

УДК 622.882:622.271.45

ГИДРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА И ЭКОЛОГИЧЕСКОЕ СОСТОЯНИЕ ВОДНЫХ ЭКОСИСТЕМ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ ПРЕДПРИЯТИЯ ПО ПРОИЗВОДСТВУ МИНЕРАЛЬНЫХ УДОБРЕНИЙ*



Д. С. ПЕТРОВ,
доцент, канд. техн. наук



А. С. ДАНИЛОВ,
доцент, канд. техн. наук,
aleksandr.danilov@gmail.com

Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II,
Санкт-Петербург, Россия

Введение

Местоположение, гидрологические характеристики и рельеф дна в сочетании с изменением климата и сильной антропогенной нагрузкой являются основными факторами, определяющими экологическое состояние Балтийского моря [1, 2]. Проблемам его эвтрофикации и загрязнения посвящены многочисленные научные работы [3–5]. Эвтрофикация обусловлена чрезмерным поступлением биогенных веществ со стоком рек, грунтовыми водами и атмосферным переносом, что приводит к осадконакоплению органического материала и снижению концентрации кислорода в придонном слое воды [6–8]. Известно, что восточная часть Финского залива является одним из районов Балтийского моря, испытывающих наиболее интенсивную техногенную нагрузку. Помимо проблем, связанных с загрязнением биогенными веществами и гипоксии [9, 10], требуется отслеживать поступление тяжелых металлов и ксенобиотиков [11]. Как следствие, выявление и изучение возможных частных источников загрязнения Финского залива различными поллютантами, особенно соединениями фосфора, представляется крайне актуальной задачей [12, 13].

Одним из потенциальных источников поступления поллютантов в р. Луга является ООО «ПГ Фосфорит» – предприятие

Приведены результаты гидроэкологических исследований в районе расположения ООО «ПГ «Фосфорит» – предприятия по производству минеральных удобрений и другой химической продукции. Отмечено, что после рекультивации карьеров Южного рудника гидрологический режим рассматриваемой территории изменился. Также установлено, что при определенных гидрологических условиях объекты складирования отходов производства могут представлять угрозу для гидрозкосистемы р. Луга и способствовать процессу эвтрофикации Финского залива.

Ключевые слова: эвтрофикация, техногенное воздействие, обводненные карьеры, техногенная сукцессия, отвалы фосфогипса
DOI: 10.17580/gzh.2023.09.12

по производству фосфорных удобрений и кормовых фосфатов, расположенное в Кингисеппском районе Ленинградской области. Данное исследование включало в себя изучение гидрологического и гидрохимического режима водных объектов на обширной территории как в границах промплощадки, так и за ее пределами.

Актуальность исследований

На территории ООО «ПГ «Фосфорит» расположено несколько крупных хранилищ отходов: хвостохранилища, шламонакопители и отвалы фосфогипса. Общая площадь, занятая техногенными массивами на территории предприятия, превышает 600 га. Известно, что техногенно преобразованные территории горных предприятий [14–17] и особенно хранилища горнопромышленных отходов [18–21] представляют серьезную угрозу гидрозкосистемам. В настоящее время существует проблема создания эффективного технологического процесса для переработки фосфогипса в продукцию [22–24], однако в последние годы площадь отвалов фосфогипса на предприятии увеличивается.

В рамках проекта BALTHAZAR в 2011 г. были выявлены значительные поступления растворимых форм фосфора с территории промплощадки ООО «ПГ «Фосфорит» в р. Луга [25]. В ряде источников [25, 26] отмечено, что поступление фосфора в реку может происходить через левый приток р. Луга – ручей Верховской, исток которого находится к западу от техногенных массивов в районе многочисленных искусственных водоемов и обводненных карьеров.

*Работа выполнена в рамках государственного задания Санкт-Петербургского горного университета № FSRRW-2023-0002.

© Петров Д. С., Данилов А. С., 2023

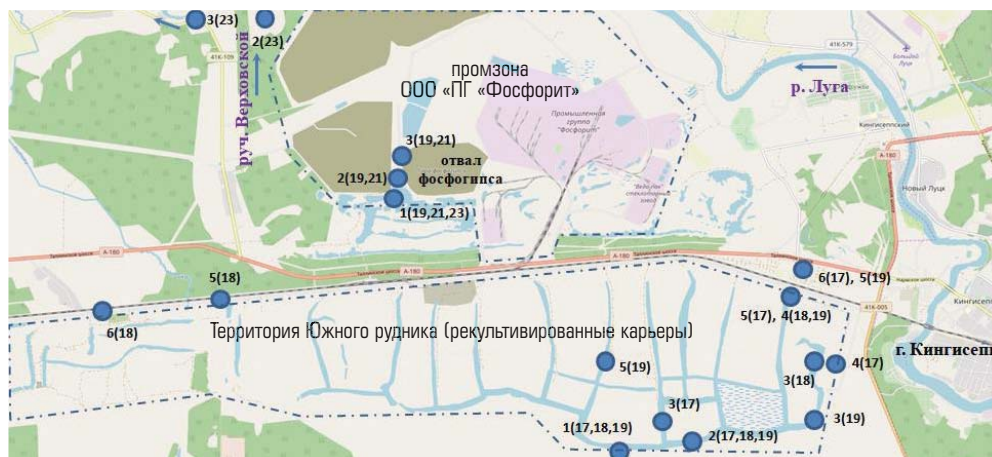


Рис. 1. Карта-схема отбора проб.

В скобках указаны годы отбора проб (17 – 2017 и т. д.)

Отметим, что наблюдения за качеством вод реки [27] в рамках системы государственного мониторинга проводят в створах, расположенных в 5 км выше и 33 км ниже по течению от места впадения ручья Верховской, что, очевидно, не позволяет оценить вклад данного источника в загрязнение р. Луга.

До 2006 г. в границы предприятия входила территория, расположенная к югу от автотрассы, где добывали фосфоритовую руду. Однако в связи с реконструкцией производства рудник был выведен из эксплуатации. На территории была проведена лесо- и водохозяйственная рекультивация. После прекращения искусственной откачки воды из карьеров произошло их постепенное заполнение водой со стороны Нарвского водохранилища. Уровень подземных вод постепенно достиг естественных отметок. В настоящее время на территории рудника образовались водоемы вытянутой формы шириной 70–100 м. После 2010 г. наблюдения за экологическим состоянием водных объектов, сформировавшихся на территории отработанных карьеров, не проводили. В настоящее время сток воды в р. Луга с территории затопленных карьеров осуществляется через две системы водотоков: ручей Гнилой – река Нотика и ручей Пятницкий – река Падожница, расположенных к западу и востоку от действующей промплощадки соответственно.

На действующей промплощадке к северу от трассы сформировалась депрессионная воронка грунтовых вод, уровень которых определяется количеством осадков.

Важно отметить, что в связи с заполнением карьеров Южного рудника сток в р. Луга с территории действующей промплощадки увеличился. Поступление стока в реку осуществляется как через систему канализации ООО «ПГ Фосфорит», так и через небольшие, часто временные, поверхностные ручьи. В первом случае сток проходит очистные сооружения и сбрасывается через русло ручья Горский. Во втором варианте высока вероятность образования потоков с высокими концентрациями загрязняющих веществ.

Вопросам формирования наземных и водных экосистем на существующей и бывшей территориях ООО «ПГ «Фосфорит» посвящено несколько научных работ [28–31]. В отдельных работах [30, 31] отмечается, что движение загрязненных грунтовых вод с промплощадки в заполненные водой карьеры Южного рудника является негативным фактором, однако гидрохимические показатели не приводятся. Также отметим работу [32], где указано, что содержание подвижных форм таких металлов, как кадмий, марганец и стронций, в рекультивированных отвалах Южного рудника и в районе расположения техногенных массивов действующей промплощадки в несколько раз превышает фоновые значения для почв рассматриваемого района. Сравнение концентраций фосфора в пробах почв сравниваемых площадок указывает на превышение фоновых значений в 10–20 раз.

Основной целью настоящей работы являлось изучение гидрохимического режима водных объектов в районе действующей промплощадки севернее трассы Санкт-Петербург – Таллинн, а также на территории отработанных и рекультивированных карьеров, расположенных к югу от трассы. Результаты представляют интерес как с точки зрения выявления локальных источников загрязнения окружающей среды, так и с целью оценки вклада предприятия в загрязнение Балтийского моря биогенными элементами.

Методика и материалы исследований

Полевые исследования к югу от трассы проводили в 2017–2019 гг. В 2019–2023 гг. оценивали химические показатели в отдельных водоемах северной (действующей) части промплощадки и в ручье Верховском, впадающем в р. Луга.

Гидрохимические показатели оценивали в весенне-летний период (май–июнь), за исключением пробоотбора в 2023 г., который проводили в январе. Места отбора проб выбирали в соответствии со сложившимся гидрологическим режимом водотоков с учетом доступности мест пробоотбора.

Схема расположения точек пробоотбора показана на **рис. 1**.

Пробоотбор осуществляли согласно действующим нормативным методикам [33]. Большинство проб отбирали 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 ч.

Содержание основных загрязняющих компонентов определяли 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 предельно допустимой концентрацией (ПДК) веществ. Согласно федеральному перечню методик выполнения измерений, допущенных к применению при выполнении работ в области экологического мониторинга, в целях оценки содержания основных анионов применяли метод высокоэффективной жидкостной хроматографии (HPLC-20 Shimadzu), а для определения содержания катионов металлов – оптическую эмиссионную спектрометрию (с индуктивно связанной плазмой) (ICPE 9000 Shimadzu) и атомно-абсорбционную спектрометрию (AA-6000 Shimadzu). При сравнении результатов измерений, выполненных в соответствии с принятыми методиками, наряду с допустимыми значениями (нормативами) необходимо учитывать точность результатов, которая обеспечена выполнением измерений на поверенном измерительном оборудовании в аккредитованной лаборатории.

Полученные результаты соотносили с нормативами предельно допустимых концентраций вредных веществ в водных объектах рыбохозяйственного назначения [34].

Также в 2021 г. было отобрано несколько проб фосфогипса для оценки миграционной способности компонентов отходов. В серии экспериментов использовали навеску фосфогипса массой 10 г, помещенную в 250 мл воды при значениях pH = 5,9. После перемешивания (45 мин), отстаивания (90 мин) и фильтрации (размер пор 2–3 мкм) полученной суспензии анализировали химический состав вытяжки. Анализ количественного содержания анионов и катионов, вымываемых в раствор из твердой фазы, проводили на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно связанной плазмой (ICP-AES) и ионном хроматографе Shimadzu 30.

Результаты и их обсуждение

Результаты анализа химического состава проб воды с территории отработанных карьеров представлены в **табл. 1**.

Водоемы, сформировавшиеся на месте карьерных выемок, имеют олигомезотрофный статус. В большинстве проб

Таблица 1. Результаты гидрохимического анализа проб с территории отработанных карьеров

Год	Номер пробы	Отношение фактической концентрации к ПДК _{р/к}								
		SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	NO ₃ ⁻	Fe (общ)	NH ₄ ⁺	F ⁻	NO ₂ ⁻	Mg	Mn ²⁺
2017	1	0,02	<0,5	0,01	12,45	4,28	0,69	0,63	–	–
	2	1,12	<0,5	<0,01	1,12	0,82	2,25	1	–	–
	3	1,28	<0,5	<0,01	0,66	0,88	2,19	1,50	–	–
	4	0,02	<0,5	<0,01	13,26	4,62	0,81	0,63	–	–
	5	1,17	<0,5	<0,01	0,69	0,46	2,06	1,13	–	–
	6	0,70	<0,5	0,19	5,76	1,98	1,13	0,63	–	–
2018	1	0,16	<0,5	0,01	30	1,66	0,69	5,38	0,13	–
	2	1,10	<0,5	<0,01	0,50	0,74	2,06	4,13	1,63	–
	3	1,08	<0,5	<0,01	0,50	0,84	1,38	4,13	1,59	–
	4	0,85	<0,5	<0,01	5	0,82	2	5,88	1,28	–
	5	0,22	<0,5	0,10	52	11,58	3,19	5	0,33	–
	6	0,14	<0,5	0,01	13	1,16	2,19	5,50	0,84	–
2019	1	0,50	<0,5	0,22	10,80	–	–	–	1,73	8,70
	2	0,65	<0,5	0,19	0,51	–	–	–	1,52	1,30
	3	0,56	<0,5	0,04	0,75	–	–	–	1,28	1,30
	4	1,15	<0,5	0,20	0,32	–	–	–	1,48	1,70
	5	0,85	<0,5	0,05	1,69	–	–	–	1,18	6,10
	6	0,84	<0,5	0,05	1,00	–	–	–	1,45	1

Примечание. Жирным шрифтом выделены значения, достоверно превышающие нормативные показатели.

Таблица 2. Результаты гидрохимического анализа проб с промплощадки предприятия в 2019–2021 гг.

Год	Номер пробы	Концентрация, мг/л						
		SO ₄ ²⁻	P _{tot}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe (total)	Mn ²⁺	Si ²⁺
2019	1	775	353,7	80	218,5	–	–	0,7
	2	818	370,3	66	203	–	–	0,7
	3	2822	395,8	275	238	–	–	3,3
2021	1	690	303,2	87,3	184,0	0,02	1,93	1,43
	2	939	205,4	121,0	153,0	0,01	1,75	1,28
	3	2556	498,1	413,0	196,0	1,87	3,62	5,72
		Предельно допустимые концентрации, мг/л						
		100	0,2 P _{tot} (эвтроф.)	180	40	0,1	0,01	0,4

Примечание. Жирным шрифтом выделены концентрации, достоверно превышающие нормативные показатели.

не обнаружены превышения нормативов по биогенным веществам – соединениям фосфора и азота.

Превышение предельно допустимых концентраций железа и аммонийного азота в водных объектах рыбохозяйственного назначения характерно для проб, химический состав которых

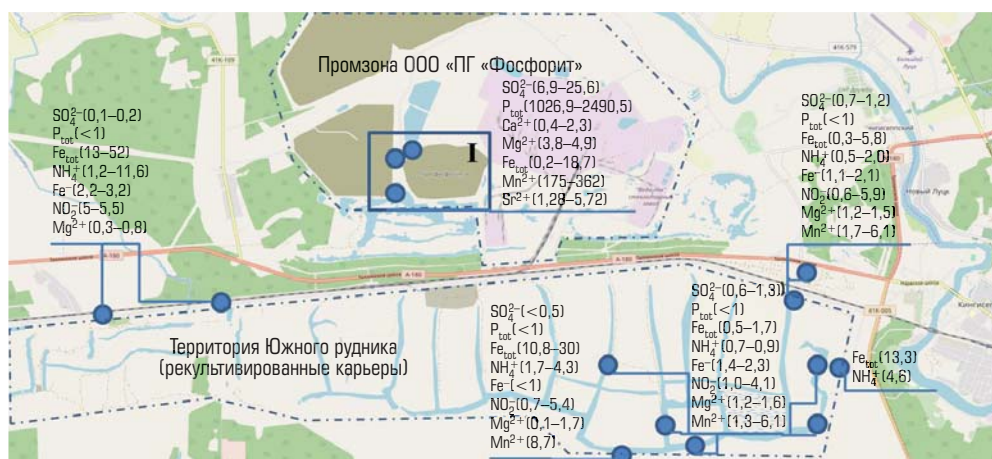


Рис. 2. Кратность превышения предельно допустимых концентраций в исследованных водных объектах в 2017–2021 гг. (в скобках указан разброс от минимальных до максимальных значений)

определяется естественными факторами. Это в первую очередь место впадения болотных вод через ручей Пятницкий в обводную нагорную канаву, а также ручьи, соединяющие территорию Южного рудника и водоемы промплощадки к северу от автотрассы.

Незначительное превышение предельно допустимых концентраций сульфатов отмечено в северной части карьерного поля. Это позволяет сделать вывод, что источники загрязнения сульфатами находятся на действующей промплощадке предприятия.

Повышенные концентрации марганца, нитратов, магния и фторидов характерны для большинства отобранных проб. Предполагаемым источником магния и фторидов может быть вскрышная порода внутренних отвалов затопленных карьерных выработок.

Положительной временной динамики концентраций загрязняющих веществ не выявлено.

Результаты анализа химического состава проб воды с действующей промплощадки представлены в **табл. 2**.

По результатам химического анализа подотвальных вод можно сделать вывод, что именно отвал фосфогипса служит источником загрязнения грунтовых и, как следствие, поверхностных вод рассматриваемой территории. Непосредственно вблизи отвала превышение нормативов отмечено по всем анализируемым показателям. Наблюдаемое загрязнение сульфатами, концентрации которых в 2021 г. достигли 25,6 ПДК в водоемах на границе отвалов, снижается по мере удаления от источника, однако контрастность ореола загрязнения сульфатами остается значительной даже за ограждающей дамбой. Еще более значимыми оказались концентрации ортофосфатов в пересчете на неорганический фосфор. ПДК для эвтрофных водоемов превышены в тысячи раз.

Для наглядности результаты анализа всех проб за 2017–2021 гг. обобщены и представлены на **рис. 2**.

В январе 2023 г. с целью оценки сезонной динамики концентраций в подотвальных водах, а также возможности миграции фосфора в р. Луга были отобраны пробы как в районе

Таблица 3. Результаты гидрохимического анализа проб воды, отобранных возле отвала и в ручье Верховском в 2023 г.

Год	Номер пробы	Концентрация, мг/л						
		SO ₄ ²⁻	P _{tot}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe (total)	Mn ²⁺	Sr ²⁺
2023	1	172,6	44,24	30	30	0,08	0,34	0,21
	2	159,3	0,85	42	25	0,41	0,21	0,17
	3	60,4	0,39	32	19	0,35	0,04	0,16
		Предельно допустимые концентрации, мг/л						
		100	0,2 P _{tot} (эвтроф.)	180	40	0,1	0,01	0,4

Примечание. Жирным шрифтом выделены концентрации, достоверно превышающие нормативные показатели.

расположения отвала фосфогипса, так и в ручье Верховском, исток которого находится к западу от техногенных массивов ООО «ПГ «Фосфорит». Пробоотбор проводили в период активного снеготаяния, что, с одной стороны, позволило отбирать пробы в фазу повышения уровня грунтовых вод, а с другой – могло снизить концентрации за счет разбавления талыми водами. Результаты анализа химического состава проб воды представлены в **табл. 3**.

Можно отметить, что в зимний период времени концентрации загрязняющих веществ в подотвальных водах существенно уменьшились. Концентрации сульфатов превышали норматив примерно в 2 раза, а концентрации фосфора – в 221 раз (в летний период – в 17 и в 1760 раз в среднем соответственно). В пробе воды, отобранной в устье ручья Верховской, концентрации существенно снижаются, сульфаты достигают значений нормативов, а превышение по фосфору составляет от 2 до 4 значений ПДК.

Экспериментальная оценка миграционной способности компонентов фосфогипса подтвердила высокую способность сульфатов, фосфатов и кальция переходить в раствор (**рис. 3**).

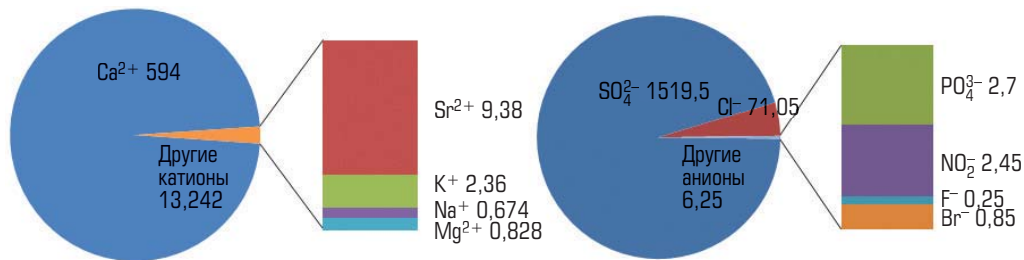


Рис. 3. Концентрации катионов (слева) и анионов (справа) в водной вытяжке из фосфогипса при исходном pH = 5,9 (мг/л)

В ходе эксперимента pH раствора изменялся от 5,9 до 6,4, при этом происходило выщелачивание ряда соединений. Наиболее интенсивно выходят в раствор сульфаты и кальций. Содержание сульфатов в фильтрате составило от 1,5 до 1,7 г/л, кальция – от 0,59 до 0,72 г/л. Выщелачивание фосфора происходит не столь интенсивно, концентрации фосфатов составили от 2,7 до 9,4 мг/л.

Выводы

По результатам исследования можно составить комплексную картину воздействия на экосистему р. Луга как со стороны действующей промплощадки ООО «ПГ Фосфорит», так и со стороны рекультивированных территорий Южного рудника.

Вскрышные породы, складированные в отработанных карьерах к югу от трассы Санкт-Петербург – Таллинн, незначительно влияют на гидрохимический режим рассматриваемой территории. Содержание поллютантов в ручьях и реках, вытекающих с территории карьеров и впадающих в р. Луга, в большинстве случаев соответствует нормативам, установленным для водных объектов рыбохозяйственного назначения, или фоновым концентрациям, характерным для природных водотоков рассматриваемой территории.

При этом затопление карьеров повлекло повышение уровня грунтовых вод не только к югу, но и к северу от трассы – на действующей промплощадке и, как следствие, спровоцировало увеличение потока грунтовых вод в сторону

реки. Расположенные на действующей промплощадке хранилища отходов, в частности отвалы фосфогипса, являются реальными источниками загрязнения грунтовых и поверхностных вод сульфатами и фосфатами. Загрязнение поверхностных и грунтовых вод заметно проявляется в северо-западной части действующей промплощадки к западу от хранилища фосфогипсов. Расположение хранилищ на нарушенных грунтах отработанных карьеров способствует инфильтрации поллютантов и их неорганизованному сбросу в р. Луга через временные водотоки и ручей Верховской.

Указанные особенности гидрологического и гидрохимического режима обуславливают ряд рекомендаций по охране водных ресурсов рассматриваемой территории. В первую очередь необходим строгий контроль качества воды ручья Верховской в створе деревни Сала и р. Луга в створе деревни Пулково, особенно в весенний период с максимальным снеговым паводком. Дальнейшее складирование фосфогипса на рассматриваемой территории должно быть прекращено. Необходимо проведение научных изысканий, направленных на поиск путей утилизации и использования накопленных отходов.

Библиографический список

См. англ. блок.

«GORNYI ZHURNAL», 2023, № 9, pp. 83–88
DOI: 10.17580/gzh.2023.09.12

Hydrochemistry and ecology of aquatic ecosystems in influence zones of mineral fertilizers production

Information about authors

D. S. Petrov¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences

A. S. Danilov¹, Associate Professor, Candidate of Engineering Sciences,
aleksandr.danilov@gmail.com

¹Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University, Saint-Petersburg, Russia

Abstract

Industrially altered areas of mining facilities and, especially, mining waste storages constitute a serious threat to hydro-ecosystems.

The article describes the hydro-ecological studies carried out in the location area of Fosforit Industrial Group—a manufacture of mineral fertilizers and other chemical products. The data were obtained over the period from 2017 to 2023. It is highlighted that after reclamation of surface mines of Yuzhny Mine Management, the hydrogeological regime in the area has changed. The water bodies generated in the voids of open pits mined-out with internal dumping belong to an oligotrophic–mesotrophic type. The water content of fluorides and nitrates complies with the standards set for the fish-husbandry water bodies. The concentrations of ammonia nitrogen, nitrites, sulfates, fluorides and such metals as

iron and manganese are below the background values. In the meanwhile, in the water bodies westward of the operating mine infrastructure, where the phosphogypsum dumps are located, a hydrochemical envelope is formed, with high concentrations of phosphorus and sulfates. The implemented experiment demonstrated a high migration capacity of some phosphogypsum components in a water solution. The article also gives the data on water sampled at the mouth of the Verkhovskoi stream, which show that, despite a substantial weakening, under certain hydrological conditions, the production waste storage facilities can be hazardous for the hydro-ecosystem of the Luga River, and can promote eutrophication of the Gulf of Finland.

The study was carried out under the state contract with the Saint-Petersburg Mining University, Contract No. FSRRW-2023-0002.

Keywords: eutrophication, induced impact, watered open pit mines, induced succession, phosphogypsum dumps.

References

- Carstensen J., Andersen J. H., Gustafsson B. G., Conley D. J. Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 2014. Vol. 111, No. 15. pp. 5628–5633.
- Elmgren R., Blenckner T., Andersson A. Baltic Sea management: Successes and failures. *Ambio: A Journal of the Human Environment*. 2015. Vol. 44, Special Iss. 3. pp. 335–344.
- Gustafsson B. G., Schenk F., Blenckner T., Eilola K., Meier H. E. M. et al. Reconstructing the development of Baltic Sea eutrophication 1850–2006. *Ambio: A Journal of the Human Environment*. 2012. Vol. 41, Iss. 6. pp. 534–548.
- Kabel K., Moros M., Porsche C., Neumann T., Adolphi F. et al. Impact of climate change on the Baltic Sea ecosystem over the past 1,000 years. *Nature Climate Change*. 2012. Vol. 2. pp. 871–874.
- Bonsdorff E., Rönnerberg C., Aarnio K. Some ecological properties in relation to eutrophication in the Baltic Sea. *Hydrobiologia*. 2002. Vol. 475–476. pp. 371–377.
- Vahtera E., Conley D. J., Gustafsson B. G., Kuosa H., Pitkänen H. et al. Internal ecosystem feedbacks enhance nitrogen-fixing cyanobacteria blooms and complicate management in the Baltic Sea. *Ambio: A Journal of the Human Environment*. 2007. Vol. 36, No. 2–3. pp. 186–194.
- Krapf K., Naumann M., Duthel C., Meier H. E. M. Investigating hypoxic and euxinic area changes based on various datasets from the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*. 2022. Vol. 9. 823476. DOI: 10.3389/fmars.2022.823476
- Meier H. E. M., Eilola K., Almroth-Rosell E., Schimanke S., Kniebusch M. et al. Disentangling the impact of nutrient load and climate changes on Baltic Sea hypoxia and eutrophication since 1850. *Climate Dynamics*. 2019. Vol. 53, Iss. 1–2. pp. 1145–1166.
- Conley D. J., Björck S., Bonsdorff E., Carstensen J., Destouni G. et al. Hypoxia-related processes in the Baltic Sea. *Environmental Science & Technology*. 2009. Vol. 43, No. 10. pp. 3412–3420.
- Zillén L., Conley D. J., Andrén T., Andrén E., Björck S. Past occurrences of hypoxia in the Baltic Sea and the role of climate variability, environmental change and human impact. *Earth-Science Reviews*. 2008. Vol. 91, No. 1–4. pp. 77–92.
- Kuprijanov I., Väli G., Sharov A., Berezina N., Liblik T. et al. Hazardous substances in the sediments and their pathways from potential sources in the eastern Gulf of Finland. *Marine Pollution Bulletin*. 2021. Vol. 170. 112642. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112642
- Rönnerberg C., Bonsdorff E. Baltic Sea eutrophication: area-specific ecological consequences. *Hydrobiologia*. 2004. Vol. 514, Iss. 1–3. pp. 227–241.
- Murray C. J., Müller-Karulis B., Carstensen J., Conley D. J., Gustafsson B. G. et al. Past, present and future eutrophication status of the Baltic Sea. *Frontiers in Marine Science*. 2019. Vol. 6, No. 2. DOI: 10.3389/fmars.2019.00002
- Petrova T. A., Rudzish E. Types of soil improvers for reclamation of mining-disturbed lands. *GIAB*. 2021. No. 4. pp. 100–112.
- Matveeva V. A., Smirnov Yu. D., Suchkov D. V. Industrial processing of phosphogypsum into organomineral fertilizer. *Environmental Geochemistry and Health*. 2022. Vol. 44, Iss. 5. pp. 1605–1618.
- Kachor O. L., Sarapulova G. I., Bogdanov A. V. Investigation of the possibility of immobilization of mobile forms of arsenic in technogenic soils. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 596–602.
- Sarapulova G. I. Geochemical approach in assessing the technogenic impact on soils. *Journal of Mining Institute*. 2020. Vol. 243. pp. 388–392.
- Plokhov A. S., Kharko P. A., Pashkevich M. A. Effect of tailings storage facility on surface water at copper-pyrite deposit. *GIAB*. 2021. No. 4. pp. 57–68.
- Babenko D. A., Pashkevich M. A. Study of the composition and properties of the copper ore processing tailings of PJSC Gaysky Mining and Processing Plant. *Obogashchenie Rud*. 2021. No. 2. pp. 47–52.
- Tayibi H., Choura M., López F. A., Alguacil F. J., López-Delgado A. Environmental impact and management of phosphogypsum. *Journal of Environmental Management*. 2009. Vol. 90, Iss. 8. pp. 2377–2386.
- Nemchinova N. V., Tyutrin A. A., Somov V. V. Determination of optimal fluorine leaching parameters from the coal part of the waste lining of dismantled electrolytic cells for aluminum production. *Journal of Mining Institute*. 2019. Vol. 239. pp. 544–549.
- Litvinova T. E., Oleynik I. L. Dissolution kinetics of rare earth metal phosphates in carbonate solutions of alkali metals. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 251. pp. 712–722.
- Cánovas C. R., Pérez-López R., Macías F., Chapron S., Nieto J. M. et al. Exploration of fertilizer industry wastes as potential source of critical raw materials. *Journal of Cleaner Production*. 2017. Vol. 143. pp. 497–505.
- Ponomareva M. A., Cheremisina O. V., Mashukova Yu. A., Lukyantseva E. S. Increasing the efficiency of rare earth metal recovery from technological solutions during processing of apatite raw materials. *Journal of Mining Institute*. 2021. Vol. 252. pp. 917–926.
- Knuuttila S., Räike A., Ekholm P., Kondratyev S. Nutrient inputs into the Gulf of Finland: Trends and water protection targets. *Journal of Marine Systems*. 2017. Vol. 171. pp. 54–64.
- Building Capacity within Environmental Monitoring to Produce Pollution Load Data from Different Sources for HELCOM Pollution Load Compilations, Balthazar II : The Progress Report on Additional Sampling Within Balthazar Project in the Activity. 2012. Available at: https://portal.helcom.fi/Archive/Shared%20Documents/LAND%2017-2012_4-9%20BALTHAZAR%20prog%20rep_Helcom%20load.pdf (accessed: 08.02.2023).
- Ecological Situation in the Leningrad Region : Information and Analysis Digest. Saint-Petersburg, 2022. 528 p.
- Dmitrakova Ya. A., Abakumov E. V. Restoration of soils and vegetation on reclamation sites of the Kingisepp Phosphorite Field. *Eurasian Soil Science*. 2018. Vol. 51, No. 5. pp. 588–597.
- Vampilova L. B., Sokolova A. A., Brodskaya N. A., Sevastyanov D. V., Trifonov A. N. Problems of geotourism development in the north-western recreational region of Russia. *Proceedings of the 18th International Multidisciplinary Scientific GeoConference*. Albena, 2018. Vol. 18, Iss. 5.2. pp. 731–738.
- Brodskaya N. A., Pavlov A. N. Possibilities of landscape-ecological tourism development on the territories with heightened anthropogenic impact on the environment. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2013. No. 30. pp. 155–172.
- Brodskaya N. A., Myakisheva N. V., Aleksandrova K. V. The estimation of different scale surface and undersurface waters interrelation. *Uchenye zapiski Rossiyskogo gosudarstvennogo gidrometeorologicheskogo universiteta*. 2015. No. 38. pp. 36–50.
- Elsukova E. Yu., Nedbaev I. S., Kuzmina D. S. Monitoring of soil pollution in the area affected by the production of phosphorus fertilizers. *Vestnik Sankt-Peterburgskogo universiteta. Nauki o Zemle*. 2022. Vol. 67, No. 4. pp. 652–674.
- ISO 5667-6:2014. Water quality – Sampling – Part 6: Guidance on Sampling of Rivers and Streams. Geneva, 2014. 26 p.
- Available at: <https://docs.cntd.ru/document/420389120> (accessed: 15.06.2023).