с постэксплуатационным периодом, когда хозяйственная деятельность и технологические процессы прекращены и активного вмешательства со стороны человека в природные системы не происходит. Причем «активные» изменения, которые наблюдаются в природных системах в период функционирования объектов минерально-сырьевого комплекса, более изучены, чем те, которые происходят в следующей «пассивной» стадии техногенеза, когда осуществляются ликвидация и консервация горнодобывающего предприятия и рекультивация техногенно преобразованных территорий. Очевидно, что совокупность явлений на пассивной стадии горнорудного техногенеза является унаследованной от техногенных процессов активной стадии, однако эволюционирует под влиянием только природных факторов и ее следует определять как природно-техногенную или посттехногенную.

Объекты накопленного экологического ущерба (далее — Объект НЭУ) горных предприятий содержат основную массу (до 85 %) отходов, накопленных в отвалах, терриконах и хранилищах. Так, для условий Ленинградской области — это золошлаковые отвалы СПЗ «Сланцы» — 35 %, фосфогипс ПО «Фосфорит» и Волховского алюминиевого завода — около 18 %, кварцевые

фосфоритсодержащие пески ПО «Фосфорит» — около 17 %, известняки — отходы обогащения горючих сланцев ПО «Ленинградсланец» — 12 %, золошлаковые отвалы ТЭЦ и ГРЭС — 5 % [8]. Кроме полигонов и свалок, на территории предприятий только Ленинградской области имеются 12 шламовых накопителей, хранилищ, отвалов и полей, три золоотвала, один золопруд, одно гудронохранилище, одно фусохранилище, пять хвостохранилищ и один терриконник.

На территории Северо-Западного федерального округа находятся 3 крупных гипсонакопителя с массой отхода, находящегося на хранении, до 150 млн т, и ежегодно масса ФГ в накопителях увеличивается более чем на 4 млн т [5].

В данной работе изучается посттехногенное влияние промплощадки отработанного рудника «Южный» ООО «ПГ «Фосфорит» на гидрохимический режим водотоков, образовавшихся при рекультивации территорий.

ООО «ПГ «Фосфорит» — одно из ведущих производителей фосфорных удобрений и кормовых фосфатов на Северо-Западе России. Входит в состав минерально-химической компании «ЕвроХим». В настоящее время промплощадка ООО «ПГ «Фосфорит» занимает территорию площадью около 30 км², ограниченную с юга лесопосадками и трассой М11 «Нарва». Промплощадка граничит с населенными пунктами и сельскохозяйственными угодьями и частично проходит по берегу р. Луга.

В связи с реконструкцией производства в 2006 году был выведен из эксплуатации рудник «Южный», расположенный к югу от автотрассы. До 2010 года поэтапно осуществлялась рекультивация территории карьеров рудника и передача лесхозу спланированных земель. После прекращения принудительного водоотлива из карьеров произошло их постепенное заполнение водой, поднялся уровень подземных вод напорных ордовикского и кембро-ордовикского водоносных горизонтов до естественного состояния. В результате на территории рудника образовались водоемы вытянутой формы шириной 70–100 м. Химический состав карьерных вод в период разработки месторождения в значительной мере определялся притоком загрязненных подземных вод со стороны промплощадки химкомплекса, откуда происходило рассеивание сульфатного

ореола, а также фосфатов и аммония. После стабилизации уровня подземных вод на естественных отметках ожидалось постепенное снижение притока со стороны северного участка, так как в естественном состоянии направление разгрузки подземных вод в целом совпадает с направлением поверхностного стока, поступающего в р. Луга.

Вопросам формирования наземных и водных экосистем на рекультивированных территориях ООО «ПГ «Фосфорит» посвящено несколько научных работ [2, 12, 14], однако исследование гидрохимического режима сформировавшейся водной экосистемы представляет определенный научный и практический интерес.

Методы и материалы

Предварительные исследования водных объектов, находящихся в зоне влияния ООО «ПГ «Фосфорит», проводились в 2016–2017 гг. Изучались две системы водотоков, разгружающихся в реку Лугу: «ручей Гнилой – река Нотика» и «ручей Пятницкий – река Падожница», расположенные к западу и к востоку от промплощадки соответственно [1].

Результаты химического анализа воды показали превышения рыбохозяйственных нормативов содержания нитритов во всех пробах, а также несколько превышений предельно допустимых концентраций (ПДК) фторид-иона, сульфат-иона, железа и магния. Особый интерес вызвали повышенные концентрации сульфат-иона, поскольку пространственный градиент концентраций указывал на источник загрязнения, расположенный на промплощадке.

Дальнейшие исследования были направлены на выявление источника сульфатного загрязнения поверхностных и грунтовых вод. В частности, был проведен анализ доступной литературы и производственно-технической документации предприятия, отобрано и проанализировано несколько проб воды из водоемов на территории промплощадки, а также проведена экспериментальная оценка миграции соединений из отходов производства, имеющих контакт с атмосферными и, возможно, грунтовыми водами.

Анализ содержания химических компонентов в анализируемых пробах показал, что основным источником формирования гидрохимических ореолов загрязнения по сульфатам, фосфатам

и кальцию в северной части промплощадки являются отвалы фосфогипса. В подотвальных водах концентрации сульфатов достигали значений 2,5–3 г/л, концентрации фосфатов 1–1,2 г/л. По мере удаления от отвала в юго-западном направлении концентрации кратно снижались при возрастании рН поверхностных вод. На расстоянии 1,3 км концентрации сульфатов и фосфатов составили около 0,5 г/л.

Экспериментальная оценка миграционной способности компонентов фосфогипса подтвердила высокую способность сульфатов и кальция переходить в раствор при различных значениях кислотности. В серии экспериментов использовалась навеска фосфогипса массой 10 г, помещенная в 250 мл воды при значениях рН от 4 до 7,5. После перемешивания, отстаивания и фильтрации полученной суспензии анализировался химический состав полученной вытяжки. Содержание сульфатов составило от 1,5 до 1,7 г/л, содержание кальция — от 0,59 до 0,72 г/л (табл. 1).

Таким образом, очевиден факт наличия на северной «функционирующей» части промплощадки достаточно масштабных ореолов загрязнения с высокими значениями коэффициентов контрастности, привязанных к определенным источникам. С учетом достаточно сложной гидрологической и гидрогеологической обстановки было принято решение оценить степень влияния предприятия на химический состав водных объектов рекультивированных территорий.

Таблица 1

Элементы химического состава водной вытяжки из фосфогипса (мг/л)

Компонент	рН раствора после отстаивания и фильтрации		
	6,4	5,4	8,5
Ca ²⁺	594	588	720
Sr ²⁺	9,38	9,2	8,98
K ⁺	2,36	3,03	4,83
Mg ²⁺	0,828	1,06	0,96
Na ⁺	0,674	1,34	88,7
SO ₄ ²⁻	1519,5	1661,5	1726,5
PO ₄ ³⁻	2,7	9,4	6
Cl ⁻	71,05	20,7	43,75
F ⁻	0,25	2,2	–
Br ⁻	0,85	0,8	–
NO ₂ ⁻	2,45	0,9	2,4

Оценка гидрохимических показателей на территории бывшего рудника «Южный» проводилась ежегодно в весенне-летний период в 2017–2019 гг. (май-июнь). Места отбора проб выбирались в соответствии со сложившимся гидрологическим режимом водотоков с учетом доступности мест пробоотбора. Более подробно была изучена восточная часть карьерного поля. Схема расположения точек пробоотбора отражена на рисунке.

Условно пробы можно объединить в три группы:

1) фоновые пробы, отобранные в ручье Пятницкий в месте впадения в обводной канал: пробы 1 (17, 18, 19), а также проба 4 (17), которая отобрана из отводной нагорной канавы, являющейся искусственным участком русла ручья Пятницкий;

2) пробы, отобранные непосредственно в затопленном пространстве карьера (южная и центральная часть карьерного поля: пробы 2 (17, 18, 19), 3 (17, 18, 19) и 6 (19); северная часть карьерного поля: пробы 5 (17) и 4 (18, 19));



Карта-схема отбора проб. В скобках указан год отбора пробы (17 — 2017 г. и т. д.). Стрелками указано направление движения поверхностных вод

3) пробы из водотоков, разгружающих обводненную зону в сторону р. Луга: проба 6 (17), 5, 6 (18) и 5 (19).

Пробоотбор осуществлялся согласно действующим нормативным методикам. Большинство проб отбиралось с берега на глубине 30–50 см от поверхности в местах с наиболее быстрым течением или с внешнего берега излучин водотоков. Время доставки проб в лабораторию не превышало 24 часа.

Определение содержания основных загрязняющих компонентов проводилось с использованием приборной базы аккредитованного Научно-образовательного центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием Санкт-Петербургского горного университета. В соответствии с требованиями действующих федеральных нормативно-правовых актов в области природопользования и обеспечения экологической безопасности, оценка соответствия качества воды — это проверка соотношения между фактической концентрацией *C* и ПДК веществ. Согласно федеральному перечню методик выпол-

нения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области экологического мониторинга, в целях оценки содержания основных анионов применялся метод высокоэффективной жидкостной хроматографии, а для оценки содержания катионов металлов — оптическая эмиссионная спектрометрия (с индуктивно-связанной плазмой) и атомно-абсорбционная спектрометрия. При сравнении результатов измерений, выполненных в соответствии с принятыми методиками, наряду с допустимыми значениями (нормативами) необходимо учитывать показатели точности результатов, которые обеспечены выполнением измерений на поверенном измерительном оборудовании в аккредитованной лаборатории.

Полученные результаты соотносились с нормативами ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения [9].

Результаты

Результаты анализа химического состава отобранных проб воды представлены в табл. 2. Мы искали типичные компоненты, ожидая вы-

Таблица 2

Результаты гидрохимического анализа проб

Год	№ пробы	Концентрация вещества, мг/л								
		SO ₂ ³⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	Fe (общ)	NH ⁴⁺	F ⁻	NO ₂ ⁻	Mg	Mn ²⁺
2017	1	1,66	<0,1	0,2	1,245	2,14	0,11	<0,05	–	–
	2	112,3	<0,1	0,09	0,112	0,41	0,36	0,08	–	–
	3	128,4	<0,1	0,07	0,066	0,44	0,35	0,12	–	–
	4	2,04	<0,1	0,17	1,326	2,31	0,13	<0,05	–	–
	5	117,1	<0,1	0,05	0,069	0,23	0,33	0,09	–	–
	6	69,9	<0,1	7,41	0,576	0,99	0,18	<0,05	–	–
2018	1	15,8	<0,1	0,5	3,0	0,83	0,11	0,43	5,3	–
	2	109,6	<0,1	<0,08	<0,1	0,37	0,33	0,33	65,3	–
	3	108,3	<0,1	<0,08	<0,1	0,42	0,22	0,33	63,7	–
	4	85,1	<0,1	<0,08	0,5	0,41	0,32	0,47	51,2	–
	5	22,1	<0,1	3,8	5,2	5,79	0,51	0,4	13,1	–
	6	13,6	<0,1	0,4	1,3	0,58	0,35	0,44	33,5	–
2019	1	50	<0,1	8,7	1,08	–	–	–	69	0,087
	2	65	<0,1	7,7	0,051	–	–	–	60,8	0,013
	3	56	<0,1	1,6	0,075	–	–	–	51	0,013
	4	115	<0,1	8	0,032	–	<0,5	<2,5	59	0,017
	5	85	<0,1	<4,0	0,169	–	<0,5	<2,5	47	0,061
	6	84	<0,1	2	<0,2	–	–	–	58	0,010
		Норматив (ПДК рыбохозяйственных водных объектов), мг/л								
		100	0,05 (olig)	40	0,1	0,5	+0,05 к фону	0,08	40	0,01

Примечание. Жирным шрифтом выделены концентрации, достоверно превышающие норматив (превышения по фторидам указаны в сравнении с пробами № 1).

соких концентраций от таких компонентов, как фосфаты, сульфаты, аммонийный азот. Поэтому ряд показателей был включен в программу наблюдений только в 2018–2019 гг.

Заключение

1. Сформированные в результате рекультивации водные объекты сохраняют статус олиго-мезотрофных, отличаются прозрачностью воды и низкими концентрациями биогенных элементов.

2. Повышенные концентрации аммонийного азота и железа характерны для фоновых проб 1(17, 18, 19), взятых из ручья Пятницкий выше его впадения в обводную нагорную канаву, а также для проб 4, 6 (17), 5, 6 (18) и 6 (19), характеризующих водотоки, разгружающие обводненную зону карьеров в сторону р. Луги. Повышенные концентрации данных компонентов достаточно типичны для болотных вод [6, 10]. Это указывает на естественный характер загрязнения, так как ручьи исследуемой территории являются болотными. Например, ручей Пятницкий берет свое начало в болоте Пятницкий мох.

3. В пробах 2, 3, 5 (17), 2, 3, 4 (18), 4 (19) наблюдаются превышения по нитритам и сульфатам, что является следствием продолжающейся разгрузки загрязненных грунтовых вод с промплощадки, расположенной к северу от автотрассы, в заполненные водой карьеры Южного рудника и согласуется с результатами других исследований [14].

4. Превышения нормативов по фторидам, магнию и марганцу, по-видимому, вызваны выщелачиванием этих элементов из обводненных горных пород, поскольку не носят пространственно-ориентированного характера и проявляются на всей территории затопленных карьерных выемок. В фосфоритных рудах Кингисеппского месторождения содержится 0,3–2 % MgO и 0,5–0,6 % F.

5. Ожидаемого загрязнения исследуемых водных объектов фосфатами не обнаружено.

6. Явной тенденции к увеличению концентраций загрязняющих веществ в течение трех лет не выявлено. Концентрации железа, напротив, постепенно снижаются.

Исследования выполнены при поддержке Центра коллективного пользования высокотехнологичным оборудованием Санкт-Петербургского горного университета.

Литература

1. Бродская, Н. А., Мякишева, Н. В. и Александрова, К. В. (2015). Оценка разномасштабного взаимодействия поверхностных и подземных вод. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 38, сс. 36–50.
2. Бродская, Н. А. и Павлов, А. Н. (2013). Возможности развития ландшафтно-экологического туризма на территориях с повышенной техногенной нагрузкой. Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета, № 30, сс. 155–172.
3. Елохина, С. Н. (2005). Техноприродные опасности на затопленных рудниках Урала. Известия вузов. Горный журнал, № 3, сс. 120–127.
4. Елохина, С. Н. (2013). Горнорудный техногенез постэксплуатационной стадии на территории Урала. Литосфера, № 5, сс. 151–164.
5. Мешеряков, Ю. Г. и Федоров, С. В. (2015). Проблемы промышленной переработки фосфогипса в РФ, состояние и перспективы. Фундаментальные исследования, № 6–2, сс. 273–276.
6. Министерство сельского хозяйства Российской Федерации (2016). Приказ № 552 от 13.12.2016 «Об утверждении нормативов качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативов предельно допустимых концентраций вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения». М.: Министерство сельского хозяйства Российской Федерации, 153 с.
7. Пашкевич, М. А., Бек, Дж., Матвеева, В. А. и Алексеенко, А. В. (2020). Биогеохимическая оценка состояния почвенно-растительного покрова в промышленных, селитебных и рекреационных зонах Санкт-Петербурга. Записки Горного института, Т. 241, сс. 125–130. DOI: 10.31897/PMI.2020.1.125.
8. Пашкевич, М. А., Матвеева, В. А. и Данилов, А. С. (2019). Исследование миграции загрязняющих веществ с территорий техногенных массивов Кольского полуострова. Горный журнал, № 1, сс. 17–21.
9. Петров, Д. С. и Кузовлева, В. Г. (2017). Анализ экологического состояния водотоков в условиях посттехногенного воздействия. Международный научный журнал «Инновационная наука», Т. 2, № 2, сс. 306–309.
10. Потапова, Т. М., Марков, М. Л., Носаль, А. П. и Савичев, О. Г. (2018). Фоновые показатели эколого-геохимического состояния вод верховых болот в таежной зоне на территории Российской Федерации. Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов, Т. 329, № 9, сс. 83–92.
11. Blanchette, M. L. and Lund, M. A. (2016). Pit lakes are a global legacy of mining: an integrated approach to achieving sustainable ecosystems and value for communities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 23, pp. 28–34. DOI: 10.1016/j.cosust.2016.11.012.
12. Dmitrakova, Ya. A. and Abakumov, E. V. (2018). Restoration of soils and vegetation on reclamation sites of the Kingisepp phosphorite field. *Eurasian Soil Science*, Vol. 51, Issue 5, pp. 588–597. DOI: 10.1134/S1064229318050022.
13. Salmon, S. U., Hipsey, M. R., Wake, G. W., Ivey, G. N. and Oldham, C. E. (2017). Quantifying lake water quality

evolution: coupled geochemistry, hydrodynamics, and aquatic ecology in an acidic pit lake. *Environmental Science and Technology*, Vol. 51, Issue 17, pp. 9864–9875. DOI: 10.1021/acs.est.7b01432.

14. Vampilova, L. B., Sokolova, A. A., Brodskaya, N. A., Sevastyanov, D. V. and Trifonov, A. N. (2018). Problems of geotourism development in the north-western recreational region of Russia. In: International Multidisciplinary Scientific GeoConference “Surveying Geology and Mining Ecology Management” SGEM, July 02–08, 2018. Albena: STEF92 Technology Ltd., pp. 731–738. DOI: 10.5593/sgem2018/5.2/S20.095.

15. Van Etten, E. J. B., McCullough, C. D. and Lund, M. A. (2014). Setting goals and choosing appropriate reference sites for restoring mine pit lakes as aquatic ecosystems: case study from South West Australia. *Mining Technology. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*, Vol. 123, Issue 1, pp. 9–19. DOI: 10.1179/1743286313Y.0000000051.

References

1. Brodskaya, N. A., Myakisheva, N. V. and Aleksandrova, K. V. (2015). The estimation of different scale surface and undersurface waters interrelation. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, Issue 38, pp. 36–50.

2. Brodskaya, N. A. and Pavlov, A. N. (2013). Possibilities of landscape-ecological tourism development on the territories with heightened anthropogenic impact on the environment. *Proceedings of the Russian State Hydrometeorological University*, Issue 30, pp. 155–172.

3. Yelokhina, S. N. (2005). Technological and natural hazards in the flooded mines of the Urals. *News of the Higher Institutions. Mining Journal*, No. 3, pp. 120–127.

4. Elochina, S. N. (2013). Technical changes of geological environment at mining postoperational stage in the Urals. *Lithosphere (Russia)*, No. 5, pp. 151–164.

5. Mescheryakov, Y. G. and Fedorov, S. V. (2015). Problems of industrial phosphogypsum processing in Russia, state and prospects. *Fundamental Research*, No. 6-2, pp. 273–276.

6. Ministry of Agriculture of the Russian Federation (2016). Order No. 552 dd. 13.12.2016 “Concerning approval of water quality standards for fishery water bodies, including maximum permissible concentrations of hazardous substances in waters of fishery water bodies”. Moscow: Ministry of Agriculture of the Russian Federation, 153 p.

7. Pashkevich, M. A., Bech, J., Matveeva, V. A. and Alekseenko, A. V. (2020). Biogeochemical assessment of soils and plants in industrial, residential and recreational areas of Saint Petersburg. *Journal of Mining Institute*, Vol. 241, pp. 125–130. DOI: 10.31897/PML.2020.1.125.

8. Pashkevich, M. A., Matveeva, V. A. and Danilov, A. S. (2019). Migration of pollutants from the mining waste disposal territories on the Kola Peninsula. *Gornyi Zhurnal*, No. 1, pp. 17–21.

9. Petrov, D. S. and Kuzovleva, V. G. (2017). Analysis of the environmental state of watercourses in the conditions of post-technological impact. *International Scientific Journal “Innovation Science”*, Vol. 2, No 2, pp. 306–309.

10. Potapova, T. M., Markov, M. L., Nosal, A. P. and Savichev, O. G. (2018). Background parameters of ecological and geochemical condition of waters of oligotrophic bogs in the taiga zone in the Russian Federation. *Bulletin of the Tomsk Polytechnic University. Geo Assets Engineering*, Vol. 329, No. 9, pp. 83–92.

11. Blanchette, M. L. and Lund, M. A. (2016). Pit lakes are a global legacy of mining: an integrated approach to achieving sustainable ecosystems and value for communities. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, Vol. 23, pp. 28–34. DOI: 10.1016/j.cosust.2016.11.012.

12. Dmitrakova, Ya. A. and Abakumov, E. V. (2018). Restoration of soils and vegetation on reclamation sites of the Kingisepp phosphorite field. *Eurasian Soil Science*, Vol. 51, Issue 5, pp. 588–597. DOI: 10.1134/S1064229318050022.

13. Salmon, S. U., Hipsey, M. R., Wake, G. W., Ivey, G. N. and Oldham, C. E. (2017). Quantifying lake water quality evolution: coupled geochemistry, hydrodynamics, and aquatic ecology in an acidic pit lake. *Environmental Science and Technology*, Vol. 51, Issue 17, pp. 9864–9875. DOI: 10.1021/acs.est.7b01432.

14. Vampilova, L. B., Sokolova, A. A., Brodskaya, N. A., Sevastyanov, D. V. and Trifonov, A. N. (2018). Problems of geotourism development in the north-western recreational region of Russia. In: International Multidisciplinary Scientific GeoConference “Surveying Geology and Mining Ecology Management” SGEM, July 02–08, 2018. Albena: STEF92 Technology Ltd., pp. 731–738. DOI: 10.5593/sgem2018/5.2/S20.095.

15. Van Etten, E. J. B., McCullough, C. D. and Lund, M. A. (2014). Setting goals and choosing appropriate reference sites for restoring mine pit lakes as aquatic ecosystems: case study from South West Australia. *Mining Technology. Transactions of the Institutions of Mining and Metallurgy: Section A*, Vol. 123, Issue 1, pp. 9–19. DOI: 10.1179/1743286313Y.0000000051.

Авторы

Петров Денис Сергеевич, канд. техн. наук, доцент
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: petrov-d@yandex.ru

Данилов Александр Сергеевич, канд. техн. наук
Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия
E-mail: aleksandrdsdanilov@gmail.com

Authors

Petrov Denis Sergeevich, PhD in Engineering, Associate Professor
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: petrov-d@yandex.ru

Danilov Aleksandr Sergeevich, PhD in Engineering
Saint Petersburg Mining University, Saint Petersburg, Russia
E-mail: aleksandrdsdanilov@gmail.com