

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

На правах рукописи

**Недбаев Иван Сергеевич**

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКАЯ ОЦЕНКА ВОЗДЕЙСТВИЯ ПРОИЗВОДСТВА  
ФОСФОРНЫХ УДОБРЕНИЙ НА ПОЧВЫ И РАСТИТЕЛЬНОСТЬ**

Научная специальность 1.6.21. Геоэкология

Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук

Научный руководитель:  
кандидат географических наук,  
доцент Е. Ю. Елсукова

Санкт-Петербург  
2023

## Содержание

Введение .....	3
Апробация работы .....	8
Глава 1. Обзор воздействия производств фосфорных удобрений на природную среду .....	11
Выводы к главе 1 .....	19
Глава 2. Материалы и методы .....	21
2.1 Методы полевых исследований .....	21
2.2 Методы лабораторных исследований .....	25
2.3 Методы камеральных работ .....	26
Выводы к главе 2 .....	28
Глава 3. Физико-географическая характеристика территории .....	29
3.1 Геологическое строение и рельеф .....	29
3.2 Климатические условия .....	32
3.3 Природные воды .....	34
3.4 Почвенный покров .....	35
3.5 Растительный покров .....	43
Выводы к главе 3 .....	50
Глава 4. Геоэкологическая оценка воздействия производств фосфорных удобрений на почвы .....	51
4.1 Современное экологическое состояние почвенного покрова Кингисеппского месторождения фосфоритов .....	51
4.2 Индикаторы воздействия производства фосфорных удобрений почвы .....	65
Выводы к главе 4 .....	83
Глава 5. Геоэкологическая оценка воздействия производств фосфорных удобрений на растительность .....	86
5.1 Анализ количественных характеристик геоботанических описаний .....	87
5.2 Оценка трансформации фитоценозов методом корреляционных плеяд .....	94
Выводы к главе 5 .....	103
Заключение .....	106
Благодарности .....	110
Список использованных источников .....	111
Приложение .....	123

## **Введение**

Фосфорные удобрения – это минеральные удобрения: кальциевые и аммониевые соли фосфорной кислоты. Их производят из фосфоритов и апатитов. Применение данных удобрений в сельском хозяйстве стимулирует более быстрое развитие культур. Производство фосфорных удобрений, как и любая другая промышленная антропогенная деятельность, преобразует природные ландшафты на территории самих производств, а также влияет на состояние прилегающих ландшафтов. Основное воздействие на окружающую природную среду, описанное в научной литературе, заключается в повышении содержания в компонентах ландшафтов радионуклидов, фтора, стронция, кадмия, свинца и цинка (Сагет и др., 1990; Rutherford et al., 1994; Andersson et al., 1997; Bolívar et al., 1998; Nielsen et al., 1998; Shirakawa et al., 2002; Dueñas et al., 2007).

В настоящей работе оценивались валовое содержание и подвижные формы тяжелых металлов (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, V, Zn), содержание фтора, фосфора, серы, водорастворимые формы азота, калия, магния, натрия и кальция, потенциальная и актуальная кислотность, содержание гумуса, токсичность методом биотестирования (тест-объект *Daphnia magna* Straus.), удельная активность природных радионуклидов, а также было проведено исследование растительного покрова методом геоботанических описаний. Тяжёлые металлы, в настоящее время, являются одной из самых распространённых групп элементов, требующей повсеместной оценки при контроле состояния окружающей среды, в силу своей токсичности при высоких концентрациях (Nortcliff, 2002; Sousa et al., 2008; Сердюкова, Барабанщиков, 2017). Высокое содержание стронция приводит к замещению стронцием кальция в клетках живых организмов, в результате чего наблюдается стронциевый рахит. Данное заболевание характерно для фауны регионов, где почвы загрязнены стронцием (Беренштейн, 1961; Судья, Ластков, 2013; Дадали и др., 2014). Фториды ингибируют ряд ферментов, необходимых для полноценного существования живых систем (Уразаев и др., 2000). Более того, сохранение почв в естественном состоянии, без значительных антропогенных изменений, является актуальным вопросом современных исследований (Апарин и др., 2007).

Выделение индикаторов изменения природной среды под влиянием хозяйственной деятельности человека и оценка изменений современных ландшафтов являются областями исследования геоэкологии в рамках географических наук (Паспорт научной специальности..., 2022). Настоящая работа направлена на выделение индикаторов изменения природной среды (в качестве объекта исследования выбрана почва как депонирующая среда, являющаяся «зеркалом ландшафта» (Докучаев, 1899), и фитоценоз

как максимально подверженная антропогенным воздействиям часть экосистемы) под влиянием производств фосфорных удобрений. Также исследование направлено на оценку изменения современного ландшафта из-за антропогенного воздействия. В силу указанных причин настоящая диссертация призвана решить геоэкологические задачи.

В качестве объекта исследований были выбраны техногенные (действующие отвалы и хвостохранилища) и посттехногенные (рекультивированные отвалы) объекты Кингисеппского месторождения фосфоритов (Кингисеппский район, Ленинградская область), а также природные и природно-антропогенные комплексы сформировавшиеся на территории месторождения и за его пределами – на территории ландшафта, представленного, в основном, залесёнными или заболоченными участками речной террасы реки Луги. На территории месторождения встречаются следующие типы объектов исследования: отвал фосфогипса, три хвостохранилища и отвалы вскрышной породы, значительная часть которых уже рекультивирована (первые рекультивационные работы были поведены 40 лет назад). К природно-антропогенным комплексам можно отнести рекультивированные отвалы вскрышной породы со сформировавшимся растительным сообществом, включающим древесный ярус, а также сельскохозяйственные угодья. К природным комплексам отнесены лесные и болотные экосистемы, располагающиеся на территории лесного фонда, на различном отдалении от объектов месторождения фосфоритов.

Среди зарубежных авторов проблему загрязнения окружающей среды от производств фосфорных удобрений поднимали в своих работах Saueia C.H.R., Mazzilli B.P. (2006), Betti M., Aldave De Las Heras L., Janssens A., Henrich E., Hunter G., Dutton M., Van Weers A.W., Nielsen S., Simmonds J., Vexon A (2004). Влияние на водные объекты рассматривали Elbaz-Poulichet F., Braungardt C., Achterberg E., Morley N., Cossa D., Beckers J.-M., Nomérange P., Cruzado A., Leblanc M. (2001). О возможных путях сокращения отвалов при производстве фосфорных удобрений говорили Tayibi H., Chouga M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. (2009).

Исследования в СССР отходов производства фосфорных удобрений начались в 50-е гг. XX века в работах Д.Я. Иткиной, М.Г. Пастуховой, С.И. Вольфович, Р.Э. Симановской и В.А. Найдёновой. О воздействии этого производства на почвенный покров заговорили в 80-е гг. Б.С. Ниязбекова, И.М. Мальцева, О.В. Шелепова и К.А. Хуцишвили. В 90-е эту тенденцию продолжили Ю.А. Киперман, В.И. Скоробогатов, Т.А. Антонец, В.Г. Казак и А.И. Ангелов. В начале XXI века наибольшей популярностью по данной тематике пользуются исследования И.С. Белюченко, Е.И. Муравьёва, Ю.Ю. Никифорова, А.В. Литвинович, А.В. Лаврищева, Д.В. Петренко и др.

За последние 20 лет в Российской Федерации было защищено не менее двух десятков кандидатских и докторских диссертаций, посвящённых различным аспектам, связанным с производством фосфорных удобрений. Это воздействие на почвенный покров, на растительность и на ландшафт в целом изучали в своих работах М.А. Каниськин, А.Д. Жукова и Д.В. Петренко. Влияние на природные и подземные воды осветил в своих работах Д.В. Макаров. О возможности применения фосфогипса в качестве удобрения в сельском хозяйстве говорили К.С. Косодуров, М.Ю. Локтионов и А.Н. Лиманский. Применение фосфогипса в других сферах затронули А.В. Поляков, И.Л. Олейник, А.А. Мольков, М.Г. Игленкова и В.А. Решетов.

В работе для планирования месторасположения пробных площадей использовались сравнительно-географические и ландшафтно-геохимические методы. Для заложения пробных точек использовался метод геоэкологического профилирования. После полевого этапа в лаборатории использовались физико-химические методы анализа проб почв. Для анализа полученных материалов использовались методы математической статистики. А для построения картографических материалов и пространственного анализа информации использовался картографический метод исследования. Теоретической базой являлись работы А.Г. Исаченко, М.А. Глазовской, А.И. Перельмана, В.Г. Морачевского, В.В. Дмитриева, А.Ю. Опекунова и М.Г. Опекуновой.

Научные работы по изучению отвалов Кингисеппского месторождения фосфоритов начались с момента проведения первых работ по рекультивации отвалов. В 1986-1992 гг. данным районом и формирующимся почвенно-растительным покровом на отвалах занимались научные сотрудники ЛенНИИЛХ: Ю.Е. Самков, Е.Л. Маслаков, Д.В. Огиевский, В.А. Старостин и М.Ф. Мойка. В настоящее время (2006-2022 гг.) исследования состояния сообществ на отвалах продолжаются. Ими активно занимаются Абакумов Е.В., Дмитракова Я.А., Гагарина Э.И. и Кушнир Е.А.

**Цель работы** заключается в проведении геоэкологической оценки воздействия производства фосфорных удобрений на почвы и растительность.

**В задачи работы** входят:

- изучение особенностей ландшафтно-деструкционного воздействия при производстве фосфорных удобрений;
- определение химических элементов и соединений, составляющих эмиссионное воздействие при производстве фосфорных удобрений;
- описание разнообразия типов почв и техногенных поверхностных образований на Кингисеппском месторождении фосфоритов;

- анализ современного экологического состояния почв Кингисеппского месторождения фосфоритов;
- поиск индикаторов производства фосфорных удобрений на почвы южной тайги в условиях залегания фосфоритов под карбонатными породами;
- выделение стадий зарастания отвалов вскрышных пород Кингисеппского месторождения фосфоритов;
- изучение трансформации структуры южнотаёжных растительных сообществ при воздействии производства фосфорных удобрений.

**Научная новизна.** Получены актуальные данные о современном состоянии экосистем, находящихся под влиянием производства фосфорных удобрений на Кингисеппском месторождении фосфоритов. Впервые проведена геоэкологическая оценка почв и растительности в подзоне южной тайги в условиях интенсивного ландшафтно-деструкционного и эмиссионного антропогенного воздействия производства фосфорных удобрений в условиях выхода на поверхность карбонатных пород. По степени антропогенного воздействия выделено три типа территорий — условно-фоновые (лесные и болотные экосистемы), рекультивированные отвалы вскрышных пород, а также крупные техногенные объекты – отвалы фосфогипса и хвостохранилище. Выделены индикаторы для оценки воздействия на почвы производства фосфорных удобрений в Ленинградской области. Обнаружено превышение валового содержания ряда химических элементов в почвах территории исследования в сравнении с региональными фоновыми и нормативными показателями. Оценены с помощью метода геоботанических описаний стадии зарастания отвалов вскрышных пород, представленных известняками и доломитами, в результате работ по рекультивации елью европейской *Picea abies* (L.) Н.Karst. за временной период около 40 лет. Проведено сравнение видового состава фитоценозов, находящихся на территории месторождения фосфоритов и на условно-фоновой территории.

**Практическая значимость работы.** Приведён перечень химических элементов, содержание которых необходимо учитывать при использовании фосфогипса как основы для рекультиванта или в качестве сельскохозяйственного удобрения: стронций, фтор, сера, фосфор, так как они статистически достоверно накапливаются на территории месторождения, и в высоких концентрациях содержатся в фосфогипсе. Стоит оценивать также содержание подвижных форм меди, марганца, никеля, свинца, хрома и цинка, которые также имеют тенденцию к накоплению в почвах месторождения, превышая ПДК. Обозначена радиологическая безопасность отвала фосфогипса и отсутствие повышения активности природных радионуклидов на территории Кингисеппского месторождения

фосфоритов. Определен набор индикаторов, который может быть рекомендован для включения в систему мониторинга качества почв при оценке воздействия производств фосфорных удобрений: увеличение валового содержания стронция, фтора и фосфора. Обращено внимание на существующие превышения допустимого валового содержания и подвижных форм тяжёлых металлов, валового содержания фтора, серы и фосфора в почвах Кингисеппского месторождения фосфоритов.

Создана и подана на регистрацию база данных, содержащая информацию о результатах лабораторных анализов почвенных проб и характеристики геоботанических описаний пробных площадей, которая может быть использована при последующих исследованиях экологического состояния Кингисеппского месторождения фосфоритов.

Выделены стадии зарастания отвалов карбонатных пород в условиях воздействия производств фосфорных удобрений и сделан прогноз дальнейшего развития растительных сообществ.

Настоящая кандидатская диссертация соответствует приоритетному направлению развития науки, технологий и техник в Российской Федерации – рациональному природопользованию. Выводы диссертации направлены на развитие критических технологий, представленных технологиями мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения (Об утверждении..., 2011). Работа, в целом, соответствует следующему приоритету научно-технологического развития: возможность эффективного ответа российского общества на большие вызовы с учетом взаимодействия человека и природы, человека и технологий, социальных институтов на современном этапе глобального развития, в том числе применяя методы гуманитарных и социальных наук (Стратегия научно-технологического..., 2016).

#### **Защищаемые положения:**

1. Воздействие производства фосфорных удобрений на почвы и растительность выражается в механическом нарушении компонентов природной среды, изменении рельефа, поступлении загрязняющих веществ посредством выбросов в атмосферу и аэрогенного переноса частиц отвала фосфогипса. Индикаторами воздействия являются увеличение валового содержания стронция в 1,5 раза, фтора в 3 раза и фосфора в 4 раза в почвах сравнении с условно-фоновой территорией.

2. Еловые сообщества на отвалах вскрышных пород производства фосфорных удобрений проходят пять стадий формирования. При этом травяно-кустарничковый ярус даже через 40 лет после рекультивации представлен, в основном, рудеральными видами. Наиболее значительно изменяется видовой состав растительности на территории месторождения, прилегающей к хвостохранилищам.

3. Почвы и ТПО Кингисеппского месторождения фосфоритов характеризуются нейтральной реакцией среды, превышением ОДК по сере, зонального фона по фтору и фосфору, регионального фона почв южной тайги Баренцева региона по барии, кобальту, хрому, меди, железу, марганцу, никелю, свинцу, сурьме, стронцию и ванадию. Встречаются превышения ПДК в почве по марганцу, меди, свинцу, никелю, хрому и цинку. Химический состав почв на исследованной территории определяют четыре фактора – породный фактор (44 %), производство фосфорных удобрений (20 %), влияние вскрышных пород (14 %), поступление серы от отвала фосфогипса (7 %).

### **Апробация работы**

По теме диссертации опубликовано 12 работ: из них 3 ВАК, 3 Scopus. Результаты исследования были представлены на 8 конференциях: Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами» (Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 26 октября 2020 года), Всероссийской научной конференции «Экологическая деятельность и экологическое просвещение: региональный аспект» (Санкт-Петербург: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 16 декабря 2020 года), Международном лесном форуме «Лесные экосистемы как глобальный ресурс биосферы: вызовы, угрозы, пути решения. Forestry – 2021» (Воронеж: ВГЛТУ им. Г.Ф. Морозова, 9-10 сентября 2021 года), Международной научной студенческой конференции Лицейские чтения «Шаг в будущее: современное студенчество как творческий, научный и профессиональный потенциал России» (Санкт-Петербург: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 23 декабря 2021 года), I Ежегодной международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные проблемы геологии и геофизики в системе современного естественно-научного знания» (Москва: МГРИ им. С. Орджоникидзе, 10 марта 2022 года), Всероссийской конференции с международным участием «Геохимия окружающей среды» (Москва: Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, 23-26 августа 2022 года), VII Международном симпозиуме «Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах» (Санкт-Петербург: СПбГУ, 26-29 сентября 2022), Международной научно-практической конференции «Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение» (Минск: БГУ, 9-11 ноября 2022 года).

### **Статьи в рецензируемых журналах Web of Science и Scopus:**

1. Nedbaev, I.S. Forest recultivation of overburden dumps of the Kingisepp phosphorite field / I.S. Nedbaev, E.Yu. Elsukova, E.A. Kushnir, E.I. Treschevskaya // IOP



Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2021. – Vol. 875. – №012029. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012029>

2. Елсукова, Е.Ю. Загрязнение почв в зоне воздействия производства фосфорных удобрений / Е.Ю. Елсукова, И.С. Недбаев, Д.С. Кузьмина // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – №4. – С.652-674 – doi: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.406>

3. Nedbaev, I.S. Geoecological assessment of the impact of phosphate fertilizer production on taiga soils / I.S. Nedbaev, E.Yu. Elsukova, E.O. Chunyaeva // IOP Conference Series Earth and Environmental Science, 2023. (принята, но ещё не опубликована)

#### **Статьи в рецензируемых журналах ВАК:**

1. Кушнир, Е.А. Оценка состояния лесных насаждений и почвенного покрова на участках рекультивации Кингисеппского месторождения фосфоритов / Е.А. Кушнир, И.С. Недбаев, Э.И. Трещевская // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – СПб: СПбНИИЛХ, 2021. – №1. – С.68-80. – doi: [10.21178/2079-6080.2021.1.68](https://doi.org/10.21178/2079-6080.2021.1.68)

2. Недбаев, И.С. Изучение мирового и российского опыта по разработке оптимальных путей рекультивации нарушенных земель / И. С. Недбаев, Е. Ю. Елсукова // Вестник евразийской науки. – 2021. – Т. 13. – № 6. – EDN АПСР.

3. Недбаев, И.С. Обзор российского и мирового опыта решения экологических проблем производства, хранения, переработки и использования фосфогипса / И.С. Недбаев, Н.В. Цывкунова, Е.Ю. Елсукова // Вестник евразийской науки. – 2022. – Т. 14. – № 4. – С.10.

#### **Публикации в изданиях РИНЦ, не входящих в ВАК:**

1. Елсукова, Е.Ю. Воздействие добычи фосфоритов на кислотно-основные свойства почв / Е.Ю. Елсукова, И.С. Недбаев, Н.В. Цывкунова // Материалы Всероссийской научной конференции «Экологическая деятельность и экологическое просвещение: региональный аспект». – СПб: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2020. – С. 55-59

2. Недбаев, И.С. Изучение последствий рекультивации: характеристики березовых сообществ на техногенных объектах Кингисеппского месторождения фосфоритов / И.С. Недбаев, Е.А. Кушнир, Е.Ю. Елсукова, Э.И. Трещевская // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами». – М.: ЦЭПЛ РАН, 2020. – С. 205-208.

3. Недбаев, И.С. Геохимические особенности формирования маломощных почв в районе воздействия Кингисеппского месторождения фосфоритов / И.С. Недбаев, Н.В. Цывкунова, Д.С. Кузьмина // Материалы Международной научной конференции

Лицейские чтения «Шаг в будущее: современное студенчество как творческий, научный и профессиональный потенциал России». – СПб: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2022. – С.52-53.

4. Nedbaev, I.S. Geochemical features of the accumulation of phosphorus and fluorine in soils in the zone of influence of the phosphogypsum dump / I.S. Nedbaev, E.Yu. Elsukova // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геохимия окружающей среды». – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н.М. Федоровского, 2022. – С.74.

5. Елсукова, Е.Ю. Загрязнение почв подвижными формами химических элементов в зоне воздействия производства фосфорных удобрений / Е.Ю. Елсукова, И.С. Недбаев, Д.С. Кузьмина, А.С. Выдренкова // Материалы VII Международного симпозиума «Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах». – СПб.: СПбГУ, 2022. – С.38-39.

6. Елсукова, Е. Ю. Комплексная и покомпонентная оценка природной среды, находящейся под воздействием добычи и переработки фосфатов / Е.Ю. Елсукова, И.С. Недбаев // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно-методическое обеспечение и практическое решение : Материалы международной научно-практической конференции, посвященной 60-летию НИЛ экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики БГУ, Минск, 09–11 ноября 2022 года / Редколлегия: Д.С. Воробьев (отв. ред.) [и др.]. – Минск: Белорусский государственный университет, 2022. – С. 80-83.

### **Гранты**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90099 «Геоэкологическая оценка воздействия отвалов фосфогипса на окружающую среду и разработка оптимальных путей их рекультивации».

## **Глава 1. Обзор воздействия производств фосфорных удобрений на природную среду**

### *Основные особенности воздействия производств фосфорных удобрений*

Мировые запасы фосфатов оцениваются около 70 млрд. т. (Георгиевский, Бугина, 2020). В Российской Федерации запасы фосфатов в фосфоритах оцениваются в 217 млн. т и ещё 708 млн. т в апатитах (Государственный доклад..., 2020). В Российской Федерации отвалы фосфогипса расположены в районах фосфоритовых и апатитовых месторождений. Наиболее крупные месторождения располагаются в Хибинской группе месторождений (Мурманская область), также крупные месторождения есть в Кировской области и Республике Саха. Основные заводы по производству фосфорных удобрений расположены в следующих городах: Череповец, Балаково, Великий Новгород, Дорогобуж, Россось, Кингисепп, Белореченск, Кирово-Чепецк, Воскресенск и Мелеуз (Государственный доклад..., 2020).

Производство фосфорных удобрений может оказывать воздействие на природную среду посредством выбросов в атмосферу, сбросов сточных вод, размещением опасных отходов, повышением радиационного фона прилегающих территорий и трансформацией природных ландшафтов. В настоящем исследовании будут суммарно рассмотрены воздействие выбросов в атмосферу непосредственно от производства фосфорных удобрений (технологические выбросы при производстве фосфорной кислоты, фосфорного удобрения суперфосфата и комплексных удобрений) и воздействие аэрогенного переноса загрязняющих веществ с отвала фосфогипса, которые поступают на почвенно-растительный покров прилегающих территорий.

Технологические выбросы при производстве фосфорной кислоты включают фториды (так как фосфоритовые руды содержат 2-4 % фтора), фосфаты, пыль, кадмий, свинец, цинк и радионуклиды (образуются в ходе термического процесса производства). При производстве суперфосфата в атмосферу могут поступать и впоследствии осажаться фториды, хлориды, соединения азота и пыль. При производстве комплексных удобрений в качестве загрязняющих веществ выделяют соединения азота, фториды и хлориды (Руководство по охране..., 2013).

Промышленность по производству удобрений также может быть источником таких загрязняющих веществ, как мышьяк, ртуть и уран, накопление которых отмечено в эстуариях рек, куда поступают стоки с предприятий, производящих продукты на основе фосфатов (Elbaz-Poulichet et al., 2001). При высоком поступлении фосфогипса в водные объекты бактерии могут вегетировать в анаэробных условиях при нулевом показателе растворённого кислорода (Иванова, 2011).

*Воздействие отвалов фосфогипса*

Фосфогипс – это побочный продукт при образовании продуктов, получаемых из фосфоритов и апатитов. Фосфогипс – белое, твердое вещество, состоящее в основном из сульфата кальция, а также рядом примесей, которые зависят от технологии обработки фосфоритного сырья и условий хранения. Для создания отвалов производств фосфорных удобрений приходится постоянно отчуждать большие участки земель (Гарчигина и др., 2011). Фосфогипсовые отвалы располагаются в районе производств фосфорной кислоты, так как именно производство фосфорной кислоты является основным источником образования фосфогипса. Наиболее крупные производства сконцентрированы в Восточной Азии, Африке и Северной Америке (Production of phosphoric..., 2021).

Фосфогипс может влиять на кислотность почв и приводить к загрязнению фтором, тяжёлыми металлами и радионуклидами. Главной опасностью использования материала хранилищ фосфогипса исследователи называют повышенную радиоактивность. Фосфатная порода содержит Са, Р и природные радионуклиды уранового ( $^{238}\text{U}$ ) и ториевого ( $^{232}\text{Th}$ ) рядов (Shirakawa et al., 2002; Яковлев и др., 2013; Коробанова, 2016).

Производство строительных материалов и изделий является одной из перспективных отраслей переработки и утилизации отходов промышленности, в том числе фосфогипса (Яшин, 2013). Также фосфогипс целесообразно использовать при производстве гипсовых вяжущих и изделий на их основе, в цементной промышленности (Касимов и др., 2013). Из фосфогипса можно делать цементные смеси, что предлагают турецкие учёные в связи с высокой стоимостью цемента и наличием неиспользуемых хранилищ фосфогипса (Degirmenci et al., 2007). В Китае из фосфогипса, золы и отходов сталльного производства предлагают делать покрытие для дорог (Shen et al., 2009). Ещё одно исследование (Shen et al., 2007) показывает, что фосфогипс совместно с гашёной известью и золой может быть использован в качестве материала основания дороги. Использование фосфогипса в дорожном строительстве решает проблему утилизации этого отхода, является эффективным и экономически выгодным. Однако, согласно исследованию (Мезева, 2013), токсичные компоненты, которые содержатся в фосфогипсе могут попадать в организм человека через дыхательные пути, глаза и загрязнённые руки и неблагоприятно влиять на его здоровье.

Из фосфогипса можно делать минеральные удобрения. В патенте (Чугунов и др., 2013) представлены несколько способов получения комплексного азотно-фосфорно-сульфатного удобрения из фосфогипса. Для увеличения продуктивности почвы используют фосфогипсование. Причём затраты на фосфогипсование могут окупиться за 3-4 года, так как среднегодовая прибавка к продуктивности составляет от 1,33 до 1,68 т к

ед./га (в зависимости от дозы фосфогипсования – соответственно, 8-32 т. га). При возделывании сельскохозяйственных культур без полива в районах с преобладанием орошаемого земледелия после проведения однократного и повторного фосфогипсования выделяется три зоны солесодержания: опреснения, транзита и аккумуляирования солей (Воропаева и др., 2011). Фосфогипс совместно со сточными водами и опилками может применяться в качестве альтернативного подхода к рациональному влиянию на плодородие почв, так как данные вещества оказывают влияние на физические и химические свойства почв и морфологические особенности развития (Бережная и др., 2012).

Отходы фосфогипса в России содержат в своем составе 1 млн. т редкоземельных элементов (РЗЭ). Редкоземельный концентрат, выделенный из отходов фосфогипса, отличается повышенным содержанием среднетяжелой группы РЗЭ: иттрия, диспрозия, самария, европия, гадолиния, тербия (Абрамов и др., 2013). В скором времени должны получить развитие процессы по извлечению из фосфогипса редкоземельных элементов, так как постепенно стоимость редкоземельных элементов возрастает, а данные элементы могут содержаться в фосфогипсе. Однако извлекать редкоземельные элементы необходимо на этапе производства фосфорной кислоты (Binnemans et al., 2015). Приемы, характерные для переработки апатита, не дают заявленных результатов при извлечении РЗЭ из фосфогипса переработки фосфорита (Найманбаев и др., 2013).

Из фосфогипса можно получить нанокристаллический гидроксипатит и сульфат аммония (Mousa et al., 2015). Нанокристаллический гидроксипатит используется в медицине как наполнитель, замещающий части утерянной кости, как покрытие имплантатов и в некоторых других случаях. Сульфат аммония – азотное-серное минеральное удобрение для почв.

В исследовании (Черныш и др., 2012) рассмотрено использование фосфогипса в качестве минеральной добавки для проведения биосульфидной обработки осадков сточных вод. Фосфогипс является источником сульфатов, необходимых для роста сульфатовосстанавливающих бактерий, и кальция, необходимого для более эффективного извлечения тяжелых металлов. В процессе обработки органические хелатокомплексы с тяжелыми металлами разрушаются.

Нормальному росту и развитию растений на отвалах производства фосфорных удобрений препятствуют высокая кислотность, высокое содержание стронция, отсутствие естественного органического вещества, широкая вариабельность содержания обменного калия, чрезмерное количество подвижного фосфора. Наиболее перспективным из рекультивантов являются гумусовый горизонт почв территории, прилегающей к отвалу, и

шлам из шламонакопителя. Лучшим является гумусовый горизонт почв, поскольку он содержит полезную естественную микрофлору, от симбиотических связей с которой во многом зависит рост, развитие и укоренение растений, формирования дернины как основного защитного поверхностного компонента (Белобров и др., 2015).

*Воздействие производства фосфорных удобрений на содержание отдельных химических элементов в почве и реакцию среды*

Воздействие производства фосфорных удобрений на кислотность почв неоднозначно. В Ленинградской области (Елсукова и др., 2020) фосфогипс приводит к увеличению показателя рН до 7-8 единиц, а в Испании фосфогипс приводит к понижению показателя рН до состояния сильно кислых почв (Dueñas et al., 2007). В исследовании А.Д. Жуковой и др. (Московская область) (Жукова и др., 2016) актуальная кислотность на условно-фоновой территории составляла 6,5 ед. рН, а в районе воздействия производства фосфорных удобрений 6,5-6,6 ед. В том же исследовании в импактной зоне предприятия по производству фосфорных удобрений потенциальная кислотность почв составляла от 5,6 до 7,3 ед. То есть, подкисления почв не происходило. Вероятно, на кислотность почв влияет состав горных пород исследуемой территории.

По известным данным (Саег и др., 1990), в почвах районов, прилегающих к производствам фосфорных удобрений увеличивается содержание натрия. Содержание натрия в фосфогипсе колеблется от 300 мг/кг до 47000 мг/кг (Arocena et al., 1995; Tayibi et al., 2009; Saadaoui et al., 2017).

Превышения фоновых показателей по содержанию тяжёлых металлов может распространяться на территории до 4 км (Жукова и др., 2016). Основной причиной значительного содержания тяжелых металлов в выбросах химических заводов является наличие большого количества примесей многих элементов в фосфорном сырье (титана – свыше 1200 мг/кг, стронция - свыше 2550 мг/кг, свинца – свыше 12 мг/кг и т.д.); чем больше производство продукции, тем больше выбросов, включая и тяжелые металлы. Данные показывают, что на 1 т  $P_2O_5$  в некоторых рудах приходится 40100 кг фтора, 20-40 кг стронция, 20-25 кг оксидов редкоземельных элементов. При переработке природных фосфоритов большая часть соединений фтора и стронция переходит в удобрения (Кизинек и др., 2013). Отвалы фосфогипса обеднены подвижным железом (11 мг/кг) (Carbonell-Barrachina et al., 2002), валовое содержание колеблется в пределах 200-7000 мг/кг (Arocena et al., 1995; Tayibi et al., 2009; Saadaoui et al., 2017). Подвижный стронций накапливается на территориях подверженных воздействию производств фосфорных удобрений, валовое содержание стронция может достигать 6500 мг/кг (Петренко и др., 2012). Исследователи (Tayibi et al., 2009; Aoun et al., 2010; Wang et al., 2019) отмечают, что

содержание марганца в фосфогипсовых отходах варьирует от 15 до 1200 мг/кг. При оценке воздействия фосфогипса на почвы выявляются превышения ОДК по кадмию (до 4 мг/кг) (Мельникова и др., 2016). Отмечались случаи загрязнения территории, прилегающей к производству фосфорных удобрений, свинцом (до 99 мг/кг) (Жукова и др., 2016).

Концентрация водорастворимых форм фтора в прилегающих к производству почвах может достигать 25 мг/кг, при установленных ПДК для почв 2,8 мг/кг (Яковлев и др., 2013). Фосфор содержится в фосфогипсе в количествах: от 200 мг/кг до 35200 мг/кг (Arocena et al., 1995; Tayibi et al., 2009; Шершнёв, 2016; Saadaoui et al., 2017). Сера может накапливаться в почвах при воздействии производства фосфорных удобрений, однако это происходит не всегда: содержание серы на расстоянии до 6 км от производства составляло 40 мг/кг, что значительно меньше содержания серы на расстоянии 5,6 км от производства фосфорных удобрений в Московской области (220-390 мг/кг) (Жукова и др., 2016).

В фосфатных породах из различных регионов мира содержание  $^{238}\text{U}$  и  $^{226}\text{Ra}$  варьирует в широких пределах: от 37 до 4900 Бк/кг для  $^{238}\text{U}$  и от 100 до 10 000 Бк/кг для  $^{226}\text{Ra}$  (Saueia et al., 2006). В Испании (Dueñas et al., 2007) и Турции (Papasliti et al., 2018) именно радиоактивность отвалов выделяют как основную опасность фосфогипса, однако химическое загрязнение выше указанными компонентами тоже наблюдаются (Gezer et al., 2012). В Китае отвалы фосфогипса приводят к увеличению радиоактивности, а также ряда тяжёлых металлов: As, Se и Pb (Dartan et al., 2017). В Марокко – аналогичная ситуация: увеличение радиоактивности (Silva et al., 2022) и содержания тяжёлых металлов (Azouazi et al., 2001).

#### *Обзор воздействия производства фосфорных удобрений в Кингисеппском районе Ленинградской области*

Объектами исследования в геоэкологии являются как источники антропогенного воздействия, так и экосистемы, на которые оказывается воздействие, поэтому в качестве объекта исследований были выбраны производственные территории и объекты, расположенные на Кингисеппском месторождении фосфоритов (Кингисеппский район, Ленинградская область), и природные и природно-антропогенные комплексы сформировавшиеся на территории месторождения и за его пределами – это ландшафты, представленные, в основном, залесёнными или заболоченными участками речной террасы реки Луги (Елсукова, Недбаев, 2022). Кингисеппское месторождение фосфоритов открыли в 1948 году. В 1964 году были закончены все исследовательские работы, и началась эксплуатация месторождения. В 1990-е гг. запасы месторождения истощились, и предприятие стало работать на привозном сырье.

В настоящее время ООО «Промышленная Группа «Фосфорит» (ООО «ПГ «Фосфорит») входит в состав АО «Минерально-химическая компания «ЕвроХим» (АО «МХК «Еврохим») и является одним из ведущих производителей фосфорных удобрений и кормовых фосфатов на Северо-Западе России, а также, серной и фосфорной кислот для нужд собственного производства.

До 2022 года более 90% продукции ООО «ПГ «Фосфорит» направлялось на экспорт в страны Западной Европы, Балтики и Латинской Америки. В России основными потребителями продукции являются другие предприятия АО «МХК «ЕвроХим», сельхозпроизводители и комбикормовые заводы.

Содержание фосфора в руде Кингисеппского месторождения фосфоритов составляло 6-7%. Добыча велась в карьерах открытым способом. По мере выработки очередного карьера, производилась его рекультивация (то есть, шла параллельная рекультивация). Вскрышные горные породы, которые извлекали при разработке нового карьера, складировали в выемку от старого карьера. Отвалы вскрышных пород – это первый тип техногенных объектов в районе месторождения. Второй тип техногенных объектов – это хвостохранилища, куда складировуют особо токсичные для окружающей природной среды отходы, образовавшиеся в процессе обогащения руды. Площадь хвостохранилищ занимает более 400 га. Содержание фосфора в хвостохранилищах составляет около 2%. И третий тип техногенных объектов – это отвал фосфогипса, образовавшийся при складировании отходов в процессе производства фосфорной кислоты. На 1 тонну получаемой фосфорной кислоты, может образовываться до 5-6 тонн фосфогипса.

#### *Ландшафтно-деструкционное воздействие*

Для исследования нарушенных площадей на Кингисеппском месторождении фосфоритов использовались снимки серии спутников LandSAT. Самые ранние снимки исследованной территории, подходящие для анализа, датируются 1975 годом (рисунок 1). Это снимки, сделанные спутником LandSAT 2. На снимке красного спектра белым и светло-серым цветом отображаются антропогенные объекты в силу того, что они отражают электромагнитные волны красного спектра более интенсивно.

На момент активной разработки месторождения (середина 70-х гг.) площадь отвала фосфогипса составляла порядка 0,06 км<sup>2</sup>. Площадь же всех антропогенных объектов на месторождении занимала более 20 км<sup>2</sup>. Северная и восточная границы месторождения совпадают с береговой линией реки Луга. В первые десятилетия освоения месторождения особенно активно разрабатывалась его северная часть (Северный участок). Фронт горных работ продвигался с севера на юг по падению залегания пласта. В настоящее время все



карьеры Северного участка уже рекультивированы, так как его запасы истощились в 1980 году. На отработанных площадях, помимо рекультивации, был возведён комплекс химических цехов со вспомогательными производствами.

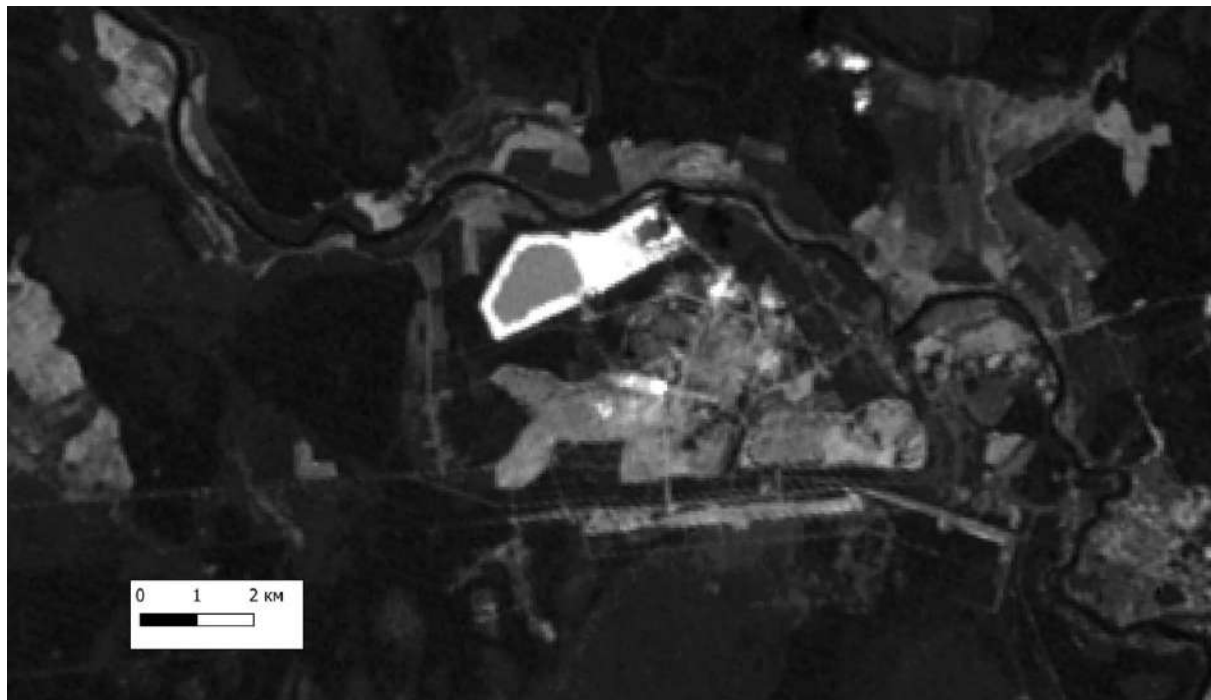


Рисунок 1. Фрагмент космического снимка LandSAT на исследуемую территорию за 1975 год.

Самая нижняя светло-серая полоса на рисунке 1 идентифицирует начало разработки Южного участка. В период 1980-2000 гг. он стал основным, и площадь горных выработок значительно увеличилась в южном направлении (рисунок 2). По мере продвижения фронта горных работ к югу (к болоту Пятницкий мох) резко возрос приток воды в карьеры.

По спутниковым снимкам можно наблюдать увеличение растительного покрова на территории исследования. Значительная часть Северного участка и практически весь Южный участок подверглись рекультивации с отсыпкой почвенного слоя, засевом многолетних трав и последующей посадкой древесных пород. Предпочтение отдавалось ели *Picea abies*.

В работе использовались снимки LandSAT 2, 3, 5, 7 и 8. Снимки показывают, что некоторым экосистемам, созданным на месте бывших отвалов, уже несколько десятилетий. Пик нарушенных земель приходился на 80-е гг. XX века. К 2020 году нерекультивированных отвалов вскрышных пород практически не осталось. Однако площадь отвала фосфогипса (и его высота, и как следствие – объём отхода) непрерывно увеличивается в связи с продолжающимся производством. До 1985 года существовал отвал 1-ой очереди, который на данный момент полностью отработан – складирование

фосфогипса на него было прекращено. Отвал 2-й очереди находится в эксплуатации с 1985 года по настоящее время. Объем уложенного фосфогипса составляет на 01.01.2019 – 77 млн. тонн. В настоящее время площадь, занимаемая фосфогипсом, – около 1 км<sup>2</sup>.

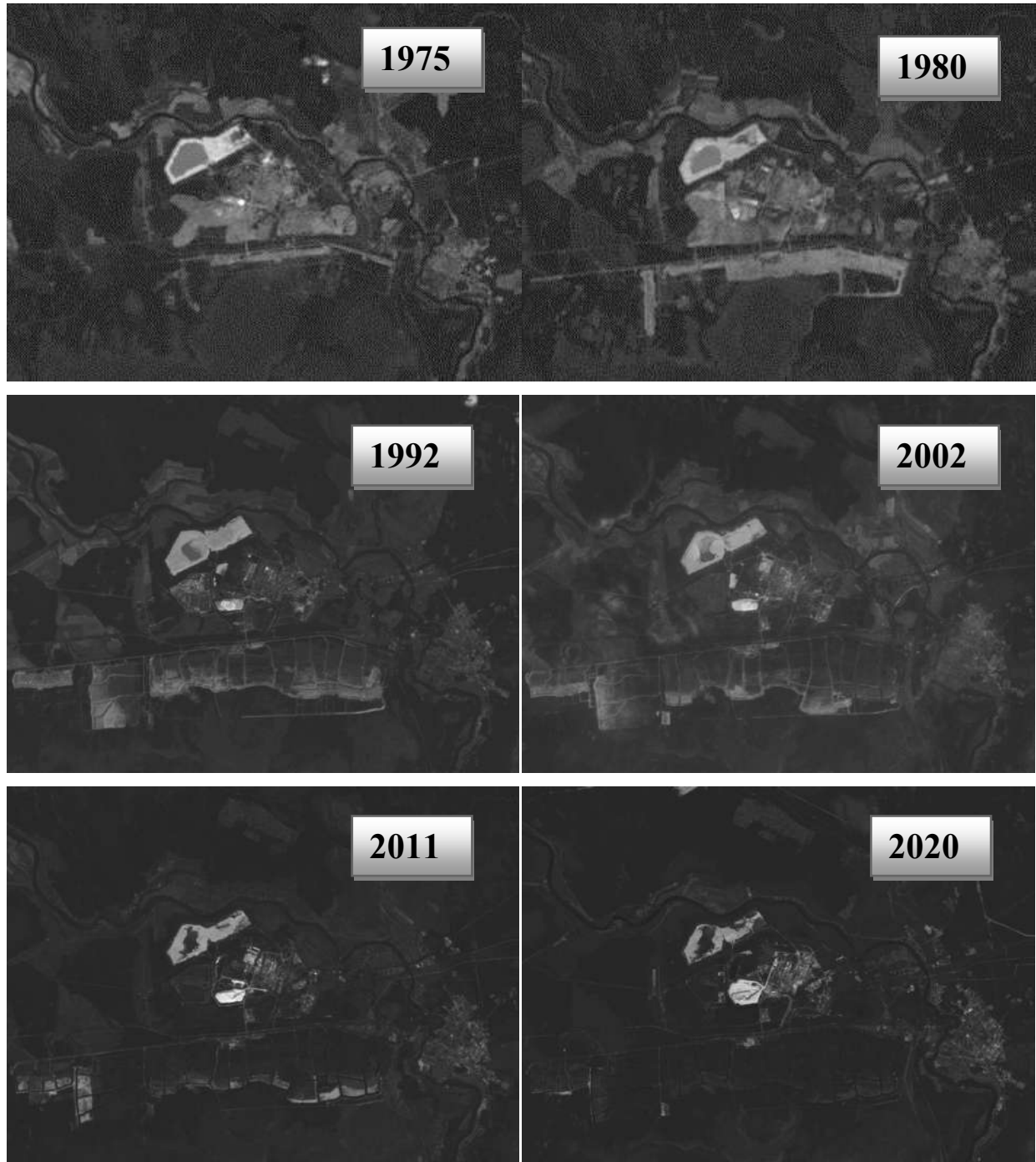


Рисунок 2. Спутниковые изображения территории исследования по годам.

Ландшафтно-деструкционное воздействие на исследованной территории за последние два десятилетия значительно сократилось. Более того, ООО «ЛГ «Фосфорит» разрабатываются новые технологии по применению материала отвала фосфогипса. Если технологии будут внедрены и будут эффективно использоваться, то в скором времени нас

может ожидать снижение и химического воздействия на прилегающие территории. Что подтверждает актуальность проведения сейчас геоэкологической оценки.

Фосфогипс производится в соответствии с ТУ 2182-015-56937109-2010, согласно которым, данный продукт успешно использовался на предприятии в качестве сырья для производства термосульфата кальция – белого наполнителя для лакокрасочных материалов, пластических масс, резинотехнических изделий, вододисперсионных красок, линолеума. Термосульфат кальция применяется в цементной промышленности, в производстве гипсовых вяжущих, строительных материалов, используется для строительных работ. Однако в 2012 году завод перестал выпускать термосульфат кальция по причине крайне малого количества покупателей. Так как производство было дорогим, а спрос на продукции низким, выпускать термосульфат кальция оказалось нерентабельно и в 2019 году цех был ликвидирован (Векшин, 2019). Однако, в 2019 году ООО «ПГ «Фосфорит» заказал ООО «Центр экопестицидных исследований «ЭПИцентр»» (г. Москва) провести разработку новой технологии применения материала отвала фосфогипса для производства рекультиванта для нарушенных земель Ленинградской области (Материалы по оценке..., 2021). В марте 2021 года разработка была завершена. Поэтому в скором времени ожидается новое использование имеющегося материала отвала.

Первая рекультивация техногенных объектов Кингисеппского месторождения фосфоритов происходила в 1981-1987 гг., то есть, растительным сообществам, посаженным в тот период, уже 35-41 лет, что является возрастом сформировавшейся пострекультивационной экосистемы. Стадии рекультивации в районе исследования выглядят следующим образом:

- 0 – 5 лет – островки растительности, пионерные группировки (вейник, луговик, хвощ)
- 5 – 20 лет – средняя сомкнутость, злаки, разнотравье, полынь
- более 20 лет – полная сомкнутость, образование лесного сообщества.

В 2009-2010 годах выполнена часть проектных решений по охране окружающей среды.

### **Выводы к главе 1**

На основе проведённого обзора имеющихся материалов можно сделать вывод о том, что основными загрязняющими веществами при воздействии производств фосфорных удобрений выступают стронций, фтор и фосфор, а также природные радионуклиды, поскольку они обусловлены химическим составом фосфогипса (Недбаев,

Цыркунова, Елсукова, 2022) и выбросами производств фосфорной промышленности. Единственное региональное различие заключается в изменении кислотности компонентов прилегающих к производствам ландшафтов. Также имеются небольшие региональные различия в содержании тяжёлых металлов в зоне воздействия, однако это не представляет собой ярко выраженную тенденцию. Скорее всего, химический состав горных пород каждой местности определяет разницу в содержании тяжёлых металлов.

## Глава 2. Материалы и методы

Геоэкологическая оценка – это параметрическое определение состояния антропогенно-трансформированных геосистем, обеспечивающего существование конкретных сообществ живых организмов и человека (общества), с целью выделения антропогенной составляющей и последствий этих изменений на фоне природных процессов (Дмитриев, и др., 2016). В качестве параметров состояния антропогенно-трансформированных геосистем в настоящем исследовании были взяты химический состав почвы и видовой состав фитоценозов.

### 2.1 Методы полевых исследований

В основу работы положены материалы, собранные лично автором и полевой группой СПбГУ под руководством автора в полевые сезоны 2019-2022 гг.

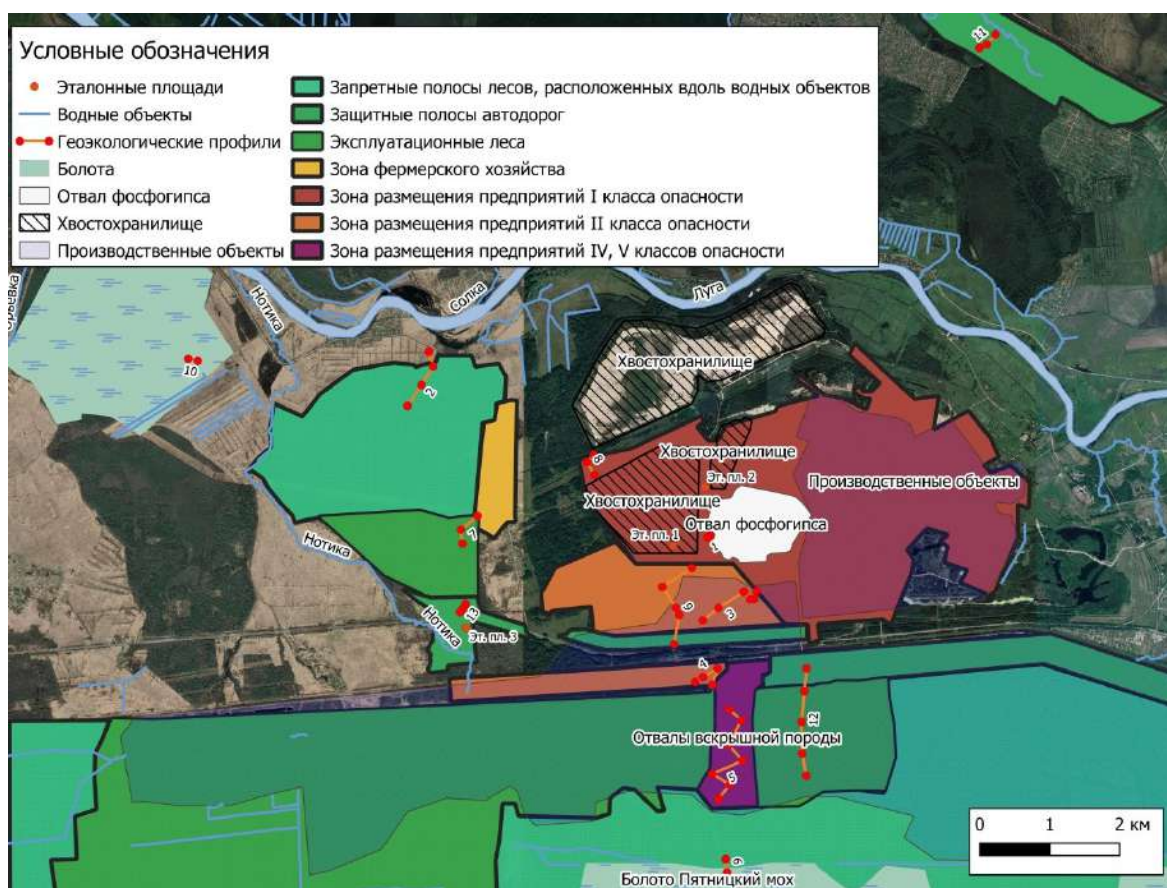


Рисунок 3. Схема расположения пробных площадей относительно техногенных объектов на исследуемой территории.

В качестве объектов исследований были выбраны предприятие ООО «ПГ «Фосфорит» по производству фосфорных удобрений, расположенное недалеко от г. Кингисепп (Ленинградская область), и ряд природно-территориальных комплексов (ПТК), расположенных на расстоянии 0-9 км от предприятия. На рисунке 3 приведена схема расположения пробных площадей относительно техногенных объектов на исследуемой

территории. Крупные техногенные объекты на исследованной территории представлены отвалом фосфогипса, тремя хвостохранилищами и рядом рекультивированных отвалов вскрышной породы.

Геоэкологические профили и эталонные площади были заложены на разном удалении от отвала фосфогипса. При планировании местоположения пробных площадей учитывались следующие особенности:

- геологическое строение территории;
- почвообразующие породы;
- тип ландшафта;
- целевое использование земли;
- расстояние до производства;
- роза ветров.

На заложенных пробных площадях сделаны описания природно-территориальных комплексов, которые включали положение в мезорельефе, микрорельеф, тип миграционных потоков, геоботанические описания по стандартным методикам, характеристики древостоя, биоиндикационные характеристики. Геоботанические описания производились по бланкам, разработанным кафедрой геоэкологии и природопользования ИНОЗ СПбГУ для целей геоэкологического мониторинга (Сенькин, Опекунова, Щербаков, 2000). Заложена 51 пробная площадь. Из-за антропогенного воздействия большинство почв являются реплантозёмами. В полевых условиях производилось определение типа почвы, в камерных условиях впоследствии тип уточнялся, и происходило определение до более малых иерархических уровней на основе сделанных описаний. Отбор 82 проб почв (из каждого горизонта) был осуществлен в соответствии с ГОСТ 17.4.3.01-2017, что способствовало обеспечению достоверных результатов анализа, на основе которых сделаны выводы в настоящей работе и разработаны защищаемые положения.

Для изучения воздействия на почвенно-растительный покров было заложено 13 геоэкологических профилей и 3 отдельные эталонные площади. Первая эталонная площадь находится в понижении между хвостохранилищем и другими техногенными объектами месторождения. Там произрастает ивовое сообщество. Вторая эталонная площадь находится на самом хвостохранилище и представлена березовым кипрейно-вейниковым сообществом на реплантозёмах. Третья эталонная площадь является самой удалённой условно-фоновой площадью в западном направлении (4 км от предприятия), изучение которого ограничивается близостью государственной границы Российской



Федерации. На этой эталонной площади произрастает еловое чернично-кисличное зеленомошное сообщество.

Профиль 1 заложен на склоне отвала фосфогипса и включает в себя 3 пробные площади, которые отображают геохимическую катену – вершина, средняя часть склона и подножие отвала фосфогипса (рисунок 4). В верхней части склона растительный покров отсутствует, в средней части склона сформировалось осиновое щучковое сообщество, у подножия отвала – кипрейно-тростниковое сообщество на реплантозёмах. Осины в средней части склона – результат рекультивации.



Рисунок 4. Отвал фосфогипса возле города Кингисепп (фото автора).

Рисунок 5. Рекультивированные отвалы вскрышной породы (фото автора).

Профиль 2 является условно-фоновым. Он заложен в 4-5 км к северо-западу от отвала фосфогипса. Он состоит из четырех пробных площадей: первая пробная площадь – на пастбище, три других – в лесных экосистемах на террасе реки Луга. Под всеми пробными площадями на этом профиле залегают сиверские отложения. Пастбище представлено снытево-боро-ежовым сообществом на дерново-подзолистых почвах. Лесные экосистемы – это березовые леса на оглеенных почвах с вейником *Calamagrostis sp.*, таволгой *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., купырем *Anthriscus sylvestris* (L.) и хвощем лесным (*Equisetum sylvaticum* L.) в травяно-кустарничковом ярусе.

Профили 3-5 закладывались на рекультивированных отвалах вскрышной породы (рисунок 5). Профиль 3 заложен на отвале вскрышной породы в непосредственной близости от отвала фосфогипса, а профили 4-5 – на расстоянии более 1,5 км. Суммарно на этих трех профилях – 12 пробных площадей. Они заложены на разных элементах рельефа (в основном, вершины отвалов и склоновые фации) и в разных растительных сообществах (территории, рекультивированные елью, березой; участки самозарастания; смешанные леса и луговые сообщества).

Профили 6 и 7 являются условно-фоновыми. Профиль 6 заложен на болоте «Пятницкий мох». Он включает две пробные площади в понижении с сосновым ерниково-

тростниковым сфагновым сообществом на торфяных олиготрофных почвах. Профиль 7 расположен на расстоянии 3-4 км к западу от отвала фосфогипса. Состоит из трех пробных площадей. Первая – вейниковый луг; вторая пробная площадь – ольшаник; третья – еловое кислично-зеленомошное сообщество.

Профиль 8 был заложен для изучения лесных экосистем в непосредственной близости от хвостохранилища. Он включает три пробных площади, заложенных на отложениях сиверской свиты. Первая пробная площадь – кипрейно-таволговый луг; вторая – ольховое снытевое сообщество, третья – ольхово-ивовое снытевое сообщество.

Профиль 9 расположен в непосредственной близости от отвала фосфогипса и представляет собой рекультивированные отвалы вскрышной породы. Профиль включает пять пробных площадей, различающихся по доминантным видам в растительном покрове: ивовое кипрейно-вейниковое сообщество (пробная площадь 1), осинное пырейно-вейниковое (2), сосново-еловое щитовниково-вейниковое сфагновое (3), еловое снытевое зеленомошное (4) и еловое снытево-вейниковое зеленомошное (5). Последние три пробные площади являются результатов рекультивации. Для профиля характерно распространение маломощных реплантозёмов.

Профиль 10 – это две болотные фации, расположенные в 8 км к северо-западу от отвала фосфогипса. Данный профиль является условно-фоновым и самым отдалённым от источника воздействия. Это болото является переходным типом от низинного к верховому, поэтому там может встретиться как обилие злаков, так и олиготрофные виды. Почвы торфяные.

Профиль 11 – это условно-фоновые лесные экосистемы, расположенные в 7 км от отвала фосфогипса. Профиль включает три пробных площади. Первая – заболоченная экосистема с ивовым вейниковым сфагновым сообществом на торфяных почвах. Вторая – ольховосерое паслёно-вейниковое зеленомошное сообщество на перегнойно-глеевых почвах. Третья – ольховосерое вейниково-таволговое зеленомошное сообщество на дерново-подбурях.

Профиль 12 представляет собой пять пробных площадей, расположенных от вершины до подножия отвала вскрышной породы. Почвенный покров составляют только маломощные реплантозёмы. Растительный покров пробных площадей: 1 – сосновое снытевое зеленомошное сообщество, 2 – еловое печёночное зеленомошное, 3 – сосново-еловое вейниково-грушанковое зеленомошное, 4 – ивово-берёзово-еловое мать-и-мачехово-грушанковое зеленомошное, 5 – ивово-берёзово-осиновое землянично-вейниковое зеленомошное.



Профиль 13 – это условно-фоновый профиль, расположенный рядом с эталонной площадью 3. Этот профиль находится на расстоянии 4 км к западу от отвала. Представляет собой типичные естественные экосистемы изучаемой территории: осиново-берёзово-еловое кислично-таволговое зеленомошное, еловое кисличное зеленомошное и еловое вейниковое зеленомошное сообщества на дерново-подбурах (типичных и иллювиально-железистых) и глеезёмах.

## 2.2 Методы лабораторных исследований

В почвах определено валовое содержание и подвижные формы тяжелых металлов (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, V), а также ряд других показателей, характеризующих состояние почвенного покрова в районе воздействия отвалов фосфогипса, а именно концентрация фтора, фосфора, серы, азота, калия, магния, натрия, кальция, потенциальная и актуальная кислотность, содержание гумуса, токсичность методом биотестирования (тест-объект *Daphnia magna* Straus.), удельная активность природных радионуклидов.

Исследование концентрации подвижных форм тяжелых металлов (79 проб) проведено в Ресурсном центре «Методы анализа состава вещества» Научного парка СПбГУ с помощью метода атомно-эмиссионной спектроскопии. Исследования проводились по методике «М-МВИ-80-2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно-эмиссионной и атомно-абсорбционной спектроскопии» с помощью оптического эмиссионного спектрометра ICPE-9000.

Валовое содержание тяжелых металлов (53 пробы) определяли в химико-аналитической лаборатории ВСЕГЕИ по методике МП ВСЕГЕИ N 10/2010 «Определение макро и микроэлементов (в том числе редкоземельных) методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой в горных породах, почвах и рыхлых отложениях».

Определение серы, фосфора и фтора в почвах (45 проб) проведено в химико-аналитической лаборатории ВСЕГЕИ методом инфракрасной спектроскопии и ионометрическим методом.

Актуальная и потенциальная кислотность (82 пробы) была определена в «Учебной лаборатории физико-химических методов анализа управления технического обеспечения образовательных программ по направлениям география, геология, геоэкология и почвоведение» СПбГУ. Там же определялось органическое вещество по методу И.В. Тюрина (28 проб) (Опекунова, и др., 2014), подвижный фосфор (9 проб) по ГОСТ Р 54650-2011.

Определение кальция, магния (9 проб), калия, натрия, хлора, аммонийных и нитратных форм азота (43 пробы) в водной вытяжке проведено в «Учебной лаборатории физико-химических методов анализа управления технического обеспечения образовательных программ по направлениям география, геология, геоэкология и почвоведение» СПбГУ по методикам, изложенным в методическом пособии, выпущенном СПбГУ для химического анализа почв (Растворова и др., 1995).

Определение токсичности почвенных проб (60 проб) проведено в «Учебной лаборатории физико-химических методов анализа управления технического обеспечения образовательных программ по направлениям география, геология, геоэкология и почвоведение» СПбГУ по ФР.1.39.2007.03222.

Определение активности природных радионуклидов (3 объединённые пробы) проведено в лаборатории радиационного контроля ООО «Научно-технический центр «ЭкологиксЛаб» по ФР.1.38.2011.10712.

### **2.3 Методы камеральных работ**

База данных по результатам лабораторных исследований составлялась в ПО Microsoft Excel 2007. Там же проводился расчёт мер центральной тенденции (медианы и среднего арифметического значения), расчёт коэффициентов корреляции (с помощью дополнительного пакета «Анализ данных») и расчёт коэффициентов сопряжённости Бравэ при построении корреляционных плеяд. Расчёт меры изменчивости (стандартного отклонения), анализ выборок на соответствие нормальному распределению и поиск различий между выборками проводились в статистическом ПО SPSS Statistics.

Для поиска индикаторов воздействия производств фосфорных удобрений на ландшафты использовались критерии различия выборок. В большинстве случаев приходилось работать с выборками, которые не подчинялись нормальному закону распределения, поэтому для расчётов мер различий использовался U-критерий Манна-Уитни, а не критерий Стьюдента или Фишера.

При оценке показателей почвы заложенные пробные площади группировались по трём основным критериям:

- по отделу почвенной классификации;
- по расстоянию до производства;
- по характеру и степени антропогенных нарушений.

Изменение рН почвы выявлялось как разностью кислотности на прилегающих к отвалу территориях и на условно-фоновых пробных площадях, так и статистически достоверными различиями выборок. Для сравнения почв по кислотности применялись

непараметрические критерии (U-критерий Манна-Уитни), так как распределение кислотности почв не соответствовало нормальному распределению.

Соответствие нормальному распределению проверялось по одновыборочному критерию Колмогорова-Смирнова в ПО SPSS Statistics. Если двухсторонняя асимптотическая значимость равнялась значению большему, чем 0,05, то распределение принималось как соответствующее нормальному закону. Если асимптотическая значимость была менее 0,05, то распределение считалось не подчиняющимся нормальному закону распределения, и для такой выборки применялись непараметрические критерии, и, соответственно, описание мер тенденции было взято в виде медианы, а не среднего значения (Наследов, 2007).

Для изучения взаимосвязи между распределением различных проанализированных показателей был использован корреляционный анализ. Были использованы только показатели, представленные в числовой количественной шкале. Сила взаимосвязи определялась по превышению модулем коэффициента корреляции критического значения, определяемого по литературным данным (Наследов, 2007).

Для оценки существующей в настоящее время структуры связей между видами растений в исследованных ПТК был использован метод корреляционных плеяд (Терентьев, 1959; Нешатаев, 1987; Опекунова и др., 2005). Корреляционные отношения определены с помощью коэффициентов взаимной сопряженности Бравэ  $K_B$  (при уровне значимости в 0,05) (Нешатаев, 1968; Нешатаев, 1976). Коэффициент взаимной сопряженности Бравэ – это один из вариантов использования коэффициента корреляции при оценке качественных признаков. Виды объединены в плеяды по методу линейной корреляции или методу максимального пути, предложенному Л.К. Выханду (Выханду, 1964).

Для создания и визуального оформления графиков использовалось ПО Microsoft Excel 2007. Для создания картографического материала и картографического метода исследования использовались программы Quantum GIS 3.14 и IDRISI 17.0 Selva. Quantum GIS 3.14 является свободно распространяемым бесплатным приложением, доступным на официальном сайте QGIS (Проект QGIS, 2021). IDRISI 17.0 Selva использовался на базе программного обеспечения Института наук о Земле СПбГУ.

Quantum GIS использовался для следующих целей: вставка данных из Microsoft Excel и нанесение месторасположения пробных площадей на картографическое изображение на основе координат, зафиксированных при полевых исследованиях; анализ специфики территории (функциональные зоны, геологическое строение, рельеф, тип ландшафта, доступность для посещения, расположение техногенных объектов и т.д.) и

определение мест заложения геоэкологических профилей и пробных площадей; создание картографических изображений для настоящей работы на основе векторных слоёв, созданных автором, и растровых слоёв, находящихся в открытых источниках.

IDRISI использовался для анализа космических снимков исследуемой территории, сделанных в разных диапазонах электромагнитного спектра; для выявления видимых антропогенных нарушений почвенного и растительного покрова; для сравнения антропогенных нарушений исследованной территории на снимках разных лет.

### **Выводы к главе 2**

В основе исследования лежит проведение геоэкологической оценки воздействия производства фосфорных удобрений на почвы и растительность. Материалы для написания диссертации были собраны автором в 2019-2022 гг. в районе воздействия Кингисеппского месторождения фосфоритов. В пробах почвы определялись кислотность среды, содержание тяжёлых металлов (валовое и подвижные формы), макроэлементы, токсичность методом биотестирования и удельная активность природных радионуклидов, а растительность была изучена методом геоботанических описаний. Определение содержания химических элементов в почве производилось в химико-аналитической лаборатории ВСЕГЕИ и в Ресурсных центрах Научного парка СПбГУ. Полученные результаты проанализированы методами математической статистики, включая критерии сравнения выборок, корреляционный и факторный анализы.

### Глава 3. Физико-географическая характеристика территории

#### 3.1 Геологическое строение и рельеф

Район исследований относится к северу Восточно-Европейской (Русской) платформы. На всей рассматриваемой территории под четвертичными отложениями залегают породы кембрийского и ордовикского периода (рисунок 6) (Государственная геологическая...). Именно к этим породам приурочены месторождения фосфоритов и сланцев в Ленинградской области. Среди четвертичных пород преобладают флювиогляциальные отложения (гравий, галечники и разнозернистые пески), болотные отложения (торф) и озёрные отложения (пески, илы, глины и торф) (Государственная геологическая...).

Территория расположена на стыке залегания ордовикских и кембрийских горных пород. Накопление сохранившихся осадочных горных пород начало происходить около 500 млн. лет назад при наступлении моря. Ордовикский период представлен медниковской, волховской, обуховской, леэтсетской и тосненской свитами. Тосненская свита – пески кварцевые с переменным количеством раковин оболид (до 25–30 % объема породы). Именно в породах тосненской свиты располагаются фосфоросодержащие раковины морских организмов, добыча которых обусловила расположение в данном районе предприятия по производству фосфорных удобрений. Леэтсетская свита – доломиты песчанистыми глауконитовыми и мергелями с прослойками глин известковых глауконитовых. Волховская свита – доломиты и известняки. Отвалы вскрышной породы сложены именно породами волховской свиты. Обуховская свита – известняки, сильно глинистые, и мергели тонкослоистые, переполненные включениями чечевицеобразных железисто-фосфатных оолитов. Медниковская свита – известняки, обычно сильно доломитизированные, и доломиты.

Кембрийский период представлен отложениями саблинской, люкатиской, тискреской и сиверской свитами. Сиверская свита – однородная толща глин голубовато-зеленовато-серой окраски. Средние содержания химических элементов близки их средним содержаниям в осадочных породах. Люкатиская свита – глины, переслаивающиеся с песчаниками и алевролитами. Тискреская свита – алевролиты желто-серого цвета и пески. Породы слаборадиоактивны. Саблинская свита – пески и песчаники желтой и красновато-желтой окраски. Основные минералы – кварц и полевои шпат.

На территории исследования находится Кингисеппско-Волховская минерагеническая зона. Частью её является Кингисеппское месторождение фосфоритов (междуречье Луги и Нарвы).

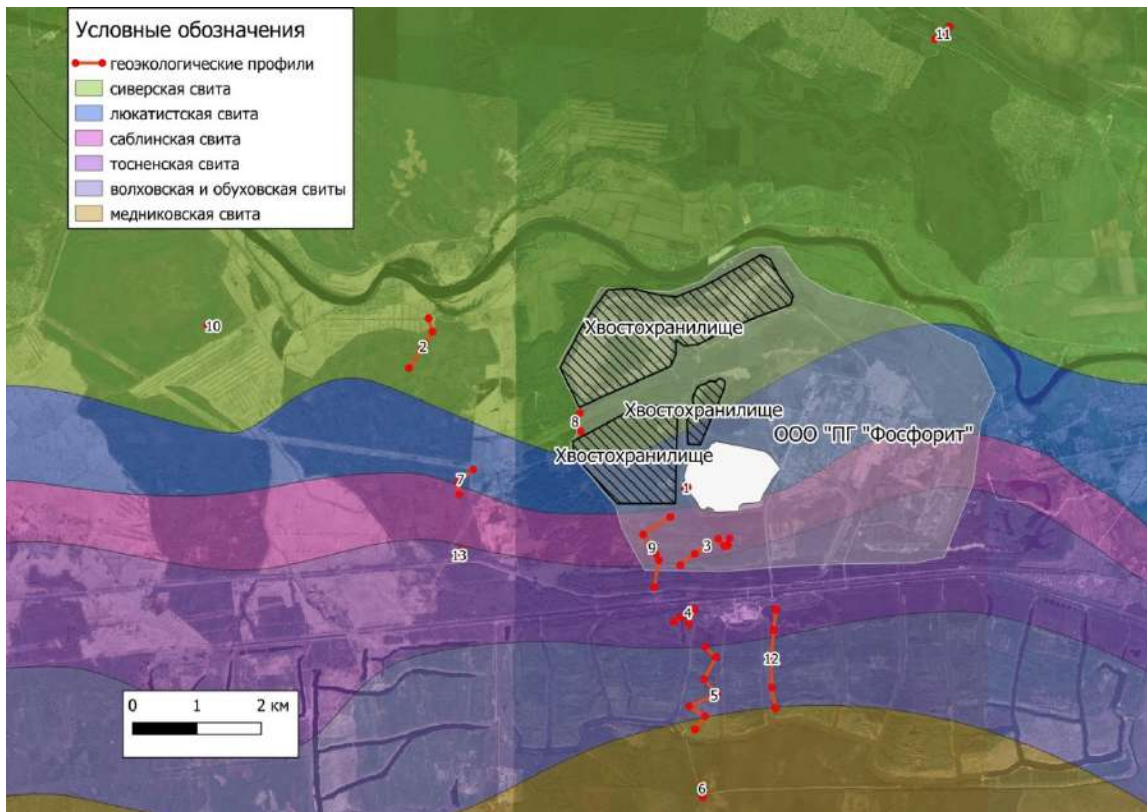


Рисунок 6. Геологическое строение исследованной территории (составил И.С. Недбаев на основе открытых материалов ВСЕГЕИ).

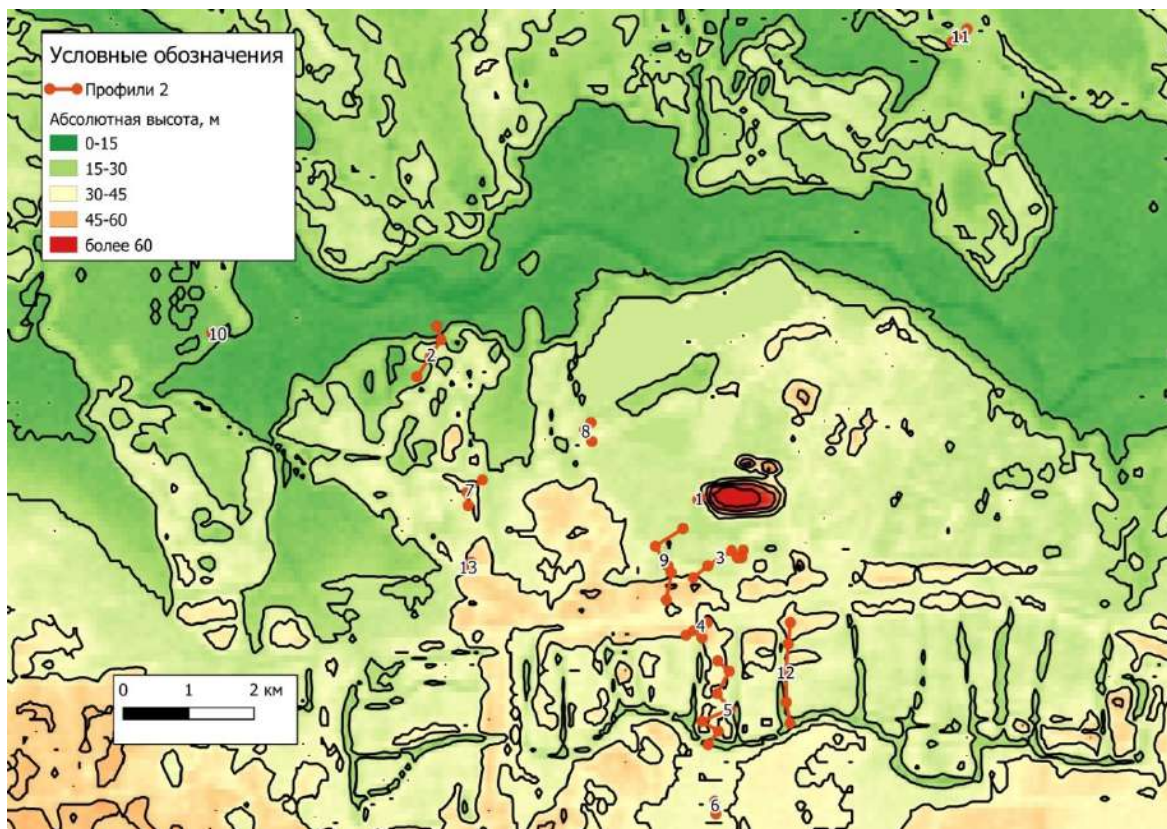


Рисунок 7. Схема высот исследованной территории (составил И.С. Недбаев на основе цифровой модели рельефа SRTM).

Согласно данным Геологической карты РФ, в районе наблюдается геохимическая аномалия тяжелых металлов (Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cd, Fe, Mn, Ag). Это, возможно, связано преимущественно с выносом элементов в процессе эрозии оруденелых пород, развитых на Ижорской возвышенности. Имеются локальные превышения местного фона урана.

Особенности геоморфологии района определяются рельефом поверхности дочетвертичных пород и его расположением в зоне оледенений и Балтийского моря на северо-западе Восточно-Европейской равнины. К особенностям геоморфологии относится то, что основные черты дочетвертичного рельефа были выработаны в период от среднего девона до неоплейстоцена. В неоплейстоцене он был частично изменен под влиянием ледниковой и морской деятельности и неотектонических движений, а в голоцене – морской аккумуляции и абразии, эрозии современных рек, торфообразования и новейших движений.

К числу главных морфологических элементов рассматриваемой поверхности относятся Венд-Кембрийская низина, Ордовикские глинт и плато, расчлененные древними долинами. Венд-Кембрийская низина представляет собой равнину, полого погружающуюся на север. Абсолютные отметки ее поверхности колеблются от 5 до 10 м. Ордовикское плато, занимающее восточную и южную части территории, является наиболее возвышенным участком с абсолютными высотами от 20 до 50 м. В современном рельефе – это северная часть Лужской низменности. Ордовикский уступ является переходной зоной между Венд-Кембрийской низиной и Ордовикским плато. Уступ протяжён в широтном направлении. Древние долины врезаются своими истоками в склоны Ордовикского плато.

Современный рельеф сформирован под воздействием ледниковой экзарации (выпахивания) и аккумуляции, морских трансгрессий и регрессий, неотектонических движений. Важную роль играли также торфообразование и образование современной эрозионной сети. Главные морфологические элементы современного рельефа – Лужская низменность, Ижорская возвышенность и Балтийско-Ладожский уступ. Преобладают структурно-денудационный и различные виды аккумулятивного рельефа, менее распространены эрозионно-аккумулятивный и абразионный типы.

К техногенному рельефу на территории исследования относятся отвалы фосфогипса и вскрышных пород, а также хвостохранилища. Отвал фосфогипса в высоту достигает 65 м, отвалы вскрышных пород вытянуты в меридиональном направлении, в высоту достигают 30 м (рисунок 7). В настоящее время отвал фосфогипса продолжает увеличиваться из-за внесения новых порций отхода. Отвалы вскрышных пород практически все подвергнуты рекультивации.



### 3.2 Климатические условия

Климат исследуемого района относится к Атлантико-континентальной Европейской (лесной) области (Национальный атлас..., 2004). Климат определяется влиянием атлантического воздуха и последующей трансформацией его в континентальный. В холодное время года преобладающее направление ветра – южное и юго-западное, что обуславливает большую повторяемость теплых и влажных атлантических масс. Летом преобладают западные и северо-западные ветры, с которыми распространяется относительно холодный и влажный атлантический воздух. В результате адвекции холодного воздуха даже в июне возможны заморозки на всей территории. Июль и август практически свободны от заморозков. В общем, климат исследуемого района можно охарактеризовать как умеренно тёплый, влажный, с мягкой зимой.

Среднегодовая температура воздуха составляет 4,4 °С. Среднемесячные температуры воздуха приведены в таблице 1. Усреднённая дата начала первых заморозков в Кингисеппе: 27 сентября. Усреднённая дата окончания заморозков: 20 мая. Среднее количество безморозных дней: 129 суток.

Таблица 1. Среднемесячные температуры воздуха в Кингисеппе.

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Температура, °С	-7,9	-8,0	-3,7	3,5	10,1	14,7	17,1	15,5	10,5	5,0	0,1	-4,5

Среднегодовая температура почвы составляет 5 °С. Среднемесячные температуры почвы приведены в таблице 2.

Таблица 2. Среднемесячные температуры почвы в Кингисеппе.

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Температура, °С	-9	-9	-6	3	12	18	19	17	11	5	-1	-5

Среднегодовое количество осадков составляет 680 мм. Среднемесячное количество осадков приведено в таблице 3.

Таблица 3. Среднемесячное количество осадков в Кингисеппе.

Месяц	Янв	Фев	Мар	Апр	Май	Июн	Июл	Авг	Сен	Окт	Ноя	Дек
Осадки, мм	36	33	34	40	47	67	83	88	80	65	61	46

На рисунке 8 представлен годовой ход температуры воздуха и количества осадков (климатограмма), построенный по данным метеостанции в городе Кингисепп.



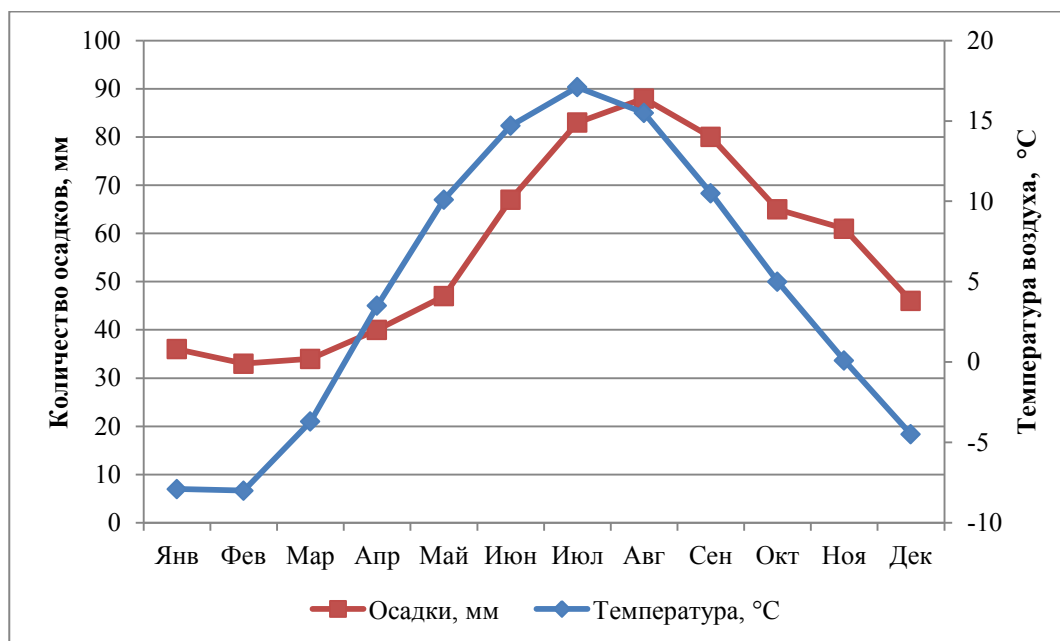


Рисунок 8. Годовой ход температуры воздуха и количества осадков (климатограмма), построенный по данным метеостанции в городе Кингисепп.

На рисунке 9 представлена роза ветров в городе Кингисепп.

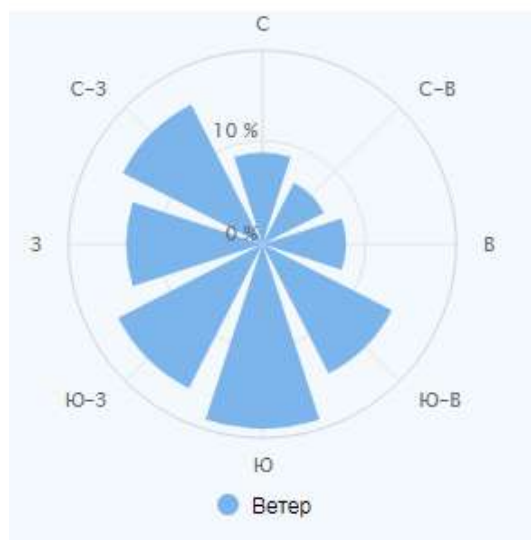


Рисунок 9. Роза ветров в городе Кингисепп (Прогноз погоды...).

В таблице 4 приведены направления ветра в процентах за год в городе Кингисепп.

Таблица 4. Направления ветра (в %) в городе Кингисепп.

С	С-З	З	Ю-З	Ю	Ю-В	В	С-В
8,9	15,2	13,2	15,7	17,9	14,1	8,1	6,7

Климат влияет на почвообразование, поскольку он определяет количество воды, доступной для таких процессов, как выветривание минералов, транспортировка минералов и высвобождение элементов. Климат исследуемого района характеризуется избыточным или достаточным увлажнением.

### 3.3 Природные воды

Речная сеть на исследуемой территории развита. Пробные площади располагались на водосборах двух рек – крупного водотока Ленинградской области – реки Луга и притока Луги – реки Нотика.

Река Луга протекает с севера от ООО «ПГ «Фосфорит». Питание реки смешанное, с преобладанием снегового (Большая советская...). Вода по химическому составу относится к гидрокарбонатному классу и кальциевой группе. Минерализация воды в среднем 170 мг/л (в половодье – 120–200 мг/л; в межень – 300–400 мг/л). Качество речных вод низкое из-за поступления сточных вод (Вода России...). Река Нотика впадает в реку Луга на западе исследуемой территории. Бассейн реки Луга занимает площадь более 13 тыс. км<sup>2</sup>. Длина реки – 353 км. Расход воды 93 м<sup>3</sup>/с.

На территории исследования также находится ряд водных объектов антропогенного происхождения. Это карьеры, образовавшиеся в процессе добычи вскрышной породы и фосфоритовой породы. Их количество насчитывает больше двадцати. Помимо них есть заполненные водой хвостохранилища и технические водоёмы на промышленной территории предприятия. Основная часть карьеров, которые уже рекультивированы засыпкой вскрышной породы, отсыпкой почвенного слоя, засевом трав и посадкой деревьев, находятся южнее автомобильной дороги А-180 (Е20). Хвостохранилища, технические водоёмы и несколько карьеров расположены севернее автомобильной дороги. В широтном направлении карьеры по добыче фосфориты вытянуты более чем на 15 км, а в меридианальном почти на 5 км.

Среди водоносных горизонтов, принимающих участие в обводнении месторождения, выделяются:

1. Водоносный горизонт четвертичных отложений, подстилаемый относительно водоупорными озёрно-ледниковыми моренными суглинками и глинами мощностью 2–15 м.

2. Ордовикский водоносный комплекс. Средняя мощность – 11 м. На севере – 4 м, на юге – до 28 м. Водовмещающие породы – известняки и доломиты нижнего и среднего ордовика, мергели среднего девона.

3. Кембро-ордовикский водоносный комплекс. Мощность комплекса 22,5 – 36 м. Водовмещающие породы – пески и песчаники. Водопроницаемость составляет 100 м<sup>2</sup>/сут. Питается за счёт перетока из вышележащего горизонта.

4. Техногенный водоносный горизонт, приуроченный к вскрышным породам. Горизонт имеет мощность до 22 м (Разработка Программы..., 2009).

### 3.4 Почвенный покров

Исследуемая территория относится к бореальному географическому поясу, к Европейско-Западно-Сибирской таёжно-лесной почвенно-климатической области, к почвенной зоне дерново-подзолистых почв и дерново-подзолов южной тайги, к почвенно-климатической фации умеренно-промерзающих почв, к Прибалтийской почвенной провинции (Грибова, и др., 1980).

В процессе исследования было выявлено значительное разнообразие почвенно-экологических условий, которое формирует разнообразие почв исследованной территории. Выявлено 10 типов почв, относящихся к 7 отделам, согласно Классификации почв России 2004 года. Почвенное разнообразие приведено в таблице 5.

Таблица 5. Типы почв исследованной территории.

Ствол почвообразования	Отдел	Тип почвы	Формула
Постлитогенные	Альфегумусовые	Подбур	O – BHF – C
		Дерново-подбур	AУ – BHF – C
	Текстурно-дифференцируемые	Дерново-подзолистая	AУ – EL – AEL – BEL – C
	Глеевые	Глеезём серогумусовый	AУ – G – CG
		Перегноино-глеевая	H – G – CG
	Литозёмы	Литозём серогумусовый	AУ – R
	Агрозёмы	Агрозём альфегумусовый глеевый	P – BH – G – CG
Органогенные	Торфяные	Торфяно-олиготрофные	TO – TT
		Торфяно-эутрофные	TE – TT
Техногенные поверхностные образования	Квазизёмы	Реплантозём	RY – D

Ниже представлено описание всех отделов почв исследованной территории на примере типичных разрезов, сделанных в Кингисеппском районе в процессе полевого этапа работы. Описание почвенных разрезов по ГОСТ 17.4.4.02-2017 приведено в приложении 4.

## Постлитогенный ствол почвообразования

### *Альфегумусовые почвы*

Разнообразие альфегумусовых почв на исследованной территории представлено подбурами и дерново-подбурами.

### Дерново-подбуры

Дерново-подбуры распространены на территории больше, чем подбуры, так как на значительной части территории подстилающими породами выступают средние и основные по химическому составу горные породы (рисунок 10). Дерново-подбуры характерны для условно-фоновых территорий и встречаются только там. Это типичная почва для лесных экосистем изученной территории, особенно для почв южной тайги на песчаных отложениях. Встречаются самые разные подтипы подбуров: типичный, иллювиально-гумусовый, иллювиально-железистый, грубогумусовый. Для данного типа почвы характерны гумусообразование, лессиваж, биогенно-аккумулятивные процессы и иллювиально-аккумулятивные процессы.



Рисунок 10. Дерново-подбур типичный мощный супесчаный со среднеразвитым профилем на флювиогляциальных отложениях (фото автора).

АУ (0 – 27 см) – тёмно-серый, рыхлый, легкосуглинистый, мелкокомковатый, влажный, с ходами дождевых червей, присутствуют светлые зёрна минералов, включения крупных корней и гальки, переход постепенный, граница размыта.

ВНФ (27 – 61 см) – тёмно-бурый, свежий, супесчаный, бесструктурный, рыхлый, включения корней, камней.

*Глеевые почвы*Перегнойно-глеевая почва

Перегнойно-глеевая почва была описана только на одной условно-фоновой пробной площади (рисунок 11). Растительное сообщество: ольховосерое паслёно-вейниково-зеленомошное. Подстилающие породы: глины сиверской свиты. Для формирования перегнойно-глеевой почвы необходимо дополнительное увлажнение или постоянное переувлажнение. Перегнойно-глеевая почва формируется на тяжёлых глинах. Для данного типа почвы характерны оглеение, биогенно-аккумулятивные процессы и иллювиально-аккумулятивные процессы.



Рисунок 11. Перегнойно-глеевая почва поверхностно оглеенная среднесуглинистая со среднеразвитым профилем на флювиогляциальных отложениях (фото автора).

Н (0 – 43 см) – тёмно-бурый, уплотнённый, среднесуглинистый, сырой, бесструктурный, мелкопористый, включения корней, переход заметный, граница волнистая.

G (43 – 60 см) – сизый цвет при обнаружении горизонта, окрашивается в бурый цвет при нахождении на воздухе, плотный, глина, сырой, бесструктурный, мелкопористый, включения корней.



*Текстурно-дифференцированные почвы*Дерново-подзолистая почва

Дерново-подзолистая почва встретилась только на одной пробной площади, расположенной на территории фермерского хозяйства, что вполне естественно, так как дерново-подзолистая почва – типичная почва для луговых сообществ Ленинградской области (рисунок 12). Растительное сообщество: снытево-боровое сообщество. В качестве подстилающих пород выступают глины сиверской свиты. Для дерново-подзолистых почв характерен атмосферный тип увлажнения. Формируются на лёгких глинах. Для данного типа почвы характерны гумусообразование, выщелачивание, подзолистый процесс, биогенно-аккумулятивные процессы и иллювиально-аккумулятивные процессы.



Рисунок 12. Дерново-подзолистая почва среднемошная неглубокоподзолистая легкосуглинистая со слаборазвитым профилем на флювиогляциальных отложениях (фото автора).

AY (0 – 12 см) – светло-серый, уплотнённый, легкосуглинистый, мелкокомковатый, свежий, с ходами дождевых червей, присутствуют светлые зёрна минералов, включения крупных корней и гальки, переход заметный, граница волнистая.

EL (12 – 15 см) – белый, уплотнённый, легкосуглинистый, плитчатый, свежий, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней и гальки, переход заметный, граница волнистая.

BEL (15 – 17 см) – светло-бурый, уплотнённый, легкосуглинистый, плитчатый, свежий, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней и гальки, переход заметный, граница карманная.

ВТ (17 – 28 см) – бурый, уплотнённый, тяжелосуглинистый, орехово-призматический, свежий, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней и гальки.

### *Литозёмы*

#### Литозём серогумусовый

На исследуемой территории распространены литозёмы серогумусовые (рисунок 13) (Недбаев и др., 2022). Данный тип почв встречается на условно-фоновых территориях при наличии плотных пород. Растительное сообщество лесное, может быть ольховосерым таволговым или еловым кислично-зеленомошным. В данных экосистемах в настоящее время происходит активное накопление органики. Характерной особенностью литозёмов серогумусовых является исключительно атмосферное увлажнение. Для данного типа почвы характерны гумусообразование и биогенно-аккумулятивные процессы.



Рисунок 13. Литозём серогумусовый среднемошный легкосуглинистый с неразвитым профилем на элюво-делювии известняка (фото автора).

АУ (0 – 18 см) – буровато-серый, уплотнённый, легкосуглинистый, мелкокомковатый, влажный, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней, гальки, валунов, обломков породы, переход резкий, граница ровная.

Р – плотная горная порода: песчаники саблинской свиты или известняки и доломиты волховской и обуховской свит.

*Агрозёмы*Агрозём альфегумусовый глеевый

Агрозём альфегумусовый встретился только на одной пробной площади – в луговой экосистеме в непосредственной близости от борта хвостохранилища (рисунок 14). Растительное сообщество: ольховосерое снытевое. Подстилающие породы: глины сиверской свиты. Агрогенный горизонт, вероятно, остался как результат сельскохозяйственных работ в недалёком прошлом на исследуемой территории. Для данного типа почвы характерны гумусообразование, лессиваж, оглеение, биогенно-аккумулятивные процессы и иллювиально-аккумулятивные процессы.



Рисунок 14. Агрозём альфегумусовый оглеенный среднепахотный среднемощный глубокооглеенный легкосуглинистый со среднеразвитым профилем на флювиогляциальных отложениях (фото автора).

R (0 – 34 см) – чёрный, рыхлый, комковатый, влажный, легкосуглинистый, переход ясный, граница волнистая.

VNF (34 – 57 см) – буро-охристый, влажный, супесчаный, бесструктурный, рыхлый, включения корней, камней, затёки тёмных пятен, переход резкий, граница волнистая.

G (57 – 65 см) – сизый цвет при обнаружении горизонта, окрашивается в бурый цвет при нахождении на воздухе, плотный, тяжёлый суглинок, сырой, бесструктурный, мелкопористый.



## Органогенный ствол почвообразования

### *Торфяные почвы*

#### Торфяная олиготрофная почва

Из органогенного ствола почвообразования наиболее распространены олиготрофно-торфяные почвы (рисунок 15). Они являются почвами олиготрофного болота Пятницкий мох, расположенного к югу от территории исследования в Лужско-Нарвской депрессии, представляющей собой плоскую равнину на водоразделе рек Нарва и Луга. Характерное растительное сообщество для данных почв – ерничково-ивово-тростниковое сфагновое с примесью сосны. Болото расположено на отложениях медниковской свиты – глинистых известняках и доломитах. Места пробоотбора находятся на расстоянии 4,3 – 4,5 км от отвала фосфогипса. Для данной местности характерен только один процесс почвообразования – торфообразование. Из-за близкого залегания грунтовых вод нет возможности визуально оценить полноценный разрез.



Рисунок 15. Олиготрофно-торфяная почва сфагновая (фото автора).

ТО (0 – 9 см) – светло-коричневый, сырой, состоит преимущественно из остатков сфагновых мхов разной степени разложения, не превышающей 50%. Представляет собой верхнюю часть торфяной толщи, которая рассматривается как органогенная порода.

Под ТО должен залегать ТТ – торфяная залежь.

## Техногенные поверхностные образования

### *Квазизёмы*

#### Реплантозём

Наряду с почвами объектом почвенных исследований традиционно являются выходящие на дневную поверхность техногенные поверхностные образования – квазизёмы, натурфабрикаты, артификабрикаты и токсикофабрикаты. Квазизёмы – это городские почвы (урбаквазизёмы) и почвы рекультивированных территорий (реплантозёмы).

Реплантозём встречается повсеместно на рекультивированных отвалах вскрышной породы (рисунок 16), отвале фосфогипса и хвостохранилищах. Встречаются как с признаками грубогумусового горизонта, так и с дерновыми признаками, так с признаками оглеения. Закономерностей в формировании растительного покрова не наблюдается. Он может быть самым различным. Формируется он на элюво-делювии плотных пород. Для данного типа почвы характерны гумусообразование и биогенно-аккумулятивные процессы. При этом стоит отметить, что профили реплантозёмов значительно различаются в зависимости от подстилающих пород (техногенного материала), которые определяют основные процессы в почвах на начальных стадиях развития (Абакумов, Гагарина, 2008). Отвалы и хвостохранилища, которые ещё не прошли этап рекультивации, можно отнести к антропогенной структуре почвенного покрова, к типу горнорудных карьеров, а при формировании сплошного покрова из реплантозёмов структура почвенного покрова становится антропогенно-изменённой, со временем трансформируясь в рекреационно-парковый тип структуры почвенного покрова (Сухачёва, Апарин, 2018).



Рисунок 16. Реплантозём на отвале вскрышных пород (фото автора).

W (0 – 8 см) – буро-серый, рыхлый, органические остатки, переход ясный, граница ровная.

R – плотная порода: вскрышные породы (известняки и доломиты волховской и обуховской свит) или фосфогипс.

### 3.5 Растительный покров

Согласно (Грибова, и др., 1980), исследованная территория относится к южнотаёжным лесам Валдайско-Онежской подпровинции Северо-европейской таёжной провинции Евразийской таёжной (хвойнолесной) области. Согласно (Растительность России..., 2004), для территории характерны сосновые (*Pinus sylvestris* L.) южнотаёжные леса с южноборовыми видами, бореальная растительность равнин. Однако именно сосновых лесов на территории исследования не было зафиксировано. В основном, растительность представлена берёзовыми и еловыми лесами. Значительную роль в распространении растительности играет расположение водных объектов, подстилающие породы, почвы и антропогенное преобразование территории.

Изучением регенерации почвенно-растительного покрова Кингисеппского месторождения фосфоритов занимался Абакумов Е.В. (Абакумов, 2004). Он отмечал, что восстановление растительности при самозарастании проходит по типу экогенетических сукцессий, и каждой стадии развития растительного сообщества соответствует своеобразная почва с определенным набором признаков и свойств. При рекультивации, связанной с агрохимической и физической оптимизацией грунтов сукцессии растительности осуществляются быстрее, чем при самозарастании.

Я.А. Дмитракова указывает, что обилие еловых сообществ связано с тем, что рекультивация отвалов вскрышной породы проводилась именно елью (Дмитракова, и др., 2018). Е.А. Кушнир (Кушнир, и др., 2021) отмечает, что на отвалах вскрышных пород наиболее закрепившиеся лесные насаждения, которые за 35–38 лет не деградировали и образовали лесные экосистемы, сформированы следующими древесными породами: берёза пушистая, ель европейская, лиственница Сукачева и сосна обыкновенная. Растения других видов, которые использовались при рекультивации в 80-е годы, погибли или встречаются лишь в единичных экземплярах (тополь берлинский, карагана древовидная).

В целом, хочется отметить, что по результатам проведённых исследований растительный покров территории достаточно мозаичен. Можно выделить шесть типов растительных формаций: сообщества на отвале фосфогипса, сообщества на хвостохранилище и рядом с ним, сообщества на отвалах вскрышной породы, болотные, лесные и луговые сообщества. Среди древесного яруса встречаются в качестве доминантов: берёза пушистая *Betula pubescens*, ель европейская *Picea abies*, сосна обыкновенная *Pinus sylvestris*, ива *Salix sp.*, осина *Populus tremula*, ольха серая *Alnus incana*, вяз *Ulmus glabra*. Среди природных экосистем обильно встречаются влаголюбивые виды травяно-кустарничкового яруса: таволга вязолистная *Filipendula ulmaria*, хвощ лесной *Equisetum sylvaticum* и др.



*Сообщества на отвале фосфогипса*

В конце прошлого века предпринимались попытки провести рекультивацию отвала фосфогипса. На данный момент залесённым является только юго-западный склон отвала. Существует два типа ПТК: на склоне и у подножия отвала. Почвенный покров представлен реплантозёмами. Общим для фаций на отвале фосфогипса является наличие в травяно-кустарничковом ярусе иван-чая узколистного *Chamaenerion angustifolium* (обилие сор 1), одуванчика лекарственного *Taraxacum officinale* (sp), полыни обыкновенной *Artemisia vulgaris* (sol) и бора развесистого *Millium effusum* (sol) и отсутствием кустарникового и мохово-лишайникового яруса. На склонах отвала фосфогипса сформировалось осиновое щучковое сообщество с включением сосны европейской *Pinus sylvestris* и берёзы пушистой *Betula pubescens* в древесном ярусе и ежой сборной *Dactylis glomerata* (сор 1) и земляникой *Fragaria vesca* (сор 1) в травяно-кустарничковом ярусе (рисунок 17), а у подножия – кипрейно-тростниковое сообщество без древесного яруса с крапивой двудомной *Urtica dioica* (sp), чиной луговой *Lathyrus pratensis* (sp) и мать-и-мачехой *Tusilago farfara* (sp) в травяно-кустарничковом ярусе.



Рисунок 17. Склон отвала фосфогипса с осиновым щучковым сообществом на реплантозёмах (фото автора).

*Сообщества на хвостохранилище и рядом с ним*

На территории Кингисеппского месторождения фосфоритов расположено три хвостохранилища. В процессе исследования удалось заложить одну пробную площадь на рекультивированном хвостохранилище и 4 пробных площади на бортах хвостохранилища и на производственной территории, прилегающей к нему. Соответственно, существует три типа ПТК на данном объекте: хвостохранилище, борт и производственная территория, покрытая растительностью. Почвенный покров представлен реплантозёмами. Общим для фаций на хвостохранилище и рядом с ним является наличие в травяно-кустарничковом ярусе сныти обыкновенной *Aegopodium podagraria* (sp). На хвостохранилище сформировалось берёзовое грушанко-кипрейно-вейниковое сообщество с включением сосны европейской *Pinus sylvestris* в древесном ярусе и вейником *Calamagrostis* sp. (sp) в травяно-кустарничковом ярусе; на борту хвостохранилища – ивовое крапивное зеленомошное сообщество (рисунок 18), ольховосерое снытевое зеленомошное с включением берёзы *Betula pubescens* и ольхово-вязо-ивовое снытевое зеленомошное с включением дуба черешчатого *Quercus robur*; на производственной территории – ивовое таволгово-кипрейное сообщество.



Рисунок 18. Борт хвостохранилища с ивовым крапивным зеленомошным сообществом (фото автора).



*Сообщества на отвалах вскрышной породы*

Отвалы вскрышной породы занимают значительную площадь Кингисеппского месторождения фосфоритов. Их рекультивация началась в 80-е гг. XX века и продолжается до сих пор. Вскрышные породы представлены известняками и доломитами. Растительное сообщество определяется лесными насаждениями, которые использовались при рекультивации, и формой мезорельефа отвалов. Почвенный покров представлен реплантозёмами. Растительный покров отвалов вскрышной породы достаточно мозаичен, и выделить какие-то особенности, характерные для всех фаций на отвалах не представляется возможным. Для большинства отвалов характерна рекультивация елью европейской *Picea abies*. Причём, можно встретить как уже сформировавшиеся 40-летние ельники, так и недавно посаженные, так как рекультивация отвалов продолжается по сей день. Помимо ели европейской ярус древостоя могут составлять берёза пушистая *Betula pubescens*, осина *Populus tremula*, ива *Salix sp.* и сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* (рисунок 19). В травяно-кустарничковом ярусе распространены вейник *Calamagrostis sp.*, мать-и-мачеха *Tussilago farfara*, сныть обыкновенная *Aegopodium podagraria*, золотарник обыкновенный *Solidago virgaurea*. Мохово-лишайниковых ярус обычно присутствует, но не покрывает больших площадей (в среднем проективное покрытие на пробной площади на отвале составляет 30%).



Рисунок 19. Смешанный лес на рекультивированном отвале вскрышной породы (фото автора).

*Сообщества болотных экосистем исследованной территории*

Все болотные экосистемы отнесены к условно-фоновым. К данной категории относится 5 пробных площадей: две – на болоте Пятницкий мох, расположенном на расстоянии 5 км от современной производственной территории, оно непосредственно примыкает к рекультивированным отвалам вскрышной породы, которые в настоящее время относятся к землям лесного фонда; ещё две пробные площади располагаются на расстоянии 8 км к северо-западу от производственной территории; и последняя пробная площадь располагается на расстоянии 7 км к северу от производства. Подстилающими породами выступают как глинистыми известняками и доломитами медниковской свиты (болото Пятницкий мох), так и пластичными глинами сиверской свиты (остальные болотные пробные площади). Болота приурочены к отрицательным формам рельефа (понижениям между положительными формами рельефа или речным долинам). На исследованной территории встречаются как торфяные олиготрофные почвы, так и торфяные эутрофные почвы. Покров сфагновыми мхами на болотах составляет 95-100 %. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса сильно разнится: от 15 до 80 %. Для болото Пятницкий мох характерно наличие в доминантах сосны обыкновенной *Pinus sylvestris*, карликовой берёзы *Betula nana* и тростника обыкновенного *Fragmites australis* (рисунок 20).



Рисунок 20. Понижение с сосновым ерников-ивово-тростниковым сфагновым сообществом на торфяных олиготрофных почвах (фото автора).

*Сообщества лесных экосистем исследованной территории*

В условно-фоновых лесных экосистемах заложено 11 пробных площадей на расстоянии 4-7 км от производственной территории. Все эти экосистемы располагаются на речной террасе реки Луга. Подстилающими породами выступают следующие геологические образования: сиверская свита (пластичные глины с прослоями алевролитов); люкатисткая и тискреская свиты (глины и алевролиты); саблинская свита (пески и песчаники) и тосненская, леэтсетская и копорская свиты (пески, песчаники, аргиллиты и глины). Список типов почв лесных экосистем тоже достаточно разнообразен: глеевые почвы (глеезёмы серогумусовые, перегнойно-глеевые почвы), литозёмы (литозём серогумусовый) и альфегумусовые почвы (дерново-подбуры: типичный, иллювиально-гумусовый грубогумусированный и иллювиально-железистый). Общим для лесных фаций является наличие древесного яруса, отсутствие в древесном ярусе сосны европейской *Pinus sylvestris* и ивы *Salix sp.* (как на отвалах), в доминанты выходят ель европейская *Picea abies* (рисунок 21), берёза пушистая *Betula pubescens* и осина *Populus tremula*. Проективное покрытие мохово-лишайникового яруса составляет 30-95 %.



Рисунок 21. Речная терраса с еловым кислично-зеленомошным сообществом на дерново-подбурах (фото автора).



*Луговые сообщества на сельскохозяйственных полях (фермерских хозяйствах)*

На сельскохозяйственных землях заложено две пробные площади. Первая – на расстоянии 4 км от производства (рисунок 22), вторая – на расстоянии 5 км. Их особенность в том, что они используются для производства фермерской продукции (в частности, для выпаса и прокорма крупного рогатого скота). Подстилающими породами выступают следующие геологические образования: сиверская свита (пластичные глины с прослоями алевролитов) и люкатисткая и тискреская свиты (глины и алевролиты). Почвы – дерново-подзолистые. Общим для луговых фаций является отсутствие древесного яруса, наличие в травяно-кустарничковом ярусе лютика едкого *Ranunculus acris*, лапчатки гусиной *Potentilla anserina*, чины луговой *Lathyrus pratensis*, мышиного горошка *Vicia cracca*, тысячелистника обыкновенного *Achillea millefolium* и купыря лесного *Anthriscus sylvestris*. На пробной площади на расстоянии 5 км доминантами в луговом сообществе являются ежа сборная *Dactylis glomerata* (сор 1), бор развесистый *Millium effusum* (сор 1), сныть обыкновенная *Aegopodium podagraria* (сор 1), осот полевой *Sonchus arvensis* (сор 1), манжетка обыкновенная *Alchemilla vulgaris* (сор 1). На второй пробной площади на расстоянии 4 км доминантом является вейник *Calamagrostis sp.* (сор 3). Также встречаются одуванчик лекарственный *Taraxacum officinale* (sp), клевер луговой *Trifolium pratense* (sp) и др. Мохово-лишайниковый ярус на эти площадях отсутствует.



Рисунок 22. Речная терраса с вейниковым лугом на дерново-подзолистых почвах.

### **Выводы к главе 3**

Территория исследования относится к южнотаёжным равнинным ландшафтам севера Восточно-Европейской (Русской) равнины. Под значительной частью территории залегают карбонатные породы ордовикского периода, а также распространены породы кембрийские породы. Преобладают южное и западное направление ветра. Климат исследуемого района можно охарактеризовать как умеренно тёплый, влажный, с мягкой зимой. Речная сеть развита, пробные площади располагались на водосборах двух рек – крупного водотока Ленинградской области – реки Луга и притока Луги – реки Нотика. Исследуемая территория относится к Европейско-Западно-Сибирской таёжно-лесной почвенно-климатической области, к почвенной зоне дерново-подзолистых почв и дерново-подзолов южной тайги, к почвенно-климатической фации умеренно-промерзающих почв, к Прибалтийской почвенной провинции. На месторождении распространены реплантозёмы, а на условно-фоновой территории альфегумусовые, глеевые, торфяные и текстурно-дифференцированные почвы. Растительность представлена берёзовыми и еловыми лесами. Значительную роль в распространении растительности играет расположение водных объектов, подстилающие породы, почвы и антропогенное преобразование территории.

## **Глава 4. Геоэкологическая оценка воздействия производств фосфорных удобрений на почвы**

### **4.1 Современное экологическое состояние почвенного покрова Кингисеппского месторождения фосфоритов**

В процессе исследования экосистем на изучаемой территории выделено несколько типов различных объектов: природные – лесные, луговые и болотные экосистемы – и природно-антропогенные – на отвале фосфогипса, на месте хвостохранилищ и на месте рекультивированных карьеров по добыче фосфоритов. Карьеры при рекультивации засыпались вскрышной породой.

Для оценки современного экологического состояния почвенного покрова было решено разделить территорию исследования на три части: условно-фоновая территория, территория рекультивированных отвалов вскрышной породы и территория крупных техногенных объектов, таких как хвостохранилища и отвал фосфогипса. Различие этих трёх территории подтверждается статистически значимыми различиями выборок, практически по всем исследуемым химическим элементам (U-критерий Манна-Уитни). В основе работы лежит следующее предположение: условно-фоновая территория не имеет (или проявление незначительно) следов антропогенного воздействия (воздействия производства фосфорных удобрений); территория рекультивированных отвалов вскрышных пород раньше находилась под сильным антропогенным прессингом, в настоящее же время данная территория зарастает лесной растительностью и частично уже отнесена к землям лесного фонда; территория крупных техногенных объектов характеризуется максимальным антропогенным воздействием.

Современное экологическое состояние почвенного покрова было оценено по содержанию предполагаемых загрязняющих веществ (тяжёлых металлов, фтора, фосфора и ряда других показателей) в сравнении с фоновыми показателями, встречающимися в литературных источниках и нормативных документах. Некоторые результаты данного подраздела главы представлены в статье в Вестнике СПбГУ (Елсукова, Недбаев, Кузьмина, 2022). В настоящей диссертации уточнены и дополнены результаты, опубликованные в статье. В таблице 6 приведено содержание подвижных форм тяжелых металлов (ТМ) в пробах почв.

Содержание подвижных форм ТМ зависит от многих факторов, в том числе от количества осадков, и меняется от года к году более активно, чем валовое содержание элементов, тем не менее, их содержание нормировано и является важным показателем экологического состояния почв. Полученные результаты сравниваются с ориентировочной / предельно допустимой концентрацией (ОДК / ПДК) для почв. Также в

качестве величины для сравнения использована медиана содержания подвижных форм элементов в почвах южной тайги Баренцрегиона (Salminen et al., 2004).

Таблица 6. Содержание подвижных форм тяжелых металлов в почвах, мг/кг (в числителе — среднее значение, в знаменателе — минимальное – максимальное).

Элемент	Условно-фоновая территория (n=26)	Рекультивированные отвалы вскрышной породы (n=35)	Техногенные объекты (n=18)	Среднее значение/ Медиана (n=79)	ПДК/ОДК	Почвы южной тайги Баренцрегиона (медиана)
Ba	$\frac{35}{5-110}$	$\frac{50}{2,5-190}$	$\frac{50}{2,5-300}$	$\frac{45}{30}$	-	34,5
Cd	$\frac{0,10}{0,02-0,40}$	$\frac{0,30}{0,02-0,60}$	$\frac{0,80}{0,02-1,50}$	$\frac{0,30}{0,30}$	-	-
Co	$\frac{0,25}{0,25-0,25}$	$\frac{0,25}{0,25-0,25}$	$\frac{0,25}{0,25-2,00}$	$\frac{0,25}{0,25}$	5,0	0,25
Mn	$\frac{36,0}{5,5-141,5}$	$\frac{160,0}{6,0-432,5}$	$\frac{67,0}{1,0-249,0}$	$\frac{98,0}{54,0}$	pH 5.1–6.0 80 (для фоновых) pH > 6.0 100 (для антропогенно нарушенных)	315
Ni	$\frac{0,5}{0,25-5,0}$	$\frac{0,5}{0,25-1,5}$	$\frac{2,0}{0,25-20,0}$	$\frac{1,0}{0,5}$	4,00	0,6
Pb	$\frac{2,0}{0,5-5,0}$	$\frac{2,0}{0,5-11,5}$	$\frac{3,0}{0,5-35,0}$	$\frac{2,5}{1,5}$	6,00	-
Cr	$\frac{0,5}{0,25-2,5}$	$\frac{0,5}{0,25-4,5}$	$\frac{1,0}{0,25-11,5}$	$\frac{0,5}{0,25}$	6,00	-
Cu	$\frac{2,0}{0,5-6,5}$	$\frac{3,0}{0,25-6}$	$\frac{4,0}{0,5-12,0}$	$\frac{3,0}{3,0}$	3,00	-
Fe	$\frac{386}{11-2080}$	$\frac{66}{0,5-524}$	$\frac{26}{1-119}$	$\frac{162}{46}$	-	28
V	$\frac{2,5}{2,5-10}$	$\frac{2,5}{2,5-2,5}$	$\frac{2,5}{2,5-10}$	$\frac{2,5}{2,5}$	-	-
Zn	$\frac{5,5}{1,0-27,5}$	$\frac{5,0}{1,0-26}$	$\frac{10,0}{1,0-37,5}$	$\frac{6,0}{3,0}$	23,00	22,8
Sr	$\frac{9,5}{1,5-53,5}$	$\frac{9,0}{2,5-17,0}$	$\frac{72,5}{3,5-377,0}$	$\frac{22,0}{8,0}$	-	-

**Примечание.** Показатели для двух последних столбцов взяты из: Постановление главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 N 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21...» (для ОДК / ПДК), а также (Salminen et al., 2004).

В целом, содержание подвижных форм тяжелых металлов не превышает фоновых значений для Баренцрегиона (кроме бария и железа). Характерно, что содержание железа на условно-фоновой территории выше, чем на антропогенно-нарушенных. Среднее содержание железа на техногенных объектах составляет 26,5 мг/кг, а на природных территориях в 14 раз больше — 386,5 мг/кг. Содержание бария в среднем составляет 45 мг/кг, максимальное содержание наблюдается в почвах крупных техногенных объектов и достигает 300 мг/кг.

Среднее содержание подвижных форм кадмия в почвах, сформированных на техногенных объектах, составляет 0,8 мг/кг и достигает 1,5 мг/кг в единичных пробах на техногенных объектах. При этом локальный фон кадмия в среднем 0,1 мг/кг. Превышение содержания подвижных форм кадмия в природно-антропогенных комплексах над природными наблюдается в несколько раз. Подвижные кобальт и хром обнаружены в незначительных концентрациях, не превышающих нормативы. Установлено, что на условно-фоновой территории существуют превышения по марганцу, никелю, цинку и меди. На рекультивированных отвалах вскрышной породы есть превышения ПДК по марганцу, меди, свинцу и цинку. В почвах на отвале фосфогипса и на хвостохранилище зафиксированы превышения ПДК по марганцу, меди, свинцу, никелю, хрому и цинку (Елсукова и др., 2022).

В таблице 7 и на рисунке 23 представлено валовое содержание в почвах тяжелых металлов и значения кислотности. Полученные результаты сравниваются с ОДК / ПДК для почв. Для некоторых элементов величины ПДК / ОДК зависят от механического состава и кислотности почв. По механическому составу почвы крупных техногенных объектов являются супесями, условно-фоновых территорий и рекультивированных отвалов вскрышной породы — суглинками. Помимо ОДК, в качестве величин для сравнения были взяты медиана содержания элемента в почвах южной тайги Баренцрегиона (Salminen et al., 2004) и зональный фон для подзолистых почв (Саэт и др., 1990).

$pH_{KCl}$  от 3,9 до 6,7 (от сильнокислой до нейтральной реакции) при среднем значении 4,9 характерна для почв условно-фоновых территорий,  $pH_{KCl}$  от 5,7 до 6,9 при среднем значении 6,4 (от слабокислой до нейтральной реакции) — для ТПО крупных техногенных объектов. На исследованной территории антропогенная деятельность приводит к подщелачиванию почв (Елсукова и др., 2020).

Во всех почвах в данном регионе наблюдается повышенное содержание бария — в среднем около 500 мг/кг, что в 10 раз больше среднего содержания в почвах мира (50 мг/кг). Среднее значение на условно-фоновой территории составляет 507 мг/кг, на отвале вскрышной породы — 543 мг/кг, а на отвале фосфогипса — 354 мг/кг. Максимальное содержание наблюдается на отвале фосфогипса и достигает 876 мг/кг.

Кадмий накапливается на склонах отвала фосфогипса и на хвостохранилище, однако никакие нормативные показатели его содержания не превышает. На крупных техногенных объектах кадмия содержится в среднем 0,27 мг/кг, максимальная концентрация — 1,54 мг/кг. Проблема определения и нормирования кадмия в почве еще не решена (Плеханова, 2010).

Таблица 7. Валовое содержание тяжелых металлов в почвах, мг/кг (в числителе — среднее значение, в знаменателе — минимальное – максимальное) (Елсукова, 2022).

Элемент	Условно-фоновая территория (n=16)	Рекультивированные отвалы вскрышной породы (n=27)	Техногенные объекты (n=10)	Среднее значение/ Медиана (n=53)	ПДК (ОДК) Условно-фоновые территории / рекультивированные отвалы / техногенные объекты	Зональный фон (подзолистые почвы)	Почвы южной тайги Баренцрегиона (медиана)
Ba	<u>507</u> 84-687	<u>543</u> 249-837	<u>354</u> 108-876	<u>498</u> 564	-	50,00 (почвы мира)	84,30
Cd	<u>0,26</u> 0,06-0,64	<u>0,16</u> 0,08-0,52	<u>0,27</u> 0,04-1,54	<u>0,21</u> 0,14	1.00 / 2.00 / 0.5	0,70	0,41
Co	<u>5,0</u> 1,5-9,0	<u>7,0</u> 2,5-18,5	<u>3,5</u> 0,5-7,5	<u>5,5</u> 5,5	-	8,40	2,40
Cr	<u>29</u> 4-62	<u>28</u> 9-45	<u>32</u> 1-103	<u>29</u> 29	-	180,0	6,17
Cu	<u>13</u> 5-24	<u>11</u> 6-19	<u>16</u> 1-63	<u>13</u> 11	66.00 / 132.00 / 33	15,30	9,69
Fe	<u>16560</u> 5810-33810	<u>25680</u> 10080-49350	<u>16410</u> 448-32970	<u>21175</u> 21140	-	-	3750
Mn	<u>216,0</u> 86,0-458,0	<u>776,0</u> 240-3562,5	<u>355,5</u> 9,0-852,0	<u>526,5</u> 472,5	1500	715	524
Ni	<u>12</u> 5-23	<u>13</u> 4-23	<u>22</u> 1-105	<u>15</u> 13	40,00 / 80,00 / 20,00	23,20	6,07
Pb	<u>28</u> 19-47	<u>20</u> 11-26	<u>14</u> 5-25	<u>21</u> 22	65.00 / 130.00 / 32	11,50	24,20
Sb	<u>0,3</u> 0,2-0,7	<u>0,4</u> 0,1-0,7	<u>0,4</u> 0,1-1,9	<u>0,4</u> 0,3	4,50	0,34	0,18
Sc	<u>6,8</u> 1,2-12,4	<u>7,0</u> 2,8-9,6	<u>3,4</u> 0,4-7,2	<u>6,2</u> 6,8	-	7	-
Sr	<u>92</u> 36-142	<u>171</u> 82-434	<u>2381</u> 65-17000	<u>564</u> 132	-	238,00	22,70
V	<u>40,0</u> 7,5-90,0	<u>47,5</u> 20,0-82,5	<u>55,0</u> 2,5-217,5	<u>47,5</u> 45,0	-	63,50	11,30
Zn	<u>43</u> 12-100	<u>51</u> 18-173	<u>37</u> 4-107	<u>46</u> 45	110.00 / 220.00 / 55.00	41,30	51,10
pH (вод.)	<u>5,88</u> 5,07–7,01	<u>7,42</u> 6,59–8,00	<u>6,86</u> 5,49–7,40	–	–	–	–
pH (сол.)	<u>4,89</u> 3,85–6,71	<u>6,88</u> 6,29–7,30	<u>6,43</u> 5,71–6,93	–	–	–	–

\* По: Янину, 2007.

**Примечание.** Показатели для двух последних столбиков взяты из: (Саев и др., 1990) — для зонального фона; (Salminen et al., 2004) — для почв южной тайги Баренцрегиона (медиана).

Содержание валового кобальта в среднем составляет 5,5 мг/кг, что ниже фона для подзолистых почв (8,4 мг/кг), а максимума (18,5 мг/кг) достигает на рекультивированных отвалах вскрышных пород. В целом, кобальт по территории исследования распределен равномерно.

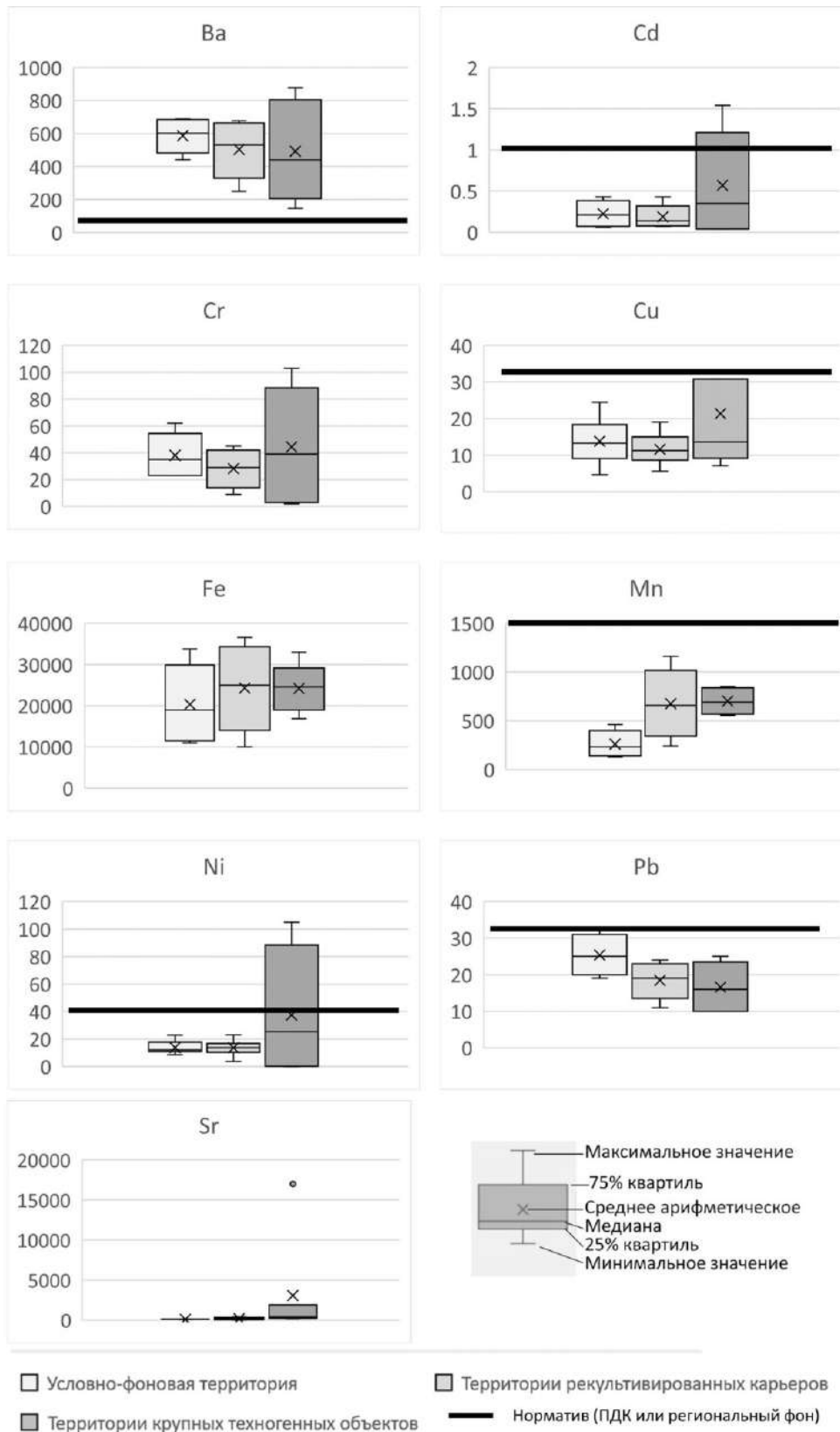


Рисунок 23. Валовое содержание тяжелых металлов (мг/кг) на условно-фоновой территории, на территории рекультивированных карьеров и на территории крупных техногенных объектов. Диаграмма показывает распределение данных по квартилям. Вертикальные линии указывают на отклонение за пределами верхнего и нижнего квартилей. Знаком × указано среднее значение, а горизонтальной линией — медиана.

Отсутствие линии норматива на графике означает, что значение норматива находится выше обозначенных на оси значений

Еще один элемент, который имеет тенденцию к накоплению в районе расположения отвала фосфогипса и хвостохранилища, — это хром. Он относительно равномерно распространен на территории исследования, его среднее содержание составляет 29 мг/кг, на крупных техногенных объектах прослеживается некоторая тенденция к повышению, его максимальное содержание достигает там 103 мг/кг.

Содержание меди в среднем составляет 13 мг/кг и максимума достигает на крупных техногенных объектах — 63 мг/кг, что в 4 раза превышает зональный фон.

Валовое железо по территории исследования распределено относительно равномерно. Его среднее содержание в почвах составляет 21175 мг/кг.

Марганец на условно-фоновой территории представлен в среднем в количестве 216 мг/кг. Однако на хвостохранилище и отвале фосфогипса его содержание возрастает в 1,5 раза, до 355,5 мг/кг. На рекультивированных карьерах содержание марганца достигает 776 мг/кг (это почти в 4 раза больше, чем на условно-фоновой территории). Однако все полученные значения не превышают зональные фоновые и ПДК для валового содержания.

Содержание никеля в среднем составляет 15 мг/кг, на крупных техногенных объектах достигает максимума — 105 мг/кг, что превышает ОДК в 5 раз, а фоновое содержание в 4,5 раза. Средние значения превышают ОДК для крупных техногенных объектов по никелю.

Валовое содержание свинца в среднем составляет 21 мг/кг, что ниже ОДК и фона. Оно несколько уменьшается на техногенных территориях (до 15 мг/кг). Содержание свинца, возможно, связано с воздействием автомобильного транспорта.

Содержание сурьмы возрастает по направлению к отвалам фосфогипса и достигает 1,9 мг/кг, что в пять раз превышает фон, но не достигает ПДК для валового содержания (4,5 мг/кг).

В настоящее время скандий не относится к элементам, типичным для формирующихся в различных компонентах окружающей среды хозяйственно освоенных районов техногенных геохимических аномалий (Янин, 2007). Содержание скандия в среднем составляет 6,2 мг/кг, что соответствует фоновому (7 мг/кг).

На условно-фоновой территории среднее содержание стронция составляет 92 мг/кг. При этом на отвалах вскрышной породы среднее значение увеличивается почти в 2 раза и составляет 171 мг/кг. На склонах отвала фосфогипса наблюдается аномальная ситуация. Среднее содержание стронция — 2381 мг/кг, что на порядок больше зонального фона (238 мг/кг) и кларка (340 мг/кг), а также превышает верхнюю границу нормального



содержания валового стронция в почвах по В.В. Ковальскому (600 мг/кг), избыточным считается содержание 600–1000 мг/кг (Ковальский, 1974), при минимальном — 65 мг/кг, и максимальном — 17000 г/кг. Данные результаты полностью подтверждают выводы предыдущих исследователей о значительной аккумуляции стронция в отвалах фосфогипса.

Ванадия больше всего содержится в почвах на склоне отвала фосфогипса и на хвостохранилище — среднее содержание достигает 55 мг/кг, а максимальное 217,5 мг/кг превышает ПДК в 2 раза. На условно-фоновой территории и в почвах рекультивированных карьеров ванадия меньше — 40 и 47,5 мг/кг, соответственно.

Цинк равномерно распространен по территории исследования — его среднее содержание 46 мг/кг примерно соответствует фоновым значениям. Установлено, что максимальное содержание валовых форм бария, кадмия, меди, никеля, сурьмы, стронция, ванадия, цинка характерно для почв, отобранных на отвале фосфогипса и на хвостохранилище. Кобальт, марганец, свинец, скандий равномерно распространены по территории исследования.

По результатам расчета коэффициента вариации, низким варьированием (коэффициент вариации меньше 30 %) характеризуются валовые барий и свинец; средним (коэффициент вариации 30–60 %) — кобальт, хром, железо, марганец, скандий, цинк; высоким (коэффициент вариации 60–100 %) — медь, никель, сурьма, ванадий; аномально высоким (коэффициент вариации больше 100 %) — кадмий и стронций.

В таблице 8 и на рисунке 24 представлено содержание в почвах органического вещества, валовое содержание фтора, фосфора и серы и содержание водорастворимых форм кальция, хлора, калия, магния, натрия аммонийных и нитратных форм азота.

Содержание органического вещества в почвах на условно-фоновой территории выше, чем в почвах антропогенных объектов. Исследованные почвы характеризуются высоким содержанием кальция, среднее содержание которого составляет 14225 мг/кг. Хлор распространён равномерно по территории исследования, причём наблюдается снижение концентраций на крупных техногенных объектах.

На условно-фоновой территории содержание соединений фтора не выходит за пределы 1100 мг/кг, а в среднем составляет 330 мг/кг. При этом среднее содержание на рекультивированных отвалах вскрышной породы достигает 870 мг/кг, а на крупных техногенных объектах — 1513 мг/кг. Максимальное содержание фтора было зафиксировано в пробе, отобранной на отвале фосфогипса. Оно составило 2860 мг/кг и в 10 раз превысило зональный фон для подзолистых почв.

Таблица 8. Содержание макроэлементов в почвах (в числителе — среднее значение, в знаменателе — минимальное – максимальное)

Показатель	Условно-фоновая территория	Рекультивированные отвалы вскрышной породы	Техногенные объекты (отвал фосфогипса и хвостохранилище)	Среднее / медиана	ОДК / ПДК	Зональный фон (подзолистые почвы)	Почвы южной тайги Баренцрегиона (медиана)
Гумус (С), %	(n=5) <u>8,7</u> 2,2–17,0	(n=15) <u>5,2</u> 1,0–8,8	(n=8) <u>4,0</u> 0,6–8,1	(n=28) <u>5,5</u> 5,5	–	–	–
Ca*, мг/кг	н.д.	(n=6) 400 25–2300	(n=3) 27800 8350–53250	(n=9) <u>14225</u> 9962	–	720	5150
Cl*, мг/кг	(n=13) <u>29</u> 12–47	(n=15) <u>28</u> 9–68	(n=15) <u>7</u> 22–34	(n=43) <u>27</u> 23	–	–	–
F, мг/кг	(n=14) <u>330</u> 120–1110	(n=24) <u>870</u> 180–2070	(n=7) <u>1530</u> 540–2860	(n=45) <u>830</u> 600	–	208	–
K*, мг/кг	(n=13) <u>27</u> 4–97	(n=15) <u>110</u> 13–562	(n=15) <u>151</u> 12–475	(n=43) <u>92</u> 36	–	–	806
Mg*, мг/кг	н.д.	(n=6) <u>832</u> 23–4377	(n=3) <u>231</u> 31–362	(n=9) <u>631</u> 50	–	–	513
Na*, мг/кг	(n=13) <u>2800</u> н.ч.–13600	(n=15) <u>10300</u> 620–68800	(n=15) <u>4634</u> н.ч.–33060	(n=43) <u>6221</u> 2527	–	–	61
NH <sub>4</sub> *, мг/кг	(n=13) <u>7</u> 1–27	(n=15) <u>32</u> 2–345	(n=15) <u>24</u> 4–87	(n=43) <u>22</u> 9	–	–	–
NO <sub>3</sub> *, мг/кг	(n=13) <u>2760</u> 470–5780	(n=15) <u>6801</u> 27–51411	(n=15) <u>5082</u> 9–25590	(n=43) <u>5208</u> 2874	–	–	–
P, мг/кг	(n=14) <u>1245</u> 215–5370	(n=24) <u>4535</u> 484–17908	(n=7) <u>8148</u> 3080–13904	(n=45) <u>3897</u> 2376	–	700	927
S, мг/кг	(n=14) <u>500</u> н.ч.–1150	(n=24) <u>800</u> н.ч.–2200	(n=7) <u>650</u> н.ч.–1100	(n=45) <u>750</u> н.ч.	160	720	1640

Примечание: н.д. – нет данных; \* – водорастворимая форма

На всей территории исследования фосфор распространен повсеместно. По содержанию фосфора на всей территории исследования наблюдается превышение известных фоновых значений. Это можно объяснить тем, что данный регион расположен в районе Кингисеппского месторождения фосфоритов. На условно-фоновой территории среднее содержание фосфора составляет 1215 мг/кг, на рекультивированных карьерах наблюдается увеличение содержания фосфора до 4535 мг/кг, на территории крупных антропогенных объектов – до 8148 мг/кг. Максимальное значение на рекультивированных карьерах достигает 17908 мг/кг, что в 25 раз превышает фон.

Содержание водорастворимых форм калия имеет тенденцию к накоплению на техногенных объектах. На условно-фоновой территории оно составляет 27 мг/кг, на рекультивированных отвалах вскрышной породы – 110 мг/кг, а на отвале фосфогипса и хвостохранилищах – 151 мг/кг. Магний накапливается преимущественно на отвалах вскрышных пород (832 мг/кг – что превышает медианное значения для почв южной тайги Баренцева региона), как и натрий (до 10300 мг/кг). Соединения азота тоже накапливаются на рекультивированных отвалах вскрышных пород.

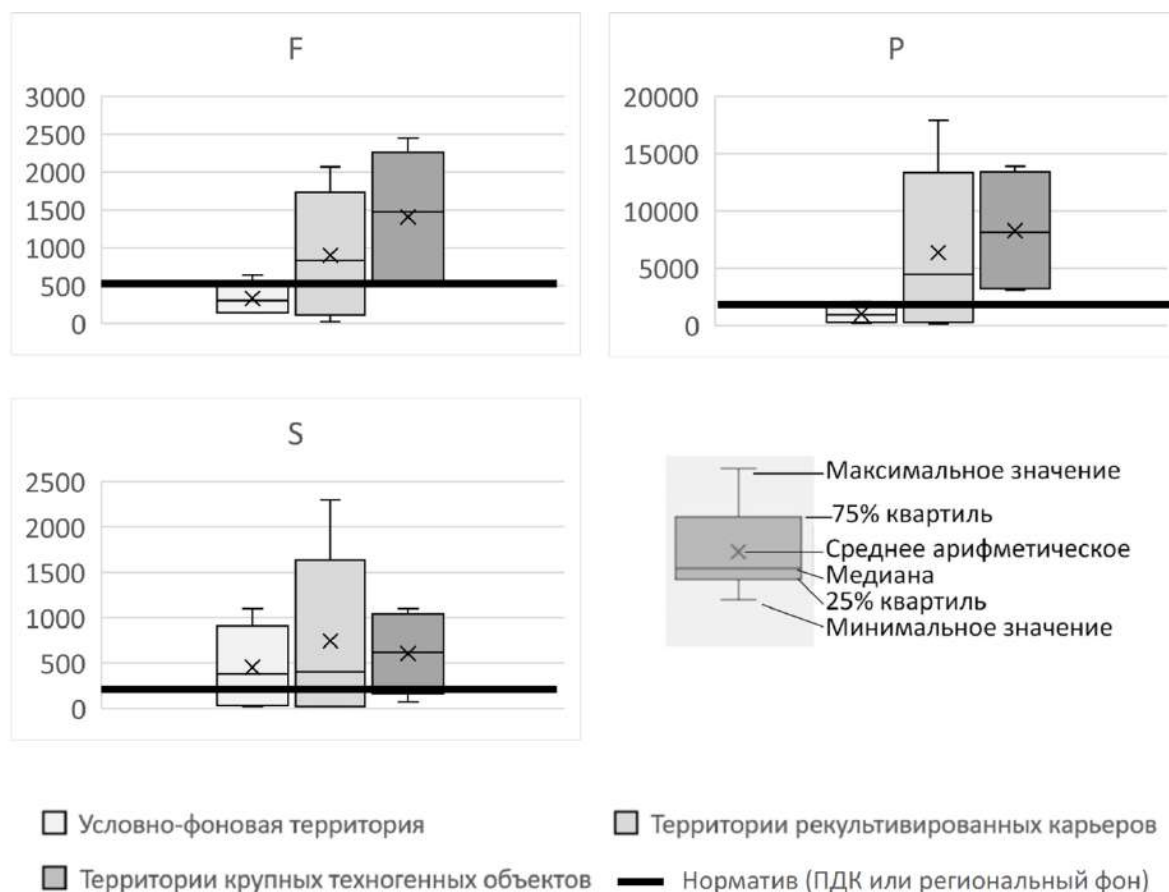


Рисунок 24. Содержание фтора, фосфора и серы (мг/кг) на условно-фоновой территории, на территории рекультивированных карьеров и на территории крупных техногенных объектов. Диаграмма показывает распределение данных по квартилям. Вертикальные линии указывают на отклонение за пределами верхнего и нижнего квартилей. Знаком × указано среднее значение, а горизонтальной линией — медиана

Сера очень активно накапливается в почвах всей исследованной территории, особенно на склонах отвала фосфогипса. На трех пробных площадях обнаружено шквальное содержание серы — 16900 мг/кг (условно-фоновая территория), 11500 мг/кг (рекультивированные отвала вскрышной породы) и 17800 мг/кг (отвал фосфогипса). Значения по содержанию серы в почвах в таблице 8 посчитаны без этих значений.

Среднее содержание серы увеличивается от условно-фоновой территории к отвалам фосфогипса и в среднем составляет 750 мг/кг, что почти в 5 превышает ПДК.

Коэффициенты концентрации (Кк) химических элементов в зоне воздействия предприятия «Фосфорит» представлены в таблице 9.

Таблица 9. Коэффициенты концентрации Кк валового содержания химических элементов в зоне воздействия предприятия Фосфорит

Территория / статистический показатель	Норматив	Коэффициенты концентрации элементов (указаны в скобках)
Вся территория (среднее)	Зональный фон подзолистых почв (по Ю.Саеу)*	Sb (1.1), Zn (1.2), Pb (1.8), F (4.1), P (5.8), Ba (10.6), Ca (19.8)
Техногенные объекты (отвал фосфогипса и хвостохранилище) (среднее)	Зональный фон подзолистых почв (по Ю.Саеу)*	V (1.03), Zn (1.2), Ni (1.2), Cu (1.4), Sb (1.5), Pb (1.7), F (7.3), Ba (8), P (11.6), Sr (12.9), Ca (38.6)
Техногенные объекты (отвал фосфогипса и хвостохранилище) (максимальное)	Зональный фон подзолистых почв (по Ю.Саеу)*	Mn (1.2), Cd (2.2), Pb (2.2), Zn (2.6), V (3.4), Cu (4.1), Ni (4.5), Sb (5.5), F (13.8), Ba (18), P (19.9), Sr (71), Ca (74)
Рекультивированные отвалы вскрышной породы (среднее)	Зональный фон подзолистых почв (по Ю.Саеу)*	Zn (1.1), Pb (1.7), F (4.0), P (6.4), Ba (10)
Условно-фоновая территория (среднее)	Зональный фон подзолистых почв (по Ю.Саеу)*	Zn (1.2), P (1.3), Pb (2.2), F (1.5), Ba (12)
Вся территория (медиана)	Содержание в почвах южной тайги Баренцрегиона (медиана)**	Mn (1.1), Cu (1.4), Sb (1.6), Ca (1.9), Ni (2.2), Co (2.5), P (2.6), V (4.2), Cr (5.1), Ba (6.3), Sr (6.3), Fe (6.6)
Вся территория (среднее)	ОДК/ПДК***	S (2.7)
Техногенные объекты (отвал фосфогипса и хвостохранилище) (среднее)	ОДК/ПДК***	S (3.9)
Техногенные объекты (отвал фосфогипса и хвостохранилище) (максимальное)	ОДК/ПДК***	V (1.5), Cu (1.9), Zn (1.9), Cd (3.1), Ni (5.3), S (6.8)
Рекультивированные отвалы вскрышной породы (максимальное)	ОДК/ПДК***	S (14.4)
Условно-фоновая территория (максимальное)	ОДК/ПДК***	S (6.9)

\* (Саеу и др., 1990).

\*\* (Salminen et al., 2004).

\*\*\* Постановления Главного государственного санитарного врача РФ от 28.01.2021 N 2 «Об утверждении санитарных правил и норм СанПиН 1.2.3685-21...»

Для расчета коэффициентов были использованы: зональный фон для подзолистых почв (по Ю.Е. Саету), содержание в почвах южной тайги Баренцрегиона (медиана), а также гигиенические нормативы.

Из 19 изученных элементов ПДК / ОДК есть для половины из них (10 элементов), зональный фон определен для 15 элементов, медиана содержания в почвах южной тайги Баренцрегиона имеется для 17 элементов. Таким образом, все изученные элементы имеют нормативное или фоновое значение для сравнения. Зональный фон для подзолистых почв и южно-таежных почв Баренцрегиона в большинстве случаев ниже гигиенических нормативов.

Значения  $K_k$  максимального содержания химических элементов в почвах крупных техногенных объектов, рассчитанные по ОДК / ПДК, показали, что гигиенические нормативы превышены: для ванадия — в 1,5 раза; для меди и цинка — в 2 раза; кадмия — в 3 раза; никеля — в 5 раз; серы — в 7 раз; подвижного фтора — в 3 раза.

Средние значения содержания элементов в почвах техногенных объектов превышают гигиенические нормативы только для серы. Коэффициенты концентрации средних и особенно максимальных содержаний элементов в почвах крупных техногенных объектов показывают, что значения зонального фона для большинства элементов значительно превышены. Для изученной территории в среднем фон превышен по цинку и никелю в 1,2 раза; по меди — в 1,4 раза; по сурьме — в 1,5 раза; свинцу — в 2 раза; фтору — в 7 раз; фосфору — в 12 раз; по бария — в 8 раз; стронцию — в 13 раз; кальцию — в 40 раз (таблица 9).

На условно-фоновой территории зональный фон превышен по цинку в 1,2 раза; по фосфору — в 1,3 раза; по фтору — в 1,5 раза; по свинцу — в 2,2 раза; по бария — в 12 раз. ПДК на условно-фоновой территории превышена по сере в 7 раз.

Коэффициенты концентрации медианы содержания элементов, рассчитанные по медиане содержания в почвах южной тайги Баренцрегиона, превышают единицу по 12 элементам, в том числе по меди и сурьме — в 1,5 раза; по кальцию и никелю — в 2 раза; по кобальту и фосфору — в 2,5 раза; по ванадию — в 4 раза; хром — в 5 раз; бария и стронцию — в 6 раз; железу — в 7 раз.

В целом, наблюдается превышение фона для большинства элементов (для 13 из 19 исследованных). Если сравнивать,  $K_k$ , рассчитанные по зональному фону (среднее) и южно-таежным почвам Баренцрегиона (медиана), совпадают по перечню элементов. Коэффициенты, рассчитанные по медиане ниже, более сглаженные. Коэффициенты, превышающие единицу, рассчитанные и по зональному фону (среднее) и по южно-

таежным почвам Баренцрегиона (медиана), отмечаются для бария, кальция, фосфора, фтора, стронция.

На рисунке 25 показано соотношение подвижных форм и валового содержания некоторых тяжелых металлов на исследованной территории. К актуальным задачам относится поиск закономерностей перехода ТМ из лабильного состояния в легкодоступные для растений и микроорганизмов формы (Неведров и др., 2018). Данный показатель позволяет оценить, в том числе, доступность микроэлементов для растений. Подвижность рассчитывается как отношения содержания подвижных форм к валовому содержанию и выражается в процентах.

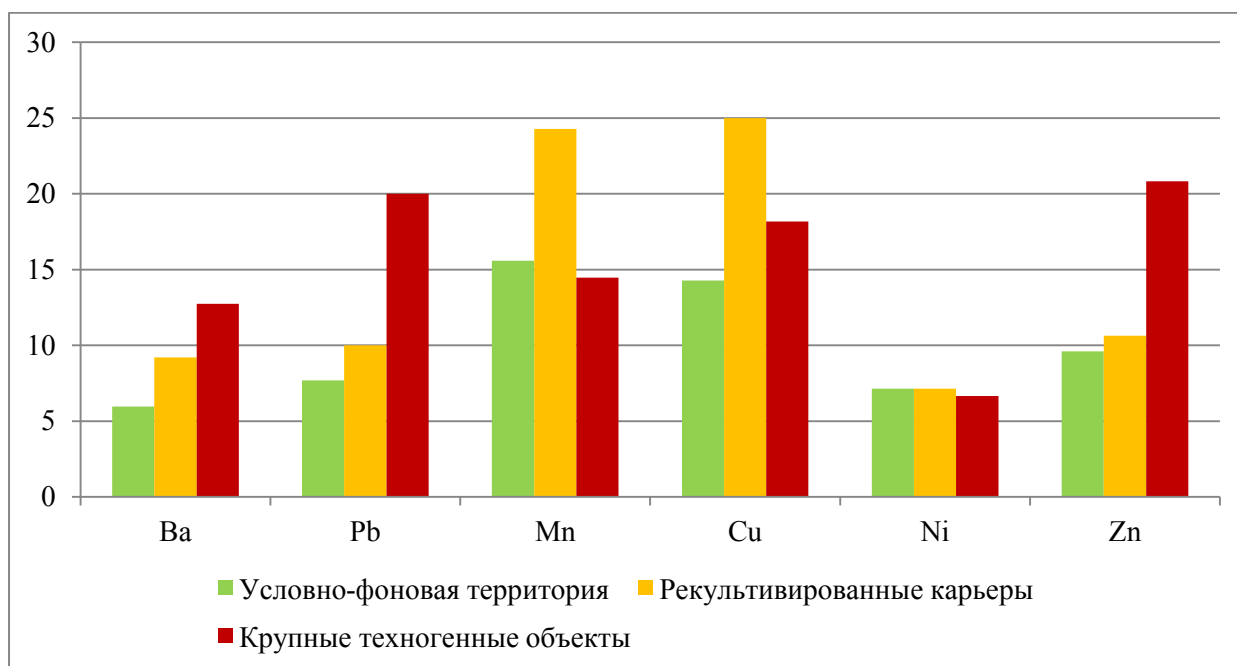


Рисунок 25. Подвижность тяжёлых металлов на территории исследования (%).

Процент подвижных форм возрастает с увеличением валовых содержаний. Малоподвижные (0–1 %) элементы отсутствуют, средняя подвижность (1–10 %) характерна для бария, свинца, никеля и цинк, повышенная (10–20 %) — для марганца и меди, высокоподвижные (более 20 %) элементы отсутствуют.

Для большинства элементов подвижность увеличивается с ростом степени антропогенной нарушенности объекта (барий, свинец, марганец, медь, цинк). Процент подвижных форм бария велик только на территории крупных техногенных объектов (13 %), на других территориях он не превышает 6–9 %. Процент подвижных форм свинца достаточно высок на крупных техногенных объектах. При содержании подвижных форм 3 мг/кг валовое содержание составляет 15 мг/кг. При этом на условно-фоновой территории валовое содержание свинца в среднем 26 мг/кг, а подвижных форм всего 2 мг/кг.

У марганца ситуация такова: относительное количество подвижных форм возрастает от условно-фоновой территории (16 %) к рекультивированным карьерам

(24 %), но снижается на крупных техногенных объектах (15 %). Медь отличается повышенной подвижностью на всей исследованной территории. Подвижные формы никеля на исследованной территории составляют 6–7 % от общего содержания, причем на крупных техногенных объектах подвижных форм чуть меньше. В почвах отвала фосфогипса и хвостохранилища относительное количество подвижных форм цинка — 21 %. На других территориях данный показатель не превышает 10–11 %. Таким образом, антропогенная деятельность по добыче фосфоритов увеличивает подвижность бария, марганца, свинца, меди и цинка.

В ходе диссертационного исследования также было проведено определение токсичности методом биотестирования для 60 почвенных проб. В качестве тест-объекта выступила дафния *Daphnia magna* Straus. Наибольшее количество погибших дафний зафиксированы в пробах под номерами 5 и 8. В этих образцах погибли все дафнии. Проба под номером 5 отобрана на отвале фосфогипса, в ней зафиксировано высокое валовое содержание стронция. Превышение над средним содержанием стронция на условно-фоновых территориях – в 31 раз, над зональным фоном для подзолистых почв – в 12 раз. Проба 8 отобрана на условно-фоновой территории в лесу. В ней также погибли все дафнии. В данной пробе зафиксированы превышения фоновых показателей по подвижным формам бария и железа. Для бария данное превышение незначительно – в 1,1 раз по сравнению с условно-фоновым участком. Содержания железа в отобранной пробе выше, чем на условно-фоновой территории в 1,4 раза. Если же сравнивать содержание подвижных форм железа в данной пробе с медианой содержания подвижных форм элементов в почвах южной тайги Баренцрегиона (Salminen et al., 2004), то здесь значение окажется выше в 16,1 раза.

Сложности в использовании выбранного метода биотестирования ещё зависят от кислотности почв. Возможно, именно более низкие показатели pH приводили к тому, что среда была более токсичной для дафний. Данный метод был взят в качестве экспериментального, и после проведения работ можно сделать вывод о том, что в регионах с естественной кислотностью почв менее 5,5 pH не стоит использовать биотестирование с тест-объектом *Daphnia magna*. На территории Кингисеппского месторождения фосфоритов кислотность почв составляет 6-7 ед. pH, что является комфортной средой для дафний, поэтому и в вытяжках почвенных проб месторождения была высокая выживаемость.

Воздействие производства фосфорных удобрений на территории Кингисеппского месторождения фосфоритов приводит к формированию положительных форм рельефа – отвалов, которые меняют потоки миграции химических элементов. Производственная

территория находится на речной террасе реки Луга, граничащей с долиной реки. Пойма реки располагается на высотах до 10 м от уровня моря. Основная часть условно-фоновой территории находится на высотах от 10 до 30 м, на местности (в пределах одного ПТК) рельеф субгоризонтальный или присутствует небольшой уклон (рисунок 26). На территории месторождения на Южном участке, вытянутом в широтном направлении, располагаются отвалы вскрышной породы, между которыми протянулись протоки антропогенного происхождения. Высота отвалов у подножия от 10 до 20 м, на вершине – от 20 до 30. Средняя высота отвала порядка 5-10 м. Самой высокой точкой на исследованной территории является вершина отвала фосфогипса (более 60 м над уровнем моря). Соответственно, антропогенная деятельность приводит к формированию расчленённых форм рельефа и перепаду высот до 30 м.

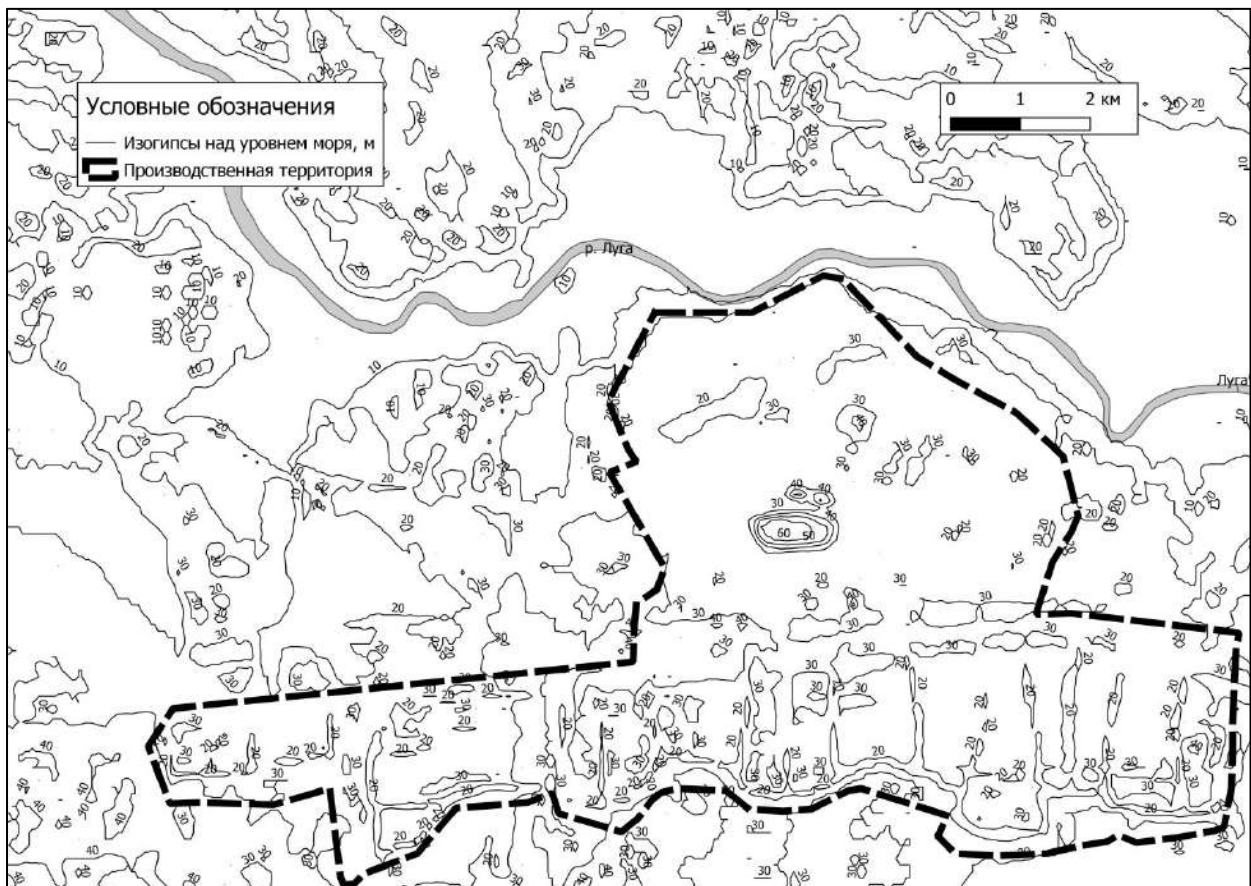


Рисунок 26. Рельеф исследованной территории (создан на основе цифровой модели рельефа SRTM).

Изменение рельефа территории обусловлено рядом техногенных процессов. Первый из них – это извлечение на дневную поверхность вскрышных пород, поскольку для добычи фосфоритов необходимо перемещать значительные объёмы «пустой» породы, преимущественно известняков и доломитов, которые складировуются либо на поверхности речной террасы, либо в выемках от добычи фосфоритовых руд. Соответственно, второй процесс – это образование выемок под карьеры, которые частично оказываются засыпаны



вскрышными породами, но частично остаются в виде антропогенных проток. Третий процесс – складирование отхода промышленности – фосфогипса.

#### **4.2 Индикаторы воздействия производства фосфорных удобрений почвы**

Для поиска индикаторов антропогенного воздействия производства фосфорных удобрений на почвы было решено сравнить между собой показатели состояния почвы на условно-фоновой территории и на объединённой территории рекультивированных отвалов вскрышных пород, отвала фосфогипса и хвостохранилищ для увеличения репрезентативности выборки, основанной на отобранных почвах вблизи антропогенных объектов. Данную объединённую территорию было решено назвать «производственная территория» или «территория Кингисеппского месторождения фосфоритов». Таким образом, будет сравнение почвенного покрова, непосредственно испытавшего антропогенное воздействие («территория месторождения»), и почвенного покрова, находящегося на расстоянии 4-9 км от основных источников воздействия («условно-фоновая территория»). Мерой центральной тенденции выступила медиана с указанием 25-го и 75-го квартилей, а не среднее значение. Исключение составляют только выборки по валовому содержанию свинца и железа. Они для обеих территорий (и для условно-фоновой, и для месторождения) соответствовали нормальному закону распределения. Следовательно, для этих элементов сравнение выборок и поиск различий осуществлялись по Т-критерию Стьюдента, и в качестве меры центральной тенденции выступало среднее арифметическое значение с указанием доверительного интервала, минимального и максимального значений.

##### *Изменение кислотности почв*

На рисунке 27 представлены значения актуальной кислотности почв на исследованной территории. Воздействие производства фосфорных удобрений на территории Кингисеппского месторождения фосфоритов в сравнении с условно-фоновой территорией приводит к повышению показателя рН на 2 ед. как при водной вытяжке (актуальной кислотности), так и при солевой (потенциальной кислотности). Кислотность измерена в 82 пробах: 29 проб с условно-фоновой территории и 53 пробы с территории месторождения. Поиск различий осуществлялся по U-критерию Манна-Уитни, распределение не соответствовало нормальному закону распределения. Медиана актуальной кислотности на условно-фоновой территории составила 5,3 ед. рН (25-й–75-й квартили: 4,6-5,6), а на территории месторождения – 7,2 ед. рН (25-й–75-й квартили: 6,9-7,6) (рисунок 27).

В исследовании А.Д. Жуковой (Жукова и др., 2016) актуальная кислотность на условно-фоновой территории составляла 6,5 ед. рН, а в районе воздействия 6,5-6,6 ед. Данное исследование было проведено в Московской области. Производство фосфорных удобрений в нём не повлияло на показатель рН. В настоящем исследовании разница кислотности условно-фоновой территории и территории месторождения составляла 2 ед. рН, из чего можно сделать вывод, что для таёжной зоны влияние производства фосфорных удобрений проявляется на кислотности более значительно, чем в регионах нашей страны, расположенных южнее.

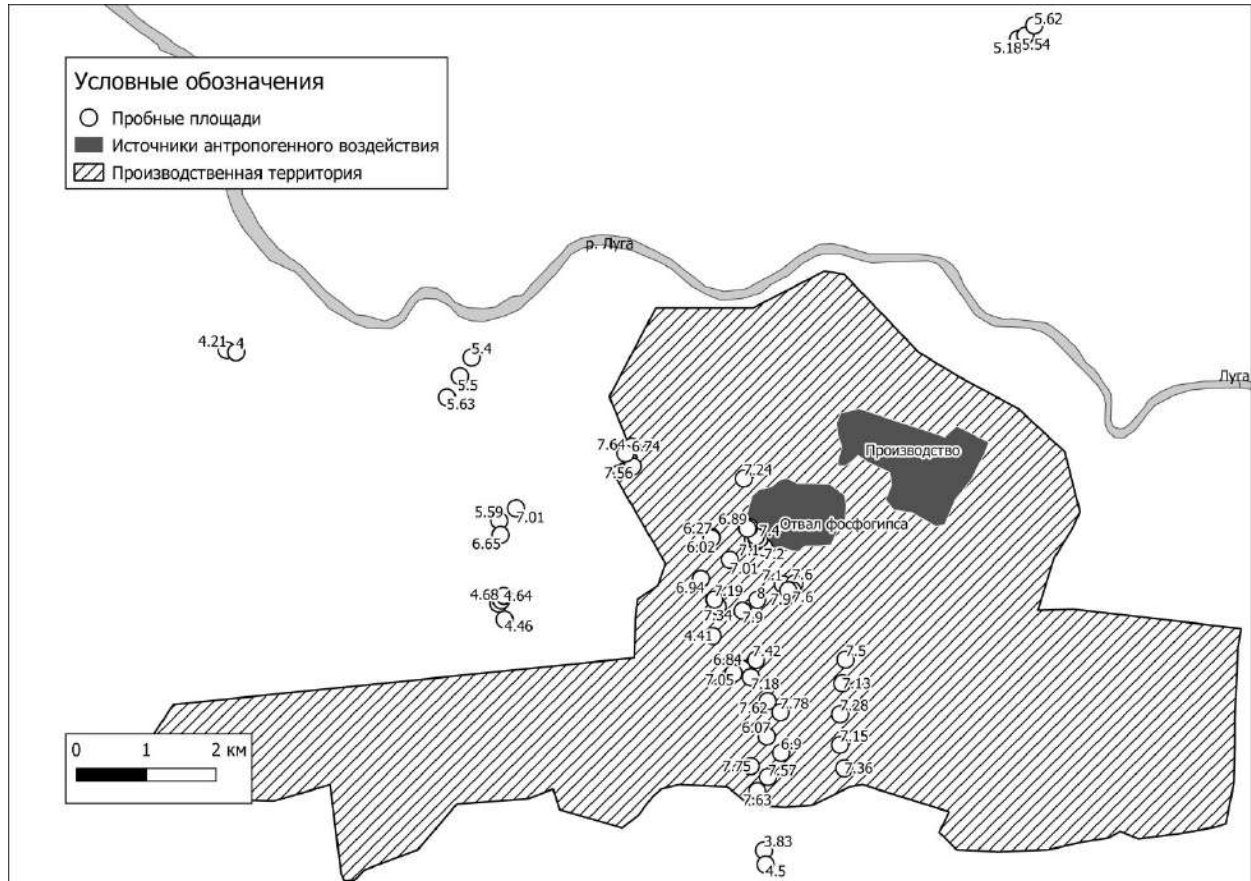


Рисунок 27. Значения актуальной кислотности почв на территории исследования (в ед. рН).

Медиана потенциальной кислотности на условно-фоновой территории составила 4,3 ед. рН (25-й–75-й квартили: 3,9-5,0), а на территории месторождения – 6,6 ед. рН (25-й–75-й квартили: 6,3-6,9). Переход почв из категории слабокислых в нейтральные означает то, что ряд растений, для которых неприемлема нейтральная реакция среды, может исчезнуть с территории месторождения.

В аналогичном исследовании (Жукова и др., 2016) в импактной зоне предприятия по производству фосфорных удобрений рН почв составлял от 5,6 до 7,3 ед. То есть, подкисления почв тоже не происходило, что согласуется с результатами, полученными в

настоящем исследовании. Скорее всего, причиной увеличения показателя рН является химический состав вскрышных пород – известняков и доломитов.

*Изменение содержания водорастворимых форм натрия и аммонийного азота*

Медиана содержания водорастворимых форм натрия на условно-фоновой территории составила 7700 мг/кг (25-й–75-й квартили: 2700-13600 мг/кг), а на территории месторождения – 41300 мг/кг (25-й–75-й квартили: 21400-77000 мг/кг). Почвы месторождения содержат водорастворимый натрий в избыточном количестве. Содержание натрия в фосфогипсе колеблется от 600 мг/кг до 6200 мг/кг (Tayibiet al., 2009), по другим данным (Saadaoui et al., 2017) до 47000 мг/кг, в фосфогипсе США может опускаться менее 300 мг/кг (Arocena et al., 1995). Медиана содержания водорастворимого натрия в кингисеппском фосфогипсе – 20400 мг/кг, что значительно превышает мировые показатели. Из этого можно сделать предположение, что натрий поступает на прилегающие ландшафты из фосфогипса. Однако медиана содержания натрия на территории месторождения более 40000 мг/кг. Следовательно, дополнительным источником натрия могут служить вскрышные породы и выбросы производства.

Медиана содержания водорастворимых форм аммонийного азота на условно-фоновой территории – 5 мг/кг (25-й–75-й квартили: 4-7 мг/кг), на территории месторождения – 13 мг/кг (25-й–75-й квартили: 5-25 мг/кг). К сожалению, в аналогичных работах по изучению воздействия производства фосфорных удобрений не было выявлено закономерности увеличения водорастворимых аммонийных форм азота в почве, поэтому полученные результаты в настоящий момент не с чем сравнить. Единственная информация, к которой можно апеллировать, относится к описанию воздействия от IFC (Руководство по охране..., 2013), где указано, что соединения азота могут поступать на прилегающие ландшафты при производстве суперфосфата – наиболее распространённого минерального фосфорного удобрения.

*Изменение содержания подвижных форм марганца и железа*

Статистически значимые различия при сравнении двух выборок – с территории месторождения и условно-фоновой территории – для подвижных форм тяжёлых металлов были найдены только для железа и марганца. Воздействие производства фосфорных удобрений на территории Кингисеппского месторождения фосфоритов в сравнении с условно-фоновой территорией приводит к увеличению подвижных форм марганца в 5-6 раз и уменьшению подвижных форм железа в 5-6 раз. Подвижные формы марганца и железа измерены в 79 пробах: 26 проб с условно-фоновой территории и 53 пробы с территории месторождения. Поиск различий осуществлялся по U-критерию Манна-Уитни, распределения не соответствовали нормальному закону распределения.

Медиана содержания подвижных форм марганца на условно-фоновой территории составила 25,5 мг/кг (25-й–75-й квартили: 13,5-42 мг/кг), а на территории месторождения – 120 мг/кг (25-й–75-й квартили: 43,5-208,5 мг/кг) (рисунок 28). Указанные величины подвижного марганца не являются токсичными для растительного покрова. Однако они могут использоваться для идентификации воздействия производства фосфорных удобрений, так как существует закономерность повышения содержания подвижных форм марганца в районах воздействия рассматриваемого производства.

Вероятным источником марганца являются вскрышные породы. В работе (Carbonell-Barrachina et al., 2002) приведены данные, что содержание подвижных форм марганца в отвале фосфогипса невелико – 4 мг/кг. В настоящем исследовании содержание подвижных форм марганца составляет 1,5 мг/кг.

Медиана содержания подвижных форм железа на условно-фоновой территории – 170 мг/кг (25-й–75-й квартили: 70-500 мг/кг), на территории месторождения – 20 мг/кг (25-й–75-й квартили: 10-60 мг/кг).

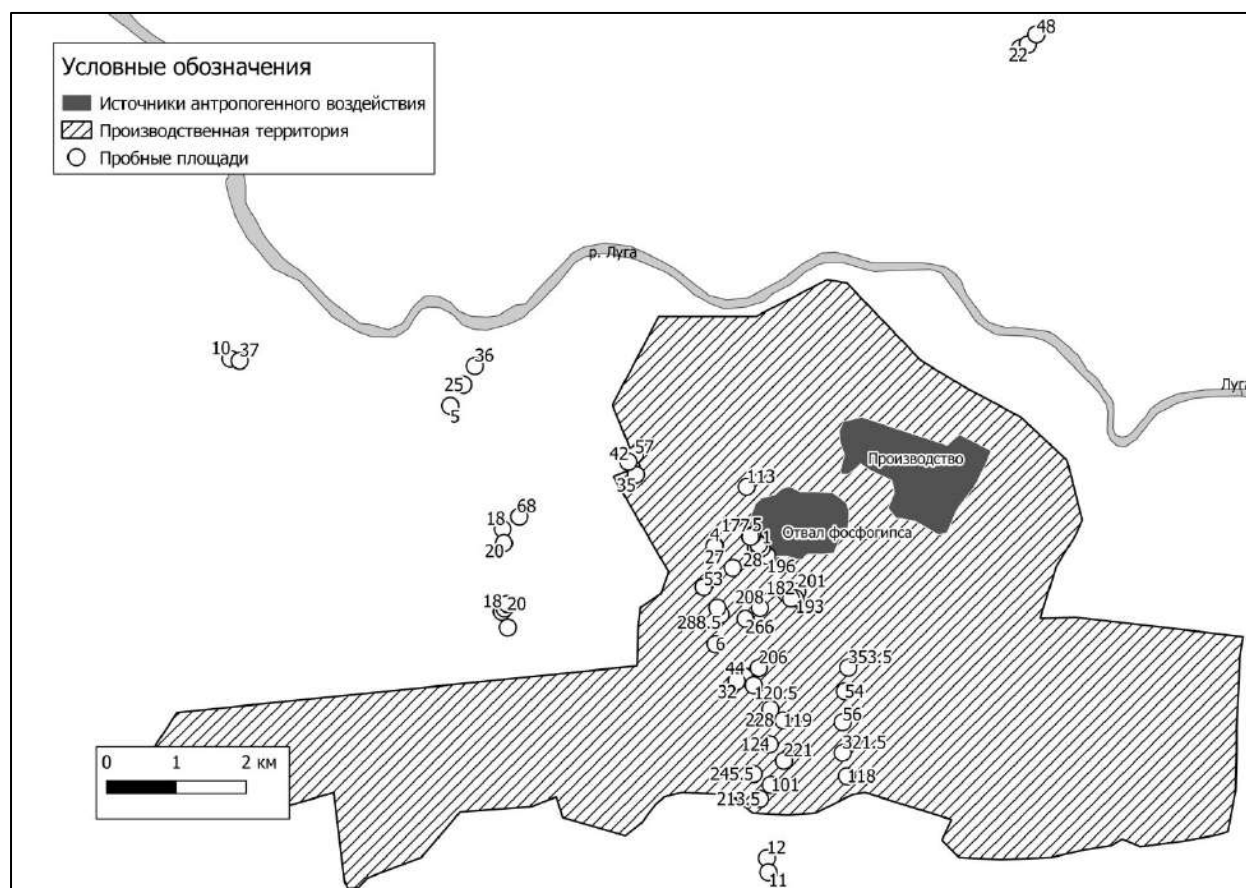


Рисунок 28. Содержание подвижных форм марганца в почвах на исследованной территории (в мг/кг).

Согласно монографии (Кабата-Пендиас и др., 1989), содержание подвижных форм железа менее 30 мг/кг является критическим пределом содержания железа в почве. Соответственно, можно предположить, что на территории месторождения наблюдается

дефицит доступных для растений форм железа (при избытии валового содержания). Недоступность для растений, скорее всего, обусловлена повышенным показателем pH в сравнении с условно-фоновой территорией, так как обычно окислительные и щелочные условия среды способствуют осаждению железа, а кислые и восстановительные – растворению его соединений. Свободное железо фиксируется в виде оксидов и гидроксидов, замещает магний и алюминий в других минералах и часто образует комплексы с органическими лигандами. Дефицит доступного железа может приводить к сбоям в работе физиологических процессов растений, что будет сказываться на росте и развитии отдельных особей.

Помимо реакции среды, при избытии доступного для растений марганца, как было описано выше, может наблюдаться снижение подвижных форм железа, так как широко известен антагонизм марганца и железа (Кабата-Пендиас и др., 1989). Помимо этого существует антагонизм железа и фосфора. Повышение показателя pH может способствовать тому, что железо переходит в формы, недоступные растениям. В исследовании (Carbonell-Barrachina и др., 2002) приведены данные о содержании подвижных форм железа в отвале фосфогипса – 11 мг/кг. В кингисеппском отвале содержится 5 мг/кг.

При этом в почвах условно-фоновых территорий значения содержания подвижного железа могут достигать нескольких сотен мг/кг. Максимальное значение составило 1040 мг/кг на условно-фоновом профиле в лесной экосистеме. Что показательно, в этой же почвенной пробе содержание подвижного марганца составило 4 мг/кг (косвенное подтверждение антагонизма этих двух элементов в лабильном состоянии). В болотных экосистемах содержание подвижного железа достигает 605 мг/кг. На отвале вскрышных пород максимальные значения приходятся на 135 мг/кг, а на отвале фосфогипса максимум равен 120 мг/кг.

#### *Изменение валового содержания железа, марганца, свинца и стронция*

Для валового содержания тяжёлых металлов статистически значимые различия между территорией месторождения и условно-фоновой территорией по U-критерию Манна-Уитни были обнаружены для железа, марганца, свинца и стронция.

Среднее содержание железа на условно-фоновой территории –  $16600 \pm 7800$  мг/кг (минимальное и максимальное значения: 5900-33900 мг/кг), на территории месторождения –  $23200 \pm 10700$  мг/кг (минимальное и максимальное значения: 500-49400 мг/кг). Валовое содержание железа на территории месторождения выше, чем на условно-фоновой территории, в отличие от содержания подвижных форм. Нейтральные условия среды способствуют закреплению железа в нерастворимых формах.

Содержание железа в отвале фосфогипса, согласно литературным данным (Tayibi и др., 2009), находится в пределах 200-6300 мг/кг, по другим данным (Saadaoui и др., 2017) – от 100 до 1750 мг/кг, в фосфогипсе США может достигать до 7000 мг/кг (Агосенаа и др., 1995). Медиана содержания кингисеппского фосфогипса – 1400 мг/кг, что согласуется данными других исследователей. Однако на территории месторождения наблюдается накопление валового содержания железа (23700 мг/кг). Следовательно, отвал фосфогипса не может являться источником данного элемента. Также нет данных о выбросах железа при производстве фосфорных удобрений.

Валовое содержание железа превышает региональный фон южной тайги Баренцева региона на условно-фоновой территории в 4 раза, а на территории месторождения в 6-7 раз. Данные превышения могут быть обусловлены низким региональным фоном. Но разница в содержании железа прослеживается не во всех аналогичных исследованиях. В Китае не было значимой разницы между содержанием железа на условно-фоновой территории и на промышленной территории производства фосфорных удобрений (Wang и др., 2019). Однако это, возможно, связано с неточностями при выборе условно-фоновой территории, поскольку содержание железа в описываемом исследовании было значительным (30000-40000 мг/кг). Или же причина повышенного содержания железа связана не с воздействием производства, а с составом вскрышных пород (как и в случае с марганцем).

Медиана содержания марганца на условно-фоновой территории – 180 мг/кг (25-й–75-й квартили: 160-230 мг/кг), на территории месторождения – 620 мг/кг (25-й–75-й квартили: 470-770 мг/кг). Повышенное содержание марганца, скорее всего, связано с составом горных пород, извлечённых на поверхность при разработке месторождения, так как наиболее высокие концентрации марганца характерны для основных пород (Кабата-Пендиас et al., 1989), коими и являются известняки и доломиты волховской и обуховской свит.

Исследователи (Tayibi et al., 2009) отмечают, что содержание марганца в фосфогипсовых отходах невелико: не превышает 15 мг/кг (вывод на основе изучения множества различных отвалов фосфогипса). Однако в кингисеппском отвале медиана содержания марганца – 45 мг/кг, что превышает мировые уровни содержания марганца, но в то же время значительно меньше содержания марганца в почвах месторождения. Вероятным источником марганца могут являться вскрышные породы (доломиты и известняки), которые при извлечении на поверхность и перемещении могли оказывать воздействие на прилегающие ландшафты. В Ливане при аналогичном производстве содержания марганца в почве прилегающих ландшафтов достигают 1200 мг/кг, причём в

Ливане производство тоже располагается на известняковых породах (Aoun et al., 2010), но не каждое производство фосфорных удобрений увеличивает содержание марганца в почвах (Wang et al., 2019). Содержание марганца на территории месторождения превышает зональный фон и содержание на условно-фоновой территории, что свидетельствует о накоплении марганца на территории месторождения.

Среднее содержание свинца на условно-фоновой территории –  $29 \pm 7$  мг/кг (минимальное и максимальное значения: 20-48 мг/кг), на территории месторождения –  $19 \pm 5$  мг/кг (минимальное и максимальное значения: 6-26 мг/кг). Содержание свинца, характерное для природных экосистем, в основном, обусловлено влиянием химического состава подстилающих пород. В современной практике охраны окружающей среды крайне распространены случаи загрязнения свинцом в урбанизированных и промышленных районах, поэтому значительная часть почвенного покрова содержит свинец в количествах, превышающих ОДК. Особенно, это относится к поверхностным горизонтам в районах крупных магистралей. В нашем же случае признаков загрязнения свинцом не наблюдается. Уменьшение валового содержания свинца на территории месторождения в сравнении с содержанием на условно-фоновой территории может быть обусловлено тем, что свинец содержится в известковистых горных породах в крайне малых количествах в сравнении с другими горными породами (Кабата-Пендиас и др., 1989). В Земной коре свинец накапливается в кислых сериях магматических пород и в глинистых осадках, в которых обычные концентрации свинца колеблются в пределах 10–40 мг/кг. В то же время в ультраосновных породах и известковистых осадках содержание свинца составляет 0,1–10 мг/кг. Ещё одной причиной, которая может приводить к иным концентрациям свинца может являться тип почв. В более глинистых почвах (например, в глеезёмах) среднее содержание свинца 67 мг/кг, а в песчаных (например, в подзолах) – всего 10-15 (Кабата-Пендиас и др., 1989).

В исследовании (Жукова и др., 2016) условно-фоновое содержание свинца составляло 4,7 мг/кг, а в импактной зоне производства фосфорных удобрений – 9,3-23,2 мг/кг. То есть, наблюдалось загрязнение территории свинцом. В настоящем исследовании закономерность обратная: среднее содержание свинца уменьшается с 29 мг/кг на условно-фоновой территории до 19 мг/кг на территории месторождения. Это может быть связано с основным источником поступления свинца на прилегающие ландшафты – отвалом фосфогипса, поскольку в кингисеппском отвале фосфогипса медиана содержания свинца приходится на 10 мг/кг. Эти данные согласуются с исследованием (Tayibi et al., 2009), где приводятся данные о содержании химических элементов в различных фосфогипсах. В фосфогипсе из Айдахо (США) содержание свинца

составляло 3-7 мг/кг, а в тунисском фосфогипсе – 5 мг/кг. В другом исследовании (Al-Hwaiti et al., 2015) даются аналогичные данные о том, что содержание свинца в почвах в районе воздействия производства фосфорных удобрений и в самом фосфогипсе не превышает 7 мг/кг.

Свинец в прилегающих ландшафтах к производству фосфорных удобрений связывают с технологическими выбросами при производстве фосфорной кислоты. Однако это происходит только при термическом процессе (одна из технологий) (Руководство по охране..., 2013). На территории Кингисеппского месторождения фосфоритов используют влажную технологию получения фосфорной кислоты (производство экстракционной фосфорной кислоты), поэтому выброса свинца не происходит.

На рисунке 29 приведено валовое содержание стронция в почвах на исследованной территории.

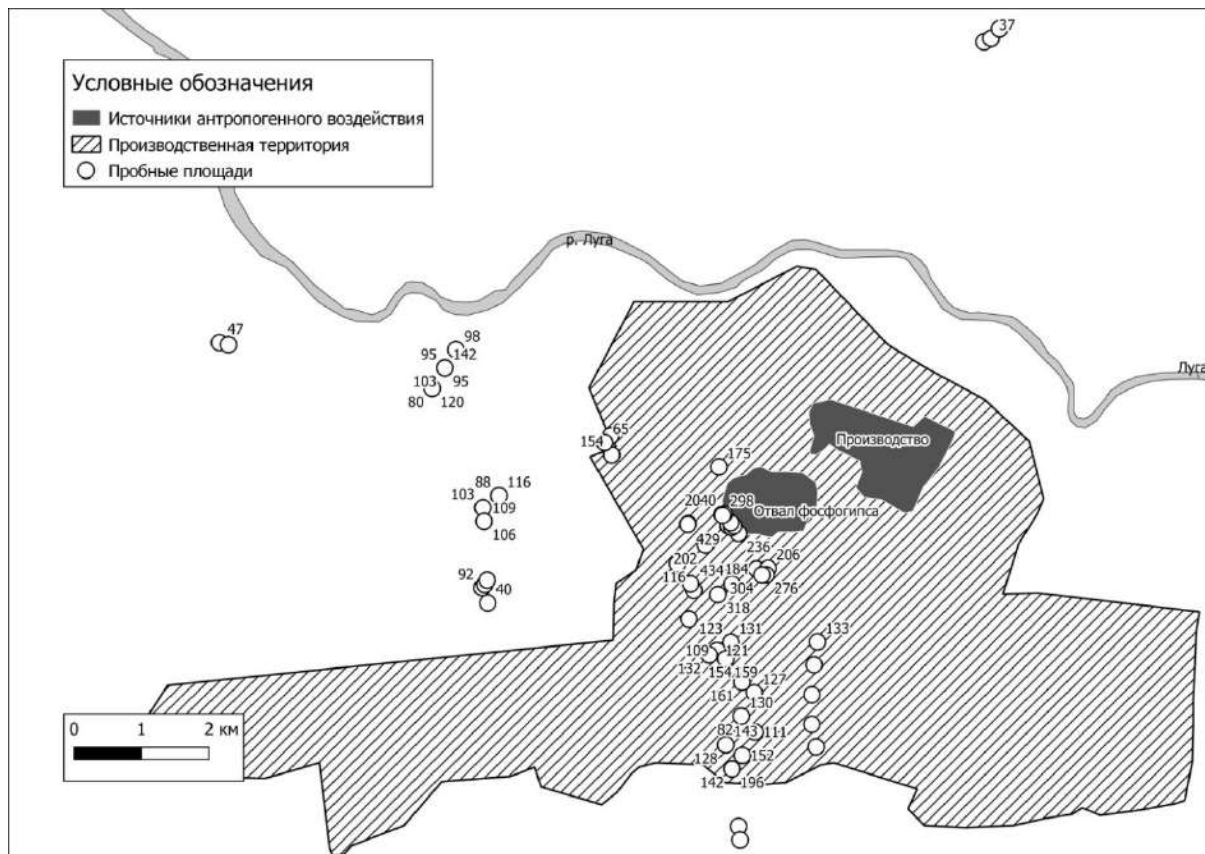


Рисунок 29. Валовое содержание стронция в почвах на исследованной территории (в мг/кг).

Медиана содержания стронция на условно-фоновой территории – 95 мг/кг (25-й–75-й квартили: 85-105 мг/кг), на территории месторождения – 155 мг/кг (25-й–75-й квартили: 130-275 мг/кг). Стоит отметить, что стронций – довольно распространенный микроэлемент в земной коре, он концентрируется преимущественно в магматических породах среднего состава и в карбонатных осадках, которые распространены на



территории месторождения (в виде доломитов и известняков волховской и обуховской свит). При этом среднее содержание стронция, согласно данным литературы (Кабата-Пендиас и др., 1989), в почвах таёжной зоны (подзолах) в среднем 118 мг/кг, а в почвах широколиственных лесов (серые лесные почвы) среднее содержание – 520 мг/кг. Геохимические и биохимические свойства стронция близки к свойствам кальция. Стронций легко мобилизуется при выветривании, особенно в кислой окислительной среде. Однако в нашем случае реакция среды почв месторождения близка к нейтральной, и в качестве показателя целесообразно рассматривать валовое содержание стронция.

На рисунке 30 дано распределение валового стронция на территории исследования.

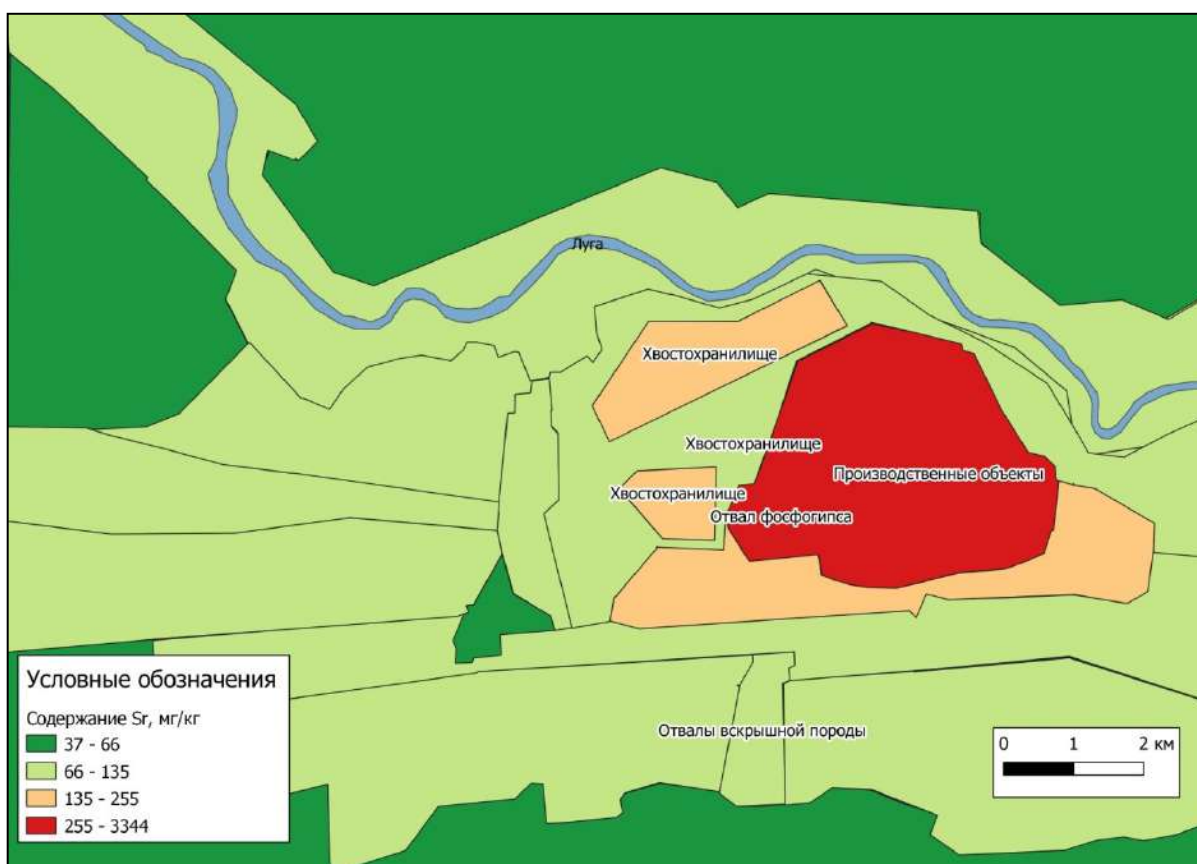


Рисунок 30. Схема распределения стронция в почвах на исследованной территории.

Повышенное содержание стронция в почвах месторождения в сравнении с содержанием на условно-фоновой территории не приводит к негативным последствиям для растительного покрова, поскольку нейтральная реакция среды и обилие кальция переводят стронций в недоступные для растений формы, однако данный показатель может использоваться для идентификации воздействия производства фосфорных удобрений.

Стронций – это элемент, постоянно сопутствующий производству фосфорных удобрений. В частности, стронций является одним из индикаторных элементов воздействия отвала фосфогипса на прилегающие ландшафты. Согласно данным литературы (Петренко и др., 2012), фосфогипс содержит от 2713 до 6500 мг/кг. В

фосфогипсе на Кингисеппском месторождении фосфоритов медиана содержания стронция приходится на 1970 мг/кг, что согласуется с литературными данными. Среднее валовое содержание стронция на трансектах до 10 км от отвала фосфогипса в исследовании Д.В. Петренко (Петренко и др., 2012) составляло 131 мг/кг, в настоящем исследовании медиана валового содержания на всех профилях на расстоянии до 8 км от отвала фосфогипса составляет 132 мг/кг, что полностью соответствует данным полученным в другом регионе, но при том же типе антропогенного воздействия. В этом же исследовании содержание подвижных форм стронция составляло 26 мг/кг, в настоящей диссертации – 10 мг/кг. Более низкая подвижность может быть связано с увеличением показателя рН. Стронций – это элемент в значительных количествах, содержащийся в отвале фосфогипса, и основные исследования по загрязнению стронцием прилегающих ландшафтов направлены именно на оценку воздействия от отвалов (Петренко, и др., 2012), поэтому логично будет предположить, что и на исследуемую территорию стронций поступает аэрогенным путём с отвалов фосфогипса.

Самое большое содержание стронция (более 250 мг/кг) наблюдается только на территории отвала фосфогипса и в нескольких десятках метров от отвала (Nedbaev, Elsukova, Chunyaeva, 2023). Также на хвостохранилищах и на ближайшем к производству скоплении отвалов вскрышных пород содержится 135-255 мг/кг стронция. На самых отдалённых условно-фоновых территориях содержание стронция менее 70 мг/кг. Стоит отметить, что, несмотря на увеличение содержания стронция на территории месторождения, медиана его содержания не превышает зональный фон (238 мг/кг).

На территории месторождения содержится стронция в 7 раз больше значений регионального фона, а на прилегающей территории – в 4 раза. При этом на самых отдалённых территориях коэффициент концентрации снижается до 2 и ниже. При этом стоит отметить, что увеличение содержания стронция характерно не для каждого производства фосфорных удобрений. Например, в почвах, прилегающих к аналогичному производству ландшафтов, в Китае увеличение содержания стронция было не более 10% в сравнении с условно-фоновой территорией (Wang et al., 2019).

#### *Изменение валового содержания фтора и фосфора*

Медиана содержания фтора на условно-фоновой территории – 240 мг/кг (25-й–75-й квартили: 190-350 мг/кг), на территории месторождения – 770 мг/кг (25-й–75-й квартили: 520-1210 мг/кг). На рисунке 31 дана схема распределения содержания фтора в почвах на исследованной территории.

Ситуация с фтором похожа на распределение стронция, только ещё более выражена: наибольшие концентрации приурочены к отвалу фосфогипса. На территории 2-

3 км от производства все территории содержат 400-1365 мг/кг фтора, что значительно больше, чем на условно-фоновой территории (Nedbaev, Elsukova, 2022). Самыми чистыми, в плане содержания фтора, оказались лесные экосистемы к западу от основного производства. Там содержание фтора не превышало 130 мг/кг.

Для известняков и основных пород не характерны столь значительные содержания фтора, которые мы встречаем в почвах на территории месторождения. Высокие содержания фтора в почве могут свидетельствовать о загрязнении территории месторождения фтором, что впоследствии может привести к флюорозу растений (Уразаев и др., 2000).

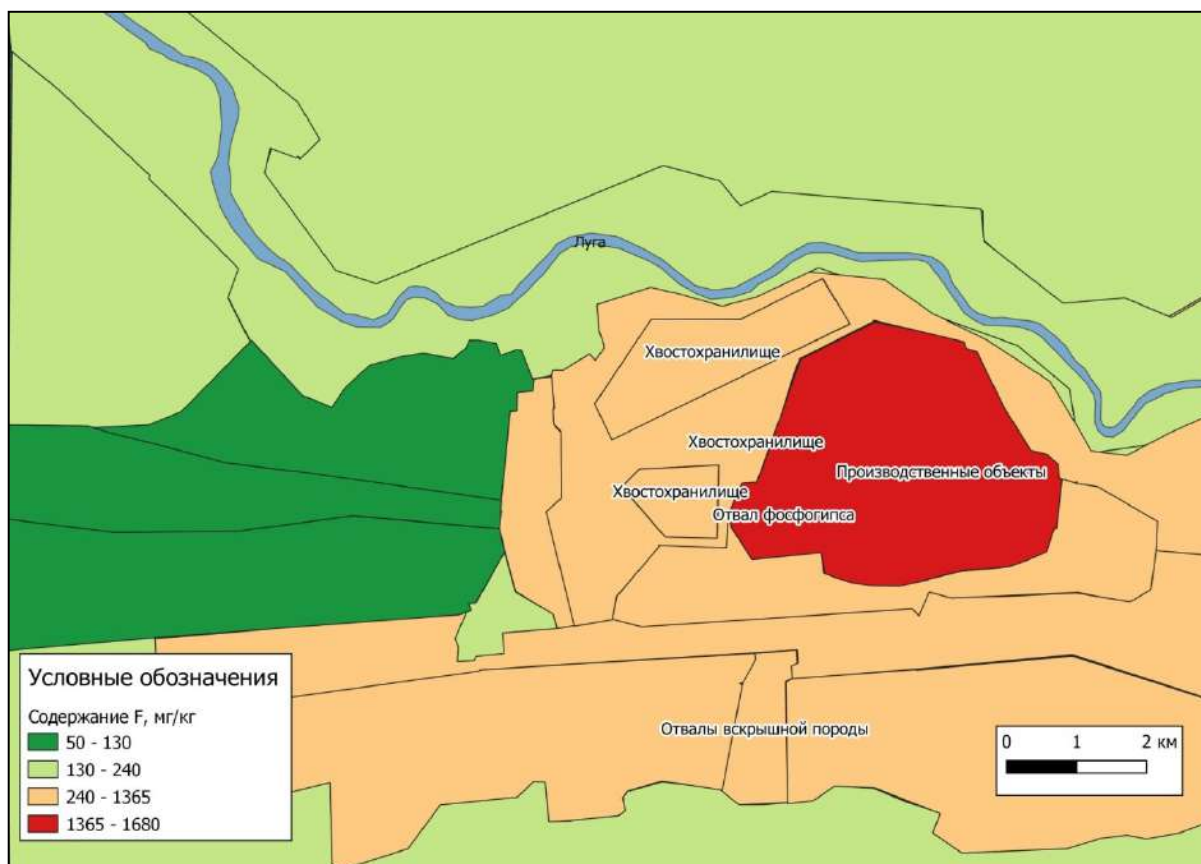


Рисунок 31. Схема распределения валового содержания фтора в почвах на исследованной территории.

Фтор может поступать на прилегающие ландшафты как при выбросах производства фосфорной кислоты и суперфосфата, так и при аэрогенном переносе материала отвала фосфогипса, поскольку, согласно работе (Tayibi et al., 2009), фосфогипс содержит 150-1200 мг/кг, по другим данным (Saadaoui et al., 2017) 1000-1800 мг/кг. Фосфогипс Кингисеппского месторождения фосфоритов содержит 1450 мг/кг фтора, что согласуется с полученными данными. Однако существуют объекты, где образуется фосфогипс с существенным содержанием фтора: до 17670 мг/кг (Arocena et al., 1995).

Медиана содержания фосфора на условно-фоновой территории – 1080 мг/кг (25-й–75-й квартили: 690-1290 мг/кг), на территории месторождения – 4140 мг/кг (25-й–75-й квартили: 2160-6290 мг/кг). На рисунке 32 приведена схема распределения фосфора в почвах на исследованной территории.

Распределение фосфора практически повторяет распределение фтора, что может свидетельствовать, что поступают они из одного источника (предположительно, антропогенного). На расстоянии до 3 км от производства все почвы содержат фосфора в количестве не менее 2500 мг/кг, что достаточно значительно в сравнении с условно-фоновыми территориями, в особенности, в лесными экосистемами к западу от производства.

Верхняя граница содержания фосфора в почвах не установлена, как и не определены достоверные изменения в растительном покрове, которые происходят при переизбытке валового фосфора. Однако увеличение содержания фосфора в несколько раз является индикатором рассматриваемого антропогенного воздействия.

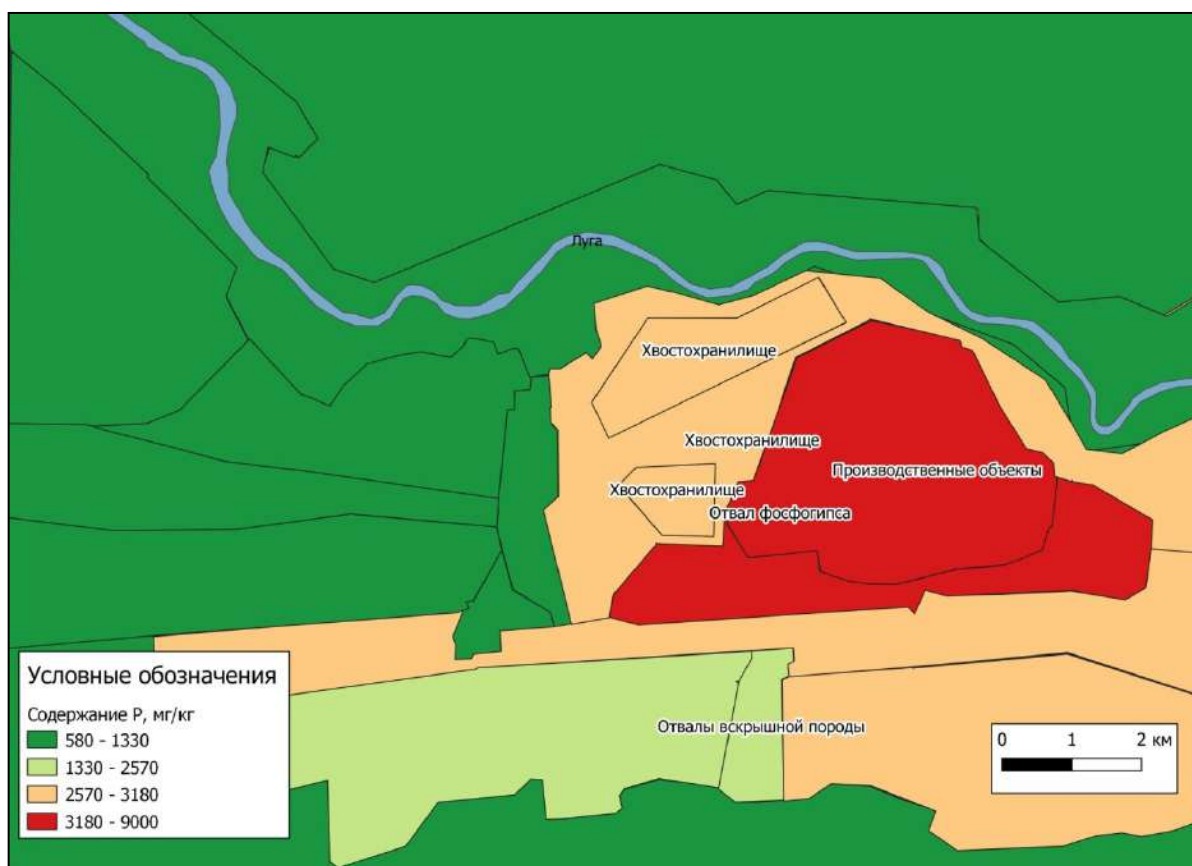


Рисунок 32. Схема распределения валового содержания фосфора в почвах на исследуемой территории.

Фосфор содержится в фосфогипсе в количествах: от 2060 мг/кг до 8000 мг/кг (Tayibi et al., 2009), в фосфогипсе Айдахо (США) содержится 2200 мг/кг фосфора (Arocena et al., 1995). В фосфогипсе Кингисеппского месторождения фосфоритов

медиана содержания фосфора приходится на 5000 мг/кг, что, во-первых, соответствует литературным данным, а во-вторых, возможно, является причиной увеличения содержания фосфора на территории месторождения до величин, указанных выше (4140 мг/кг). В обзоре (Saadaoui et al., 2017) говорится о том, что содержание фосфора в фосфогипсе варьирует в пределах 200-35200 мг/кг, поэтому проблема загрязнения почв фосфором от фосфогипса достаточно распространена.

Содержание фосфора на условно-фоновой территории близко к региональному фону (коэффициент концентрации равен 1,2), а на территории месторождения – в 4 раза превышает региональный фон. Фосфор не часто включают при исследованиях экологического состояния прилегающих ландшафтов, однако учитывать его при оценке воздействия производства фосфорных удобрений, по авторскому мнению, целесообразно. Превышение регионального фона в несколько раз может свидетельствовать о наличии воздействия.

#### *Изменение удельной активности радионуклидов*

В литературе встречаются данные о том, что воздействие производств фосфорной промышленности приводит к увеличению активности природных радионуклидов. Проведённое исследование показало, что на Кингисеппском месторождении фосфоритов не наблюдается повышения активности природных радионуклидов, даже наоборот – активность некоторых радионуклидов меньше, чем на условно-фоновой территории.

Воздействие производства фосфорных удобрений на территории Кингисеппского месторождения фосфоритов в сравнении с условно-фоновой территорией приводит к уменьшению активности радионуклида  $^{137}\text{Cs}$  на 75 % и  $^{40}\text{K}$  на 50 %. Удельная радиоактивность радионуклидов  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  и  $^{137}\text{Cs}$  определена для 3 объединённых проб: первая объединённая почвенная проба представляет собой собранную и перемешанную совокупность нескольких точечных проб с вершины и склонов отвала фосфогипса; вторая – с поверхности рекультивированных отвалов вскрышной породы; третья – с условно-фоновых территорий, расположенных на расстоянии 5-9 км от отвала фосфогипса. Поиск различий осуществлялся сравнением результатов лабораторных анализов между собой.

В документах нет определённого норматива активности радионуклидов в почве. Ближайшим аналогом для оценки мы можем использовать допустимую удельную эффективную радиоактивность строительных материалов (таких как песок и щебень), используемых в жилищном строительстве. Он составляет 370 Бк/кг. Все пробы имеют значение удельной эффективной активности менее этого значения (самое большое – 124 Бк/кг – на отвале фосфогипса). То есть, мы не можем говорить об опасности ни отвала

фосфогипса, ни почв, расположенных в зоне его влияния, в плане радиоактивного воздействия. Более того, стоит отметить, что в рассматриваемом районе ситуация наоборот – активность отдельных радионуклидов на территории месторождения ниже на 50-75%, чем на условно-фоновой территории. Активность  $^{40}\text{K}$  на месторождении составляет 320 Бк/кг, на условно-фоновой территории – 587 Бк/кг; активность  $^{137}\text{Cs}$  на месторождении – 22 Бк/кг, на условно-фоновой территории – 88 Бк/кг. Более высокая активность радионуклидов на условно-фоновой территории может быть обусловлена составом горных пород. В исследовании (Dueñas et al., 2007) подтверждается, что активность  $^{40}\text{K}$  у фосфогипса невысока (30-50 Бк/кг). При этом на территории рекультивированных отвалов активность максимальна (170-360 Бк/кг). Это можно объяснить добавлением почвенной массы при рекультивации (Недбаев, Елсукова, 2021), которая содержит более высокие значения активности  $^{40}\text{K}$ . Однако вариации активности  $^{40}\text{K}$  в фосфогипсе значительны: от 4 до 330 Бк/кг.

*Зависимость содержания химических элементов от гранулометрического состава почв*

В таблице 10 приведены средние содержания химических элементов в почвах разного гранулометрического состава на исследованной территории.

Таблица 10. Средние арифметические содержания химических элементов в почвах разного гранулометрического состава на исследованной территории (в мг/кг).

Химический элемент	Лёгкий гранулометрический состав (n = 23)	Тяжёлый гранулометрический состав (n = 20)
Ba	433	542
Ca	19249	10668
Co	5	6
Cr	39	30
Cu	15	12
F	1346	543
Fe	24633	22523
Mn	500	593
Ni	24	14
P	6700	3335
Pb	18	23
S	2310	986
Sb	0,5	0,3
Sc	6	7
Sr	412	143
V	53	49
Zn	43	51

На условно-фоновой территории преобладают почвы тяжёлого гранулометрического состава (от лёгкого суглинка до глин), а на месторождении – лёгкого гранулометрического состава (от песка до супесей). Из таблицы видно, что наиболее значительные отличия в содержании следующих химических элементов: фтора, стронция, серы и фосфора. Причём, в противоречие с классическими положениями почвоведения эти химические элементы накапливаются именно в почвах лёгкого гранулометрического состава, что может являться дополнительным свидетельством антропогенного воздействия, влияющего на геохимические особенности территории.

*Зависимость содержания химических элементов от типа почв*

Тип почвы характеризует специальный набор почвообразующих процессов, которые могут влиять на физико-химические характеристики почвы и, следовательно, на аккумуляцию тех или иных химических элементов. В таблице 11 даны средние содержания химических элементов и кислотность в разных почвах на исследованной территории (альфегумусовые, текстурно-дифференцируемые, глеевые, литозёмы, агрозёмы, торфяные и реплантозёмы).

Таблица 11. Средние арифметические содержания в разных почвах на исследованной территории.

Отдел почв	Альфегумусовые (n = 2)	Текстурно-дифференцируемые (n = 2)	Глеевые (n = 10)	Литозёмы (n = 3)	Агрозёмы (n = 1)	Торфяные (n = 1)	Реплантозёмы (n = 36)
Ba, мг/кг	174,40	620,00	517,22	<b>654,33</b>	337,00	197,00	503,29
Cd, мг/кг	0,27	0,17	0,26	0,24	0,08	<b>0,31</b>	0,19
Co, мг/кг	3,77	4,92	5,20	4,71	0,71	2,60	<b>6,27</b>
Cr, мг/кг	19,77	27,70	<b>34,97</b>	24,13	6,04	14,20	29,66
Cu, мг/кг	6,22	12,00	<b>14,31</b>	9,84	1,29	14,20	13,12
F, мг/кг	620,00	175,00	190,00	163,33	150,00	220,00	<b>946,29</b>
Fe, мг/кг	8500	16250	19111	15833	4500	7900	<b>24100</b>
Mn, мг/кг	167,25	201,75	221,67	269,50	117,00	85,50	<b>692,44</b>
Ni, мг/кг	7,42	11,60	13,81	9,46	1,53	9,10	<b>16,25</b>
P, мг/кг	3490,00	1110,00	977,78	813,33	980,00	1160,00	<b>5269,14</b>
Pb, мг/кг	<b>29,00</b>	23,00	28,67	28,00	15,00	28,00	19,00
S, мг/кг	309,50	<b>8462,50</b>	163,79	56,25	27,00	319,33	1705,84
Sb, мг/кг	0,31	0,28	0,35	0,22	0,10	<b>0,41</b>	0,37
Sc, мг/кг	3,03	6,82	<b>7,41</b>	7,39	2,52	4,28	6,22
Sr, мг/кг	97,00	118,50	92,11	106,00	65,00	47,00	<b>806,00</b>
V, мг/кг	43,19	38,40	48,61	33,47	8,60	23,90	<b>49,15</b>
Zn, мг/кг	19,60	<b>58,10</b>	44,67	46,70	8,24	13,20	48,95
pH вод	5,58	5,93	5,54	6,10	<b>7,64</b>	<b>4,34</b>	7,02
pH KCl	4,94	5,00	4,64	5,30	6,36	<b>3,59</b>	<b>6,48</b>

Из таблицы видно, что практически все исследованные элементы имеют сильную вариабельность в зависимости от типа почвы. Стоит отметить, что квазизёмы составляют

значительную площадь территории месторождения, и в квазизёмах наблюдаются максимальные концентрации кобальта, фтора, железа, марганца, никеля, фосфора и стронция, что согласуется с выявленным ранее предположением о влиянии производства фосфорных удобрений на содержание фтора, железа, марганца, фосфора и стронция. В торфяных почвах самая высокая кислотность, а также накапливается больше всего сурьмы. Больше всего бария в литозёмах. В текстурно-дифференцированных почвах (на луговых площадках) аккумулируется больше всего серы (в несколько раз больше, чем в других почвах). В глеевых почвах наблюдается накопление хрома, меди и скандия. Максимальное содержание свинца приходится на альфегумусовые почвы.

#### *Анализ корреляционных связей*

На рисунке 33 приведена схема корреляционных связей между валовым содержанием тяжёлых металлов, фтора, фосфора и рН.

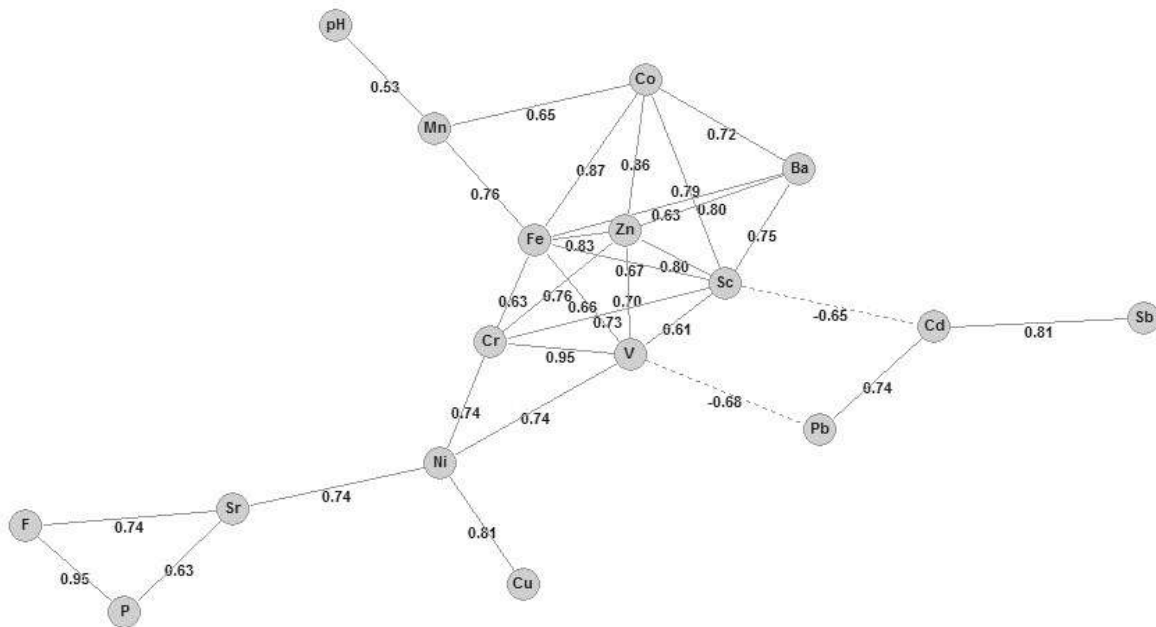


Рисунок 33. Схема корреляционных связей содержания химических элементов на исследованной территории.

Анализ схемы корреляционных связей между содержанием различных химических элементов и показателя рН позволяет выделить несколько групп показателей, которые согласуются с полученными ранее выводами. Во-первых, выделилась группа антропогенных элементов (стронций, фтор, фосфор), которые поступают на почвы от производства фосфорных удобрений. Данная группа через стронций связана с никелем и медью, которые тоже имеют тенденцию к накоплению в почвах месторождения, но не такую явную, как стронций, фтор и фосфор. Чуть выше была показана статистически достоверная разница в содержании этих элементов на территории месторождения и на



условно-фоновой территории, причём максимальные (порой и «шквальные») концентрации этих элементов приходились на территорию отвала фосфогипса.

Во-вторых, выделилась группа химических элементов, представляющая, видимо, ассоциацию элементов, содержащихся в горных породах территории: барий, кобальт, хром, железо, марганец, ванадий, цинк, так как для большей части этих элементов характерна, согласно геологической карте, геохимическая аномалия в районе города Кингисепп. Показатель рН коррелирует с марганцем, что подтверждает возможную ассоциацию примесей металлов в карбонатных породах. Также стоит отметить классическую таёжную зональную ассоциацию: кобальт, железо и марганец.

В-третьих, отделилась от всех остальных элементов ассоциация из трёх элементов: Cd, Pb, Sb. Как уже указывалось, кадмий и свинец могут накапливаться в почвах из-за воздействия производства фосфорных удобрений, однако в данном случае, видимо, источник данных элементов – иная антропогенная деятельность.

#### *Факторный анализ*

Был проведён факторный анализ 17 переменных (актуальная и потенциальная кислотности, валовое содержание Ba, Cd, Cu, F, Fe, Mn, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Sr, V, Zn) по 51 пробной площади. Оказалось, что 85% дисперсии определяют 4 фактора (таблица 12).

Таблица 12. Дисперсии и кумулятивные значения дисперсии по факторам.

Фактор	Дисперсия, %	Кумулятивное значение, %
<b>1</b>	<b>43,82968</b>	<b>43,82968</b>
<b>2</b>	<b>20,22439</b>	<b>64,05407</b>
<b>3</b>	<b>13,7168</b>	<b>77,77087</b>
<b>4</b>	<b>7,630393</b>	<b>85,40126</b>
5	5,69011	91,09137
6	3,803436	94,89481
7	1,914821	96,80963
8	1,516565	98,32619
9	0,723476	99,04967
10	0,436045	99,48571
11	0,207314	99,69303
12	0,184265	99,87729
13	0,10048	99,97777
14	0,021655	100

В таблице 13 приведена матрица факторов.

Таблица 13. Матрица факторов.

Показатель	Фактор			
	1	2	3	4
Ba	0,59	-0,65	-0,03	0,31
Co	0,82	-0,44	-0,11	0,00
Cr	0,80	-0,09	0,47	-0,26
Cu	0,33	0,31	0,73	0,03
F	0,54	0,74	-0,29	0,18
Fe	0,88	-0,25	-0,12	0,06
Mn	0,63	-0,16	-0,52	0,31
Ni	0,71	0,41	0,53	-0,02
P	0,58	0,65	-0,31	0,15
Pb	-0,67	-0,29	0,08	0,20
pH активная	0,69	0,08	-0,55	-0,22
pH обменная	0,70	0,21	-0,48	-0,15
S	0,15	-0,09	0,26	0,82
Sc	0,63	-0,68	0,21	-0,23
Sr	0,31	0,85	0,26	0,17
V	0,87	0,08	0,27	-0,26
Zn	0,84	-0,39	0,21	0,22

Выделенные 4 фактора, которые определяют распределение 85% выборки:

1. 44 %  $\frac{Fe_{88}V_{87}Zn_{84}Co_{82}Cr_{80}Ni_{71}pH_{акт70}pH_{обм69}Mn_{63}Sc_{63}Ba_{59}P_{58}F_{54}}{Pb_{67}}$
2. 20 %  $\frac{Sr_{85}F_{74}P_{65}}{Sc_{68}Ba_{65}}$
3. 14 %  $\frac{pH_{акт53}Mn_{52}}{Cu_{73}Ni_{53}}$
4. 7 %  $S_{82}$

Значимые положительные нагрузки на первый фактор (дисперсия 44 %) имеют 13 показателей (актуальная и потенциальная кислотности, валовое содержание Ba, Cd, F, Fe, Mn, Ni, P, Sb, Sc, V, Zn) из 17 взятых для анализа, отрицательную нагрузку имеет свинец, а медь, стронций и сера не имеют значимых нагрузок. Это фактор влияния химического состава подстилающих пород на почвы.

Одну пятую часть общей дисперсии (20 %) занимает второй фактор, который с учётом всех предыдущих выводов можно назвать влиянием производства фосфорных удобрений по почве, так как при воздействии этого фактора увеличивается содержание

трёх ключевых элементов, выделенных в настоящей работе при изучении этого воздействия, – стронция, фтора и фосфора. Обратную корреляцию к этому фактору имеют барий и скандий. Стронций может заменять кальций и барий в химических соединениях, так как это элементы 2-й группы периодической таблицы Д.И. Менделеева, а соответственно они имеют схожие химические и физические свойства. Отрицательная корреляция антропогенного фактора со скандием, возможно, связана с тем, что значительная часть месторождения находится на карбонатных породах и песчаниках, а содержание скандия в известняках и песчаниках низки (Кабата-Пендиас и др., 1989).

Вес третьего фактора составляет 14 %, и, возможно, данный фактор является влиянием химического состава не всех горных пород, а именно известняков и доломитов, слагающих отвалы вскрышных пород, так как именно на отвалах наблюдается наиболее высокий показатель рН и наиболее высокие концентрации марганца. Причём, связка высокий рН и высокое содержание марганца характерно и для других регионов, где разрабатывают месторождения под карбонатными породами.

Четвёртый фактор представлен только серой (остальные показатели незначимы) и занимает 7 % дисперсии. Вероятно, это проявление поступления аэрогенным путём частиц фосфогипса на прилегающие территории, так как, с одной стороны, сера входит в состав фосфогипса (сульфид кальция), а с другой стороны, вся исследованная территория, прилегающая к производству, богата серой. И, как отмечалось в аналогичных работах, радиус влияния серы на почвы при производстве фосфорных удобрений может быть больше 9 км, взятых для максимального удаления и размещения там пробных условно-фоновых площадей.

#### **Выводы к главе 4**

Почвенный покров Кингисеппского месторождения фосфоритов значительно изменён в ходе хозяйственной деятельности человека. Естественные типы почв сменились техногенными поверхностными образованиями. Перемещение литогенного материала и размещение крупнотоннажных отходов привело к изменению рельефа и формированию перепадов высот до нескольких десятков метров. Отвалы вскрышных пород подвергаются рекультивации с нанесением грунта и последующим биологическим этапом, завершающимся посадкой лесных культур.

Согласно проведённым исследованиям, на территории месторождения действуют два основных процесса, меняющих естественную геохимическую обстановку: поступление загрязняющих веществ посредством выбросов при производстве фосфорной

кислоты и фосфорных удобрений и аэрогенный перенос частиц фосфогипса на прилегающие ландшафты.

Из всех исследованных химических элементов стронций, фтор и фосфор статистически достоверно накапливаются на территории месторождения, и их поступление можно объяснить деятельностью предприятия по производству фосфорных удобрений. Выбросы при производстве фосфорной кислоты и фосфорных удобрений приводят к увеличению валового содержания фтора в почвенном покрове месторождения. Содержание фтора увеличивается в 3 раза в сравнении с условно-фоновой территорией. От отвала фосфогипса на прилегающие территории поступает стронций и фосфор. Содержание стронция отличается от условно-фоновой территории в 1,6 раз, а фосфора – в 4 раза в сторону увеличения.

По степени антропогенного воздействия выделено три типа территорий — условно-фоновые (лесные и болотные экосистемы), рекультивированные отвалы вскрышных пород, а также крупные техногенные объекты – отвалы фосфогипса и хвостохранилище. Установлено, что на условно-фоновой территории встречаются превышения ПДК по меди, марганцу, никелю и цинку. На рекультивированных отвалах вскрышных пород есть превышения ПДК по марганцу, меди, цинку и свинцу. В почвах на отвале фосфогипса и хвостохранилище зафиксированы превышения ПДК по марганцу, меди, свинцу, никелю, хрому и цинку.

Низким варьированием (коэффициент вариации меньше 30 %) характеризуются барий и свинец; средним (коэффициент вариации 30–60 %) — кобальт, хром, железо, марганец, скандий, цинк; высоким (коэффициент вариации 60–100 %) — медь, никель, сурьма, ванадий; аномально высоким (коэффициент вариации больше 100 %) — кадмий и стронций. Установлено, что максимальное содержание валовых форм бария, кадмия, меди, никеля, сурьмы, стронция, ванадия, цинка характерно для почв, отобранных на отвале фосфогипса и хвостохранилище. В почвах техногенных объектов наблюдается также снижение количества органического вещества. Кобальт, марганец, свинец, скандий равномерно распространены по территории исследования.

Одним из наиболее значимых индикаторов производства фосфорных удобрений на исследуемой территории является коэффициент концентрации химических элементов, рассчитанный на основе регионального фона Баренцева региона для почв южной тайги. Например, коэффициент концентрации валового содержания фосфора на территории месторождения и на условно-фоновой территории различается в 6 раз, коэффициент концентрации стронция – в 3 раза.

Процент подвижных форм возрастает с увеличением валовых содержаний. Малоподвижные (0–1 %) элементы отсутствуют, средняя подвижность (1–10 %) характерна для бария, свинца, никеля и цинк, повышенная (10–20 %) — для марганца и меди, высокоподвижные (более 20 %) элементы отсутствуют. Открытым остается вопрос о разработке экологических нормативов и установлении фоновых концентраций для разных регионов Российской Федерации.

В квазизёмах накапливаются больше чем в других почвах кобальт, фтор, железо, марганец, фосфор и стронций, в торфяных почвах – сурьма, в литозёмах – барий, в текстурно-дифференцированных почвах – сера, в глеезёмах – хром, медь и скандий, а в альфегумусовых – свинец.

Вероятно, вскрышные породы, выполняющие на территории месторождения роль подстилающих пород, приводят (в сравнении с условно-фоновой территорией) к увеличению показателя рН на 2 ед., увеличению валового содержания железа (на 40 %) и марганца (в 1,5 раза) и уменьшению подвижных форм железа (в 5 раз).

Химический состав почв на исследованной территории определяют четыре фактора – породный фактор (44 %), производство фосфорных удобрений (20 %), влияние вскрышных пород (14 %), поступление серы от отвала фосфогипса (7 %).

**Защищаемое положение.** Воздействие производства фосфорных удобрений на почвы и растительность выражается в механическом нарушении компонентов природной среды, изменении рельефа, поступлении загрязняющих веществ посредством выбросов в атмосферу и аэрогенного переноса частиц отвала фосфогипса. Индикаторами воздействия являются увеличение валового содержания стронция в 1,5 раза, фтора в 3 раза и фосфора в 4 раза в почвах сравнении с условно-фоновой территорией.

**Защищаемое положение.** Почвы и ТПО Кингисеппского месторождения фосфоритов характеризуются нейтральной реакцией среды, превышением ОДК по сере, зонального фона по фтору и фосфору, регионального фона почв южной тайги Баренцева региона по барии, кобальту, хрому, меди, железу, марганцу, никелю, свинцу, сурьме, стронцию и ванадию. Встречаются превышения ПДК в почве по марганцу, меди, свинцу, никелю, хрому и цинку. Химический состав почв на исследованной территории определяют четыре фактора – породный фактор (44 %), производство фосфорных удобрений (20 %), влияние вскрышных пород (14 %), поступление серы от отвала фосфогипса (7 %).

## Глава 5. Геоэкологическая оценка воздействия производств фосфорных удобрений на растительность

В настоящей главе содержится два раздела: первый посвящён анализу количественных характеристик геоботанических описаний с целью выявления различий между территорией месторождения и условно-фоновой территорией; во втором разделе приведены результаты анализа геоботанических описаний методом корреляционных плеяд. Общее описание растительности на исследованной территории в разрезе различных типов антропогенных и природных объектов дано в подразделе 2.5. Краткая характеристика растительности приведена в таблице 14.

Таблица 14. Краткая характеристика растительности на исследованной территории.

	Тип природного или антропогенного объекта	Особенности	Основные доминантные виды
Условно-фоновая территория	Лесные экосистемы	В основном, еловые и берёзовые леса на речной террасе реки Луга с обилием влаголюбивых видов в травяно-кустарничковом ярусе	<i>Alnus incana</i> (L.) Moench <i>Betula pubescens</i> Ehrh. <i>Calamagrostis</i> sp. <i>Equisetum sylvaticum</i> L. <i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim. <i>Oxalis acetosella</i> L. <i>Picea abies</i> (L.) H.Karst. <i>Vaccinium myrtillus</i> L.
	Болотные экосистемы	Встречаются как старые олиготрофные болота, так и переходные.	<i>Betula nana</i> L. <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud. <i>Pinus sylvestris</i> L. <i>Salix</i> sp. <i>Sphagnum</i> sp.
	Луговые экосистемы	Преимущественно фермерские земли предназначенные для выпаса крупного рогатого скота.	<i>Aegopodium podagraria</i> L. <i>Calamagrostis</i> sp. <i>Dactylis glomerata</i> L. <i>Milium effusum</i> L. <i>Sonchus arvensis</i> L.
Территория месторождения	Отвал фосфогипса	Фитоценозы сформированы частично рекультивацией, частично самозарастанием.	<i>Artemisia vulgaris</i> L. <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop. <i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P.Beauv. <i>Populus tremula</i> L.
	Хвостохранилища	Фитоценозы сформированы частично рекультивацией, частично самозарастанием.	<i>Aegopodium podagraria</i> L. <i>Alnus incana</i> (L.) Moench <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop. <i>Salix</i> sp. <i>Urtica dioica</i> L.
	Отвалы вскрышных пород	Фитоценозы сформированы рекультивацией и до сих пор формируются.	<i>Aegopodium podagraria</i> L. <i>Betula pubescens</i> Ehrh. <i>Calamagrostis</i> sp. <i>Picea abies</i> (L.) H.Karst. <i>Tussilago farfara</i> L.

### 5.1 Анализ количественных характеристик геоботанических описаний

Производственная деятельность на территории Кингисеппского месторождения фосфоритов приводит к замене природных ландшафтов на антропогенно-природные, сформированные путём рекультивации на техногенных объектах (отвалах) и рядом с ними. Как следствие, формируются новые посттехногенные экосистемы. Отличие количественных характеристик сообществ на отвалах вскрышных пород и сообществ на условно-фоновых территориях обусловлено их различным генезисом. Имеют статистически достоверные различия, в частности, возраст ели европейской *Picea abies* (L.) H.Karst, обилие по Друде вейника *Calamagrostis sp.*, подъярусы вероники дубравной *Veronica chamaedrys* L. и хвоща лесного *Equisetum sylvaticum* L. (таблица 15). Все остальные количественные характеристики геоботанических описаний не имеют статистически достоверных различий или не удовлетворяют ограничениям использования критериев поиска различий (например, слишком малая выборка). Поиск различий осуществлялся по U-критерию Манна-Уитни.

Таблица 15. Статистические значимые различия количественных показателей геоботанических описаний при сравнении условно-фоновой и производственной территории.

Показатель	Числитель – медиана на условно-фоновой территории; знаменатель – 25-ый и 75-ый квартили	Числитель – медиана на территории месторождения; знаменатель – 25-ый и 75-ый квартили	Количество описаний на условно-фоновой территории, имеющих рассматриваемый показатель, шт.	Количество описаний на территории месторождения, имеющих рассматриваемый показатель, шт.
Возраст ели европейской <i>Picea abies</i> , лет	$\frac{60}{30-80}$	$\frac{40}{30-40}$	9	13
Представленность в подросте осины <i>Populus tremula</i> , доля от 10	$\frac{5}{2-5}$	$\frac{2}{1-3}$	7	12
Обилие по Друде вейника <i>Calamagrostis sp.</i>	$\frac{\text{cop } 2}{\text{cop } 1 - \text{cop } 2}$	$\frac{\text{cop } 1}{\text{sp} - \text{cop } 1}$	9	22
Подъярус вероники дубравной <i>Veronica chamaedrys</i>	$\frac{2}{2-2}$	$\frac{1}{1-1}$	4	6
Подъярус хвоща лесного <i>Equisetum sylvaticum</i>	$\frac{2}{2-2}$	$\frac{3}{3-3}$	5	4



*Различия в возрасте ели европейской Picea abies*

Статистически достоверно различается возраст ели европейской *Picea abies* в составе древостоя. На условно-фоновой территории медиана возраста составляет 60 лет (25-ый квартиль – 30 лет, 75-ый квартиль – 80 лет), а на территории месторождения – 40 лет (25-ый квартиль – 30 лет, 75-ый квартиль – 40 лет). Это связано с тем, что растительный покров формировался на отвалах искусственно путём рекультивации. Первые рекультивационные работы были проведены в 80-е гг. XX века (Кушнир, и др., 2021). На условно-фоновой территории ель в составе древостоя встречалась на 9 пробных площадях, а на территории месторождения – на 13 пробных площадях. Формирование молодых экосистем на отвалах не позволяет в полной мере сравнивать ПТК для поиска индикаторов химического воздействия производства фосфорных удобрений. Однако параллельная с формированием отвалов рекультивация позволяет исследователям изучить разновозрастные экосистемы на отвалах, начиная от участков, где был произведён только посев многолетних трав, до 40-летних еловых насаждений. Автором было выделено пять этапов формирования сообщества на отвале вскрышных пород. Результаты этого исследования изложены в публикации:

Forest recultivation of overburden dumps of the Kingisepp phosphorite field / I. S. Nedbaev, E. Yu. Elsukova, E. A. Kushnir, E. I. Treschevskaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 09–10 сентября 2021 года. – Voronezh, 2021. – P. 12029. – DOI 10.1088/1755-1315/875/1/012029. – EDN NVITDD.

Приведём описание этапов формирования растительного покрова на отвалах вскрышных пород Кингисеппского месторождения фосфоритов. В качестве модельного объекта был взят один отвал вскрышной породы и на нём заложено пять пробных площадей в разновозрастных пострекультивационных экосистемах (рисунок 34).

Первая пробная площадь, на которой расположены самые старые ельники возрастом около 40 лет, находится на вершине отвала вскрышных пород. В древесном ярусе преобладает ель европейская *Picea abies*, встречаются единичные экземпляры сосны обыкновенной *Pinus sylvestris*, берёзы пушистой *Betula pubescens* и ивы *Salix sp.* Эстетическая ценность имеет высший балл – 5. Сомкнутость древесного яруса на данной площади наибольшая из исследованных на данном отвале и составляет 0,7. Высота елей составляет порядка 15 м, высота сосен – 17 м, высота берёз – 20 м, высота ив – 8 м. Диаметр ели европейской на данной площадке равен 25 см, сосны обыкновенной – 22 см, берёзы пушистой – 28 см, ивы – 12 см. Подрост на данной пробной площади не выражен, почти отсутствует. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 40 %, что обусловлено формированием «мёртвого» покрова под старыми елями. Хочется

отметить присутствие на площади иван-чая узколистного *Chamaenerion angustifolium*, который не встречается или почти не встречается на территориях с начальными стадиями или с отсутствием рекультивации. Также в пределах ПТК встречается сивец луговой *Succisa pratensis*, который находится не во всех описаниях на данном отвале вскрышных пород. Обильно встречается мать-и-мачеха *Tussilago farfara* – представитель рудеральной растительности. Данное обстоятельство говорит о том, что, несмотря на рекультивацию, травяно-кустарничковый ярус еловых лесов не будет близок к зональным лесам, и это уже новая сформировавшаяся антропогенно-природная система. Мохово-лишайниковый ярус: 90% зелёные мхи.

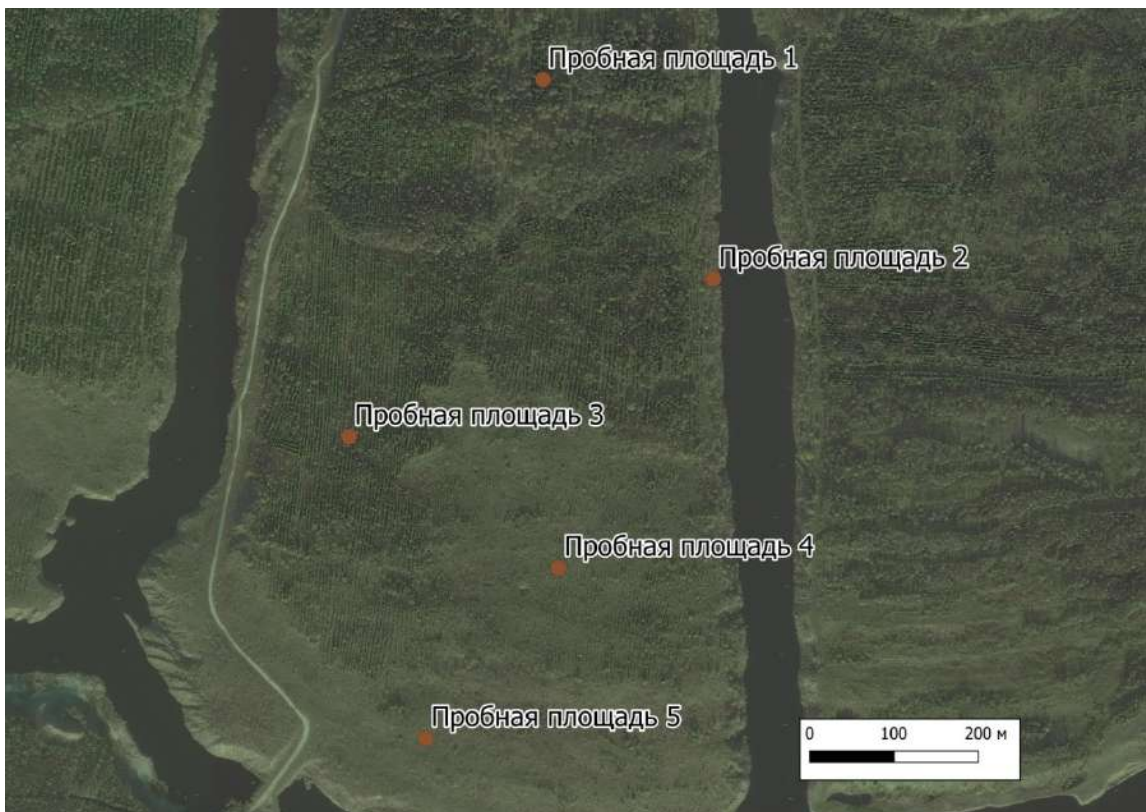


Рисунок 34. Местоположение пробных площадей при исследовании зарастания отвала вскрышной породы

Вторая пробная площадь, состоящая из еловых насаждений примерно 30-летнего возраста, находится на склоне отвала вскрышных пород. В целом, на всей территории данного природно-антропогенного комплекса преобладающую роль в сообществе наравне с елью европейской *Picea abies* разделяет берёза пушистая *Betula pubescens*. Встречаются также единичные экземпляры сосны обыкновенной *Pinus sylvestris* и ивы *Salix sp.*. Эстетическая ценность территории – 2. Сомкнутость древесного яруса незначительна и составляет 0,2. Высота елей, берёз и ив не превышает 10 м, а сосны имеют высоту около 7 м. При этом диаметр елей незначителен – всего в среднем 7 см, диаметр сосен и берёз – ориентировочно 10 см, а ивы имеют самый наибольший диаметр – 15 см. Подрост на

данной пробной площади ярко выражен и представлен, в основном, елью европейской. Также встречается осина и берёза пушистая. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса составляет 90%. Доминантами в травяно-кустарничковом ярусе являются *Achillea millefolium*, *Calamagrostis sp.* и *Avenella flexuosa*. Мохово-лишайниковый ярус: 60% зелёные мхи.

Третья пробная площадь (возраст насаждений составляет ориентировочно 20 лет) расположена на вершине отвала вскрышных пород. В древостое встречаются только единичные представители ели европейской *Picea abies*. Древесный ярус, в основном, представлен берёзой пушистой *Betula pubescens*. Данная площадь имеет среднее значение эстетической ценности – 3. Сомкнутость древостоя не превышает 0,1. Самые крупные экземпляры ели достигают 7 м, но они единичны. Берёзы же могут достигать 10 м в высоту. Основная масса рекультивационных посадок ещё находится на уровне подроста (около 4 м). При этом диаметр елей европейских оказался даже больше, чем на предыдущей площади на склоне, – порядка 8 см. Диаметр берёз такой же – 8 см. Подрост на данной площади ярко выражен и представлен посадками ели европейской. Также в подросте встречаются: осина *Populus tremula*, берёза пушистая *Betula pubescens*, сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* и ива *Salix sp.* Сомкнутость подроста больше, чем сомкнутость древостоя, – 0,4. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса – половина площади (50%). На этой площади также встречается иван-чай узколистный *Chamaenerion angustifolium*. Помимо иван-чая, в травяно-кустарничковом ярусе встречаются ещё тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium*, чина луговая *Lathyrus pratensis*, клевер луговой *Trifolium pratense*. Мохово-лишайниковый ярус: 60% зелёные мхи.

Четвёртая пробная площадь представляет собой территорию, где примерно 10 лет назад проводилась рекультивация, это вершина отвала вскрышных пород. Древесный ярус отсутствует, есть только подрост. Эстетическая ценность территории – 3. Посадки немного превышают человеческий рост. Высота всех древесных пород в подросте: 2-4 м. Это, в основном, ель европейская *Picea abies*, однако встречается также берёза пушистая *Betula pubescens* и сосна обыкновенная *Pinus sylvestris*. Диаметр подроста не превышает 5 см. При этом посадки достаточно плотные и сомкнутость подроста составляет 0,4. Проективное покрытие ТКЯ – такое же, как и на предыдущей площадке, – 50 %. Иван-чая *Chamaenerion angustifolium* на этой площади нет, присутствует сивец луговой *Succisa pratensis* (высотой 5 см), чина луговая (в третьем подъярусе травяно-кустарничкового яруса, высотой около 40 см), хвощ лесной *Equisetum sylvaticum*. Покрытие мхами на данной площади совсем незначительное – не больше 5%. Стоит отметить, что обилие

чины луговой *Lathyrus pratensis* по Друде составляет сор 1, что означает, что чина луговая является доминантным видом в травяно-кустарничковом ярусе на данной площади. Вполне вероятно, что при проведении рекультивации чиной засеивался наложенный грунт как укрепляющим многолетним разнотравьем, способствующим накоплению в почве питательных веществ (в частности, азота).

Пятая пробная площадь расположена на вершине отвала вскрышной породы и на ней не проводилась лесная рекультивация, производился только посев многолетних трав. Поэтому посадок ели европейской на ней нет. Эстетическая ценность данного лугового сообщества высока – 4. Из подроста встречаются в единичных, отдельно стоящих, экземплярах сосна обыкновенная *Pinus sylvestris*, берёза пушистая *Betula pubescens* и ива *Salix sp.* По высоте подрост не превышает 3 м. Диаметр не превышает 5 см. Причём, преобладающую роль в сообществе в подросте играют ивы (более 70% всех древесных пород). Из-за очагового характера распространения подроста его сомкнутость составляет менее 0,1. Проективное покрытие травяно-кустарничкового яруса высоко – около 80%, встречаются: мышиный горошек *Vicia cracca* (в 3-ем подъярусе, высотой около 40 см), тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium* (в 3-ем подъярусе, высотой около 30 см), чина луговая *Lathyrus pratensis* (в 3-ем подъярусе, высотой около 60 см), костёр безостый *Bromus inermis*, бор развесистый *Milium effusum*, ожика волосистая *Luzula pilosa*. Мохово-лишайниковый ярус отсутствует. В доминанты в травяно-кустарничковом ярусе опять выбивается чина луговая, обилие по Друде которой составляет сор 1.

В рамках данного исследования растительных сообществ на отвале вскрышных пород Кингисеппского месторождения фосфоритов мы можем выделить четыре условных стадии формирования елового сообщества на отвалах вскрышной породы путём лесной рекультивации. Первая стадия – это нанесение грунта и засев многолетними травами для формирования устойчивого почвоподобного покрова. Вторая стадия представляет посадку лесных культур (в данном случае ель европейская *Picea abies*). Окончание второй стадии знаменуется выходом самых высоких особей в древесный ярус (более 6 м). Третья стадия формирования сообщества заключается в росте всех насаждений до уровня древостоя и в создании берёзово-елового или елово-берёзового леса, так как в возрасте ориентировочно 30 лет ель европейская на рекультивированных ею территориях может занимать до 50% в составе древостоя. На четвёртой стадии ели вытесняют берёзы из состава сообщества, оставаясь почти единственным представителем древесного яруса, начиная формировать пятую стадию, которая ещё не представлена на исследованной территории, – мёртвопокровные ельники. В районе города Кингисепп на отвалах вскрышной породы ели достигают четвёртой стадии ориентировочно к 40 годам. С точки зрения использования

нарушенных территорий (таких как отвалы вскрышной породы), лесная рекультивация является оптимальным вариантом.

*Обилие вейника Calamagrostis sp*

Вейник *Calamagrostis sp.* является самым распространённым видом травяно-кустарничкового яруса на исследованной территории. Также встречаются *Tussilago farfara*, *Aegopodium podagraria*, *Solidago virgaurea*, *Chamaenerion angustifolium*, *Trifolium pratense*, *Fragaria vesca*, *Achillea millefolium*, *Dryopteris carthusiana*, а среди древостоя – *Picea abies* (таблица 16).

Таблица 16. Самые распространённые виды растительности на исследованной территории.

Название вида на латыни	Количество описаний, в которых встречается вид (всего было сделано 46 геоботанических описаний), шт.
<i>Calamagrostis sp.</i>	31
<i>Tussilago farfara</i>	18
<i>Aegopodium podagraria</i>	17
<i>Solidago virgaurea</i>	16
<i>Chamaenerion angustifolium</i>	16
<i>Picea abies</i>	16
<i>Trifolium pratense</i>	15
<i>Fragaria vesca</i>	13
<i>Achillea millefolium</i>	13
<i>Dryopteris carthusiana</i>	12

На условно-фоновой территории вейник *Calamagrostis sp.* встречается на 9 пробных площадях, а на территории месторождения – на 22 пробных площадях. При этом на условно-фоновой территории в 7 описаниях из 9 вейник является доминантным видом и входит название сообщества. На территории месторождения вейник выбивается в доминантные виды и входит в наименование сообщества в 15 описаниях из 22.

На условно-фоновой территории медиана обилия по Друде вейника *Calamagrostis sp.* составляет сор 2 (25-ый квартиль – сор 1, 75-ый квартиль – сор 2), а на территории месторождения – сор 1 (25-ый квартиль – сор 1, 75-ый квартиль – сор 1). Стоит отметить, что на землях сельскохозяйственного назначения, в настоящее время используемых для выпаса крупного рогатого скота, относящихся к условно-фоновой территории, обилие вейника достигает сор 3. Средняя высота вейника на исследованной территории – 30 см, но на отдельных пробных площадях встречается вейник с соцветиями, достигающий 60-70 см.

Для поиска как причин, так и следствий, меньшего обилия вейника в районе месторождения воспользуемся понятием об экологических факторах среды. В середине XX века в нашей стране активно развивалась фитоценология (Заленский, и др., 1959), и одним из результатов этой деятельности является фундаментальный труд Л.Г. Раменского и др. «Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову» (Раменский, и др., 1956). В этом труде проявилась научная идея о шкалировании влияния экологических факторов на различные виды и их характеристики. Изменение обилия вейника *Calamagrostis sp.*, согласно экологическим шкалам Л.Г. Раменского (таблица 17), может свидетельствовать о том, что на территории месторождения более богатые по содержанию питательных веществ почвы, так как на производственной территории расположено производство удобрений. Данный вывод следует из того, что обилие по Друде сор 1 характерно для богатых в минеральном отношении почв, а увеличение значений обилия по Друде для вейника до сор 2 уже является характеристикой небогатых почв. В целом, по характеристике экологических шкал Ландольта (ещё одна разновидность экологических шкал), вейник *Calamagrostis sp.* относится к полутеневым растениям, произрастающим на почвах следующей характеристики: от средней сухости до влажных, от слабокислых до нейтральных, от среднебедных до среднебогатых по богатству минерального питания, с небольшим гумусовым горизонтом, на песчаных, хорошо аэрируемых почвах.

Таблица 17. Экологические шкалы Л.Г. Раменского для вейника *Calamagrostis sp.* (на основе Раменский и др., 1956).

Наименование растения и некоторые сведения	Шкала	Обилие по Друде			
		сор 2 и выше	сор 1	sp	sol
<i>Calamagrostis sp.</i> Вейник, злак низкого кормового достоинства.	Увлажнение	Влажно-луговое	Влажно-луговое	От сухо-лугового до сыро-лугового	От сухолугового до сырлугового
	Богатство и засолённость почвы	Небогатые	От бедных до довольно богатых	От бедных до богатых	От особо бедных до слабо солончаковых
	Пастбищная дигрессия		Влияние выпаса слабое или не сказывается	От умеренного влияния выпаса до полного отсутствия	От сильного влияния выпаса до отсутствия выпаса
	Аллювиальность				Высоко- и среднеобеспеченное увлажнение

Статистически значимые различия имеются в значении подъяруса вероники дубравной *Veronica chamaedrys* L. На условно-фоновой территории вероника дубравная встречалась на 4 пробных площадях, а на территории месторождения – на 6 пробных

площадях. На условно-фоновой территории вероника дубравная встречается только во втором ярусе, а на территории месторождения – преимущественно в первом подъярусе (лишь 75-ый квартиль и выше относятся ко второму подъярусу). Интерпретируемой и однозначной причины данному обстоятельству выявить не удалось.

Также статистически значимые различия есть в значении подъяруса хвоща лесного *Equisetum sylvaticum* L. На условно-фоновой территории он повсеместно встречается во втором ярусе (5 описаний) а на территории месторождения – в третьем (4 описания). Определённых причин найденного различия нет в связи со слишком большим спектром факторов, влияющих на рост растений. Средние высоты и подъярусы основных видов травяно-кустарничкового яруса приведены в таблице 18.

Таблица 18. Средние высоты и подъярусы некоторых видов травяно-кустарничкового яруса на исследованной территории.

Название растения	Высота на условно-фоновой территории, см	Подъярус на условно-фоновой территории	Высота на территории месторождения, см	Подъярус на территории месторождения
<i>Calamagrostis epigejos</i>	40	3	40	3
<i>Tussilago farfara</i>	отсутствует	отсутствует	20	2
<i>Aegopodium podagraria</i>	25	2	25	2
<i>Solidago virgaurea</i>	60	3	10	1
<i>Chamaenerion angustifolium</i>	отсутствует	отсутствует	60	3
<i>Trifolium pratense</i>	7	1	7	1
<i>Fragaria vesca</i>	10	1	10	1
<i>Achillea millefolium</i>	7	1	12	1
<i>Veronica chamaedrys</i>	25	2	12	1
<i>Equisetum sylvaticum</i>	20	2	30	3
<i>Deschampsia cespitosa</i>	отсутствует	отсутствует	40	3
<i>Artemisia vulgaris</i>	40	3	30	3

## 5.2 Оценка трансформации фитоценозов методом корреляционных плеяд

С помощью метода корреляционных плеяд (Опекунова, Муратова, 2005) удалось разбить виды, встречающиеся на исследованной территории, на 15 групп, называемых плеядами (рисунок 35). Коэффициенты сопряжённости приведены на рисунке в десятичном формате над линией связи. Родовое (видовое) название (или наименование

экологической группы для мохово-лишайникового покрова) расположено в узлах. В результате анализа получилось 3 больших группы (каждая включает более 15 видов) и 12 малых групп (от 2 до 6 видов в каждой). К большим группам можно отнести сельскохозяйственный луг (заброшенная пашня) на условно-фоновой территории, лесное сообщество с избыточным увлажнением на условно-фоновой территории и сообщество, примыкающее к хвостохранилищу на производственной территории. К малым группам можно отнести условно-фоновые лесные сообщества, болотное сообщество, ельник травяной зеленомошный, травяно-кустарничковый ярус (ТКЯ) при повышенном увлажнении, рудеральную растительность техногенных объектов, рудеральную растительность отвалов вскрышных пород, растительность берега отвала вскрышных пород, виды из ТКЯ рекультивированных лесов, ТКЯ на отвалах под мелколиственными породами, ТКЯ на отвалах под хвойными породами и ТКЯ на отвалах на участках старой рекультивации (40-летние ельники).

Для сельскохозяйственного луга (заброшенной пашни) ключевыми видами являются звездчатка лесная *Stellaria holostea* L., пижма обыкновенная *Tanacetum vulgare* L., осот полевой *Sonchus arvensis* L., герань луговая *Geranium pratense* L. и лютик едкий *Ranunculus acris* L. Для лесного сообщества с избыточным увлажнением на условно-фоновой территории ядром являются вахта трёхлистная *Menyanthes trifoliata* L., вех ядовитый *Cicuta virosa* L., лютик ползучий *Ranunculus repens* L. и водяника чёрная *Empetrum nigrum* L. При повышенном увлажнении проявляется группа: кислица обыкновенная *Oxalis acetosella* L., хвощ лесной *Equisetum sylvaticum* L. и таволга вязолистная *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim. В плеядах выделилась группа, которая появляется в лесных экосистемах при умеренном увлажнении: хвощ полевой *Equisetum arvense* L. и костяника *Rubus saxatilis* L. Ключевыми видами для болотных экосистем являются сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L. и сфагнум *Sphagnum* sp., остальные виды болот попали в плеяду ольхового или соснового сообщества с избыточным увлажнением на условно-фоновой территории.

На исследованной территории распространены ельники травяные зеленомошные (зональный тип лесов для южной тайги), что, видимо, и послужило их выделению в отдельную группу, состоящую из ели европейской *Picea abies* (L.) H.Karst. и плеурозиума Шребера *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt. Причём, ельник травяной зеленомошный встречается как на условно-фоновой территории, так и на территории месторождения (уже в рекультивированном виде). Также и следующая группа видов, характерная для берёзовых лесов, встречается на всей исследованной территории (Недбаев и др., 2020). В этой категории ключевыми видами являются берёза пушистая



*Betula pubescens* Ehrh., золотарник обыкновенный *Solidago virgaurea* L., марьянник дубравный *Melampyrum nemorosum* L. и цетрария исландская *Cetraria islandica* (L.) Ach.

На всех техногенных объектах встречается пара из двух видов земляника лесная *Fragaria vesca* L. и одуванчик лекарственный *Taraxacum officinale* (L.) Webb ex F.H.Wigg. Для отвалов вскрышных пород характерна группа рудеральных видов, ключевые из которых иван-чай узколистный *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., мать-и-мачеха *Tussilago farfara* L. и сивец луговой *Succisa pratensis* Moench. Отвалы вскрышных пород расположены рядом с карьерами, где, собственно, и добывались вскрышные породы. В настоящее время карьеры заполнены водой. И на границе отвала вскрышных пород и уровня воды карьера формируется береговая полоса с сообществом, для которого характерны ястребинка *Hieracium* sp. и клевер ползучий *Trifolium repens* L. Уже упоминалось, что значительная часть площади отвалов вскрышных пород рекультивирована, и там была произведена посадка лесных культур. Под рекультивированными лесами типичны клевер полевой *Trifolium campestre* Schreb., чина луговая *Lathyrus pratensis* L., нивяник обыкновенный *Leucanthemum vulgare* Lam. и ожика волосистая *Luzula pilosa* (L.) Willd., которые остались под пологом леса после первичного засева территории многолетними травами. Под мелколиственными породами на отвалах, в основном, встречаются тысячелистник обыкновенный *Achillea millefolium* L. и мышиный горошек *Vicia cracca* L. Под хвойными породами типична группа из трёх растений: зюзник европейский *Lycopus europaeus* L., ситник развесистый *Juncus effusus* L. и дудник лесной *Angelica sylvestris* L. Под самыми старыми ельниками на отвалах (ориентировочно 40-летние древостой) в травяно-кустарничковом ярусе наблюдаются латук стенной *Lactuca muralis* (L.) Gaertn., вероника дубравная *Veronica chamaedrys* L. и печёночница благородная *Hepatica nobilis* Mill.

Отдельной большой группой выделяются виды, произрастающие на территориях, прилегающих к хвостохранилищу: рябина обыкновенная *Sorbus aucuparia* L., василистник жёлтый *Thalictrum flavum* L., ромашка аптечная *Matricaria chamomilla* L., душистый колосок *Alopecurus pratensis* L., череда трёхраздельная *Bidens tripartita* L., марь белая *Chenopodium album* L. и гравилат речной *Geum rivale* L.

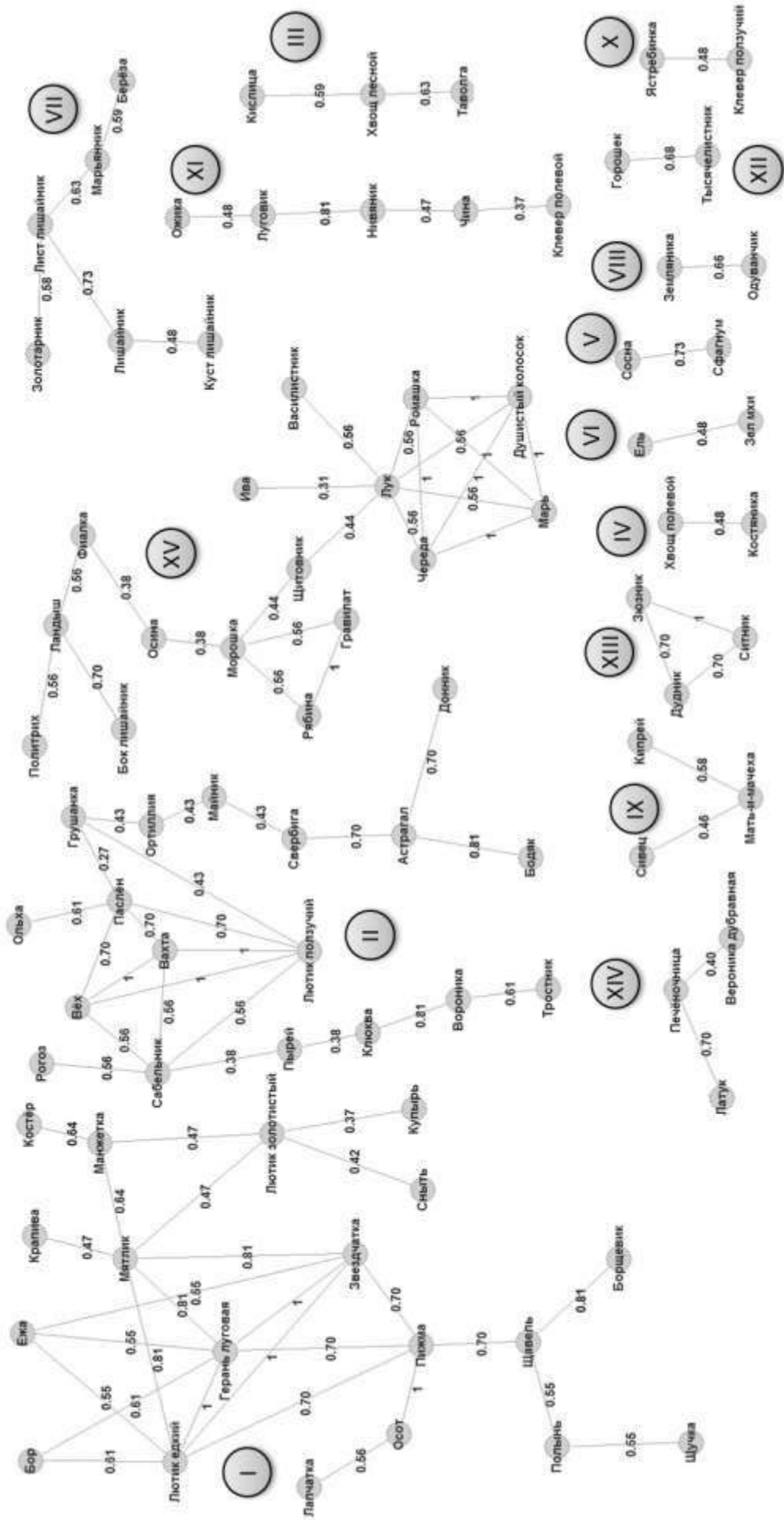


Рисунок 35. Выделенные группы растительности исследованной территории. Характеристика выделенных групп содержится в таблице 19.

Таблица 19. Характеристика выделенных групп растительности на исследованной территории.

№	Латинское название	Русское название	Экологическая характеристика и местообитание вида
I. Сельскохозяйственный луг (заброшенная пашня) на условно-фоновой территории			
2	<i>Stellaria holostea</i> L.	Звездчатка лесная	Широко распространена в широколиственных и смешанных лесах.
3	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	Пижма обыкновенная	Растёт по дорогам, полям, межам, в кустарниках, на опушках, в луговых степях, берёзовых лесах, на суходольных лугах, в горах и в долинах. Больших зарослей не образует, но встречается повсеместно.
46	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Ежа сборная	Принадлежит к числу лучших кормовых трав.
51	<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P.Beauv.	Щучка дернистая	Распространён по всему северному полушарию. Влажные и заболоченные луга, берега болот, водоёмов, разрежённые леса, поляны, обочины дорог в тундровой, лесной, лесостепной, степной зонах.
57	<i>Artemisia vulgaris</i> L.	Полынь обыкновенная	Растёт по заброшенным полям, пастбищам и пустошам, вдоль дорог, по берегам водоёмов. Рудеральное растение.
58	<i>Milium effusum</i> L.	Бор развесистый	Обитает во влажных хвойных и лиственных лесах Северного полушария.
59	<i>Bromus inermis</i> Leyss.	Костёр безостый	Хорошее растения для пастбища.
62	<i>Urtica dioica</i> L.	Крапива двудомная	Преобладает в лесной и лесостепной зонах. Рудеральное растение.
64	<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	Купырь лесной	В основном произрастает на не задернелых или слабо задернованных почвах, где происходит интенсивный процесс нитрификации. Хорошо выносит затенение, но может произрастать и на открытых местах.
65	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	Сныть обыкновенная	Растёт на богатых почвах в лиственных и смешанных лесах, на вырубках, среди кустарников, нередко как сорное в садах и парках. Теневынослива.
68	<i>Potentilla anserina</i> L.	Лапчатка гусиная	Чаще всего встречается на песчаных или каменистых, глинистых почвах, по обочинам дорог, на лугах и пустырях, в оврагах и канавах, где она может быстро размножиться изобильно укореняющимися столонами.
70	<i>Heraclеum sosnowskyi</i> Manden.	Борщевик Сосновского	Естественные места произрастания борщевика Сосновского — Центральный и Восточный Кавказ, Закавказье и Ближний Восток, где он растёт в горных лесах и на субальпийских лугах. В связи с культивированием борщевика Сосновского как силосной культуры он получил распространение в Восточной и Северной Европе, постепенно переселившись и в дикую природу, засевая берега водоёмов, пустыри, полосы отвода дорог, необрабатываемые участки полей, лесные поляны и опушки, склоны гор, долины рек.
71	<i>Sonchus arvensis</i> L.	Осот полевой	Обременительное сорное растение, один из самых тягостных полевых сорняков. Вид засоряет все типы посевов, встречается также на парах, в садах и огородах.
72	<i>Poa pratensis</i> L.	Мятлик луговой	Предпочитает рыхлые, умеренно влажные, плодородные почвы. Положительно отзывается на известкование, внесение минеральных удобрений (особенно азотных). Растёт на слабокислых почвах, не выносит засоления
73	<i>Geranium pratense</i> L.	Герань луговая	Произрастает на умеренно влажных суходольных и степных лугах, влажных лесных полянах, лесных опушках, в лиственных и хвойных лесах, среди кустарников, около заборов.
76	<i>Alchemilla vulgaris</i> L.	Манжетка обыкновенная	Растёт по лесам, лугам, лесным опушкам, по краям дорог, на пашнях, в разреженных сосновых и смешанных лесах.
80	<i>Rumex confertus</i> Willd.	Щавель конский	Произрастает в лесной и лесостепной зонах, по долинам рек заходит в степную зону. Поселяется преимущественно на умеренно влажных и влажных почвах.

№	Латинское название	Русское название	Экологическая характеристика и местообитание вида
81	<i>Ranunculus acris</i> L.	Лютик едкий	Предпочитает увлажнённые почвы. Выдерживает умеренное затопление и небольшое заиливание.
82	<i>Ranunculus auricomus</i> L.	Лютик золотистый	Произрастает на суходольных, низменных и поемных лугах, а также в разряженных лиственных лесах.
II. Лесное сообщество с избыточным увлажнением на условно-фоновой территории			
6	<i>Typha latifolia</i> L.	Рогоз широколистный	Растёт по берегам болот и водоёмов, образуя обширные, но самоизреживающиеся заросли, в кюветах, канавах, карьерах, по обочинам дорог.
11	<i>Melilotus altissimus</i> Thuill.	Донник рослый	На влажных лугах, на берегах водоёмов, у речных наносов (аллювиев), на лесных опушках, засоленных местах, пастбищах, дорожных насыпях и в канавах, по залежам.
13	<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	Вахта трёхлистная	Встречается на торфянистых и минеральных грунтах, на сфагновых болотах, по берегам стоячих и медленно текущих водоёмов, по топким окраинам зарастающих озёр и стариц. Вахта может быть одним из компонентов травяно-кустарничкового яруса болот, влажных лесов и лугов.
14	<i>Orthilia secunda</i> (L.) House	Ортилия однобокая	Растёт в хвойных, смешанных и мелколиственных лесах, на вырубках, опушках, полянах, в лесных оврагах. Микотроф.
15	<i>Vaccinium oxycoccos</i> L.	Клюква обыкновенная	В природе все виды клюквы растут в сырых местах: на переходных и верховых болотах, в сфагновых хвойных лесах, иногда — по заболоченным берегам озёр.
19	<i>Solanum dulcamara</i> L.	Паслён сладко-горький	Растёт по сырым зарослям кустарников и поёмным лугам, ивнякам, по берегам рек и прудов, около озёр и болот, сырых мусорных мест во всех областях средней полосы России. Растение теневыносливое.
22	<i>Astragalus glycyphyllos</i> L.	Астрагал солодколистный	Предпочитает свежие, влажные, слабокислые, богатые гумусом суглинистые и супесчаные почвы. Растение полулесное, светолюбивое. Растёт на полянах, опушках, в дубовых и сосновых лесах, в кустарниках, на лугах, в поймах рек.
24	<i>Bunias erucago</i> L.	Свербига полевая	Произрастает в Европе, Средиземноморье и Азии.
26	<i>Cicuta virosa</i> L.	Вёх ядовитый	Произрастает на низких болотистых лугах, по берегам рек, ручьёв и прудов, в канавах, там, где есть достаточное количество воды.
27	<i>Comarum palustre</i> L.	Сабельник болотный	Растёт по сырым и болотистым местам.
28	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Desv. ex Nevski	Пырей ползучий	Встречается на заливных лугах в сообществе с другими злаками, как сорняк на пашнях. На пойменных лугах и залежах иногда преобладает в травостое.
38	<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	Ольха серая	Растёт на равнинах в лесной и, реже, лесостепной и лесотундровой зоне. Образует так называемые сероольшатники — кустарниковые и мелколесные заросли на заболоченных опушках, болотах, у берегов рек, на лесосеках, пожарищах и заброшенных пашнях.
61	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	Тростник обыкновенный	Влаголюбивое растение. Широко распространено на почвах с близким стоянием грунтовых вод. Тростник обычен по болотам, зарастающим озёрам, плавням, заливным лугам,
67	<i>Pyrola rotundifolia</i> L.	Грушанка круглолистная	Произрастает в лесах.
83	<i>Ranunculus repens</i> L.	Лютик ползучий	Растёт на влажных, затенённых, наносных почвах: по берегам рек и озёр, на влажных лугах, в кустарниковых зарослях, на лесных болотах, по полям и огородам.
92	<i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W.Schmidt	Майник двулистный	Обычен в разнородных лесах, но предпочитает еловые с умеренно влажной почвой.
97	<i>Cirsium heterophyllum</i> (L.) Hill	Бодяк разнолистный	Произрастает по сырым лугам, лесным полянам и опушкам, в оврагах, среди кустарника.

№	Латинское название	Русское название	Экологическая характеристика и местообитание вида
101	<i>Empetrum nigrum</i> L.	Водяника чёрная	Встречается на сфагновых болотах, на каменистых участках, в лесах (светлохвойных и тундровом редколесье), в щебнистых тундрах и на дюнах.
III. ТКЯ при повышенном увлажнении			
88	<i>Equisetum sylvaticum</i> L.	Хвощ лесной	Произрастает в лесах, кустарниковых зарослях, тундрах, на опушках, берегах водоёмов, болотах.
84	<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	Таволга вязолистная	Растёт по сырым низинным и послелесным лугам и низинным травяным болотам, на опушках заболоченных лесов, в пойменных и влажных тенистых лесах, по берегам водоёмов и канавам.
85	<i>Oxalis acetosella</i> L.	Кислица обыкновенная	Успешно произрастающая в темнохвойных, в особенности еловых лесах в условиях значительного затенения, являющаяся, наряду с майником и седмичником, характерным представителем растительного сообщества таких лесов, она обычно быстро исчезает при уничтожении леса.
IV. Лесные виды при умеренном увлажнении			
89	<i>Equisetum arvense</i> L.	Хвощ полевой	Растёт в лесах, на суходольных, пойменных лугах, окраинах болот, галечниках, песчаных отмелях, полях, выпасах, по берегам рек, ручьёв, арыков, нередко сорничает.
93	<i>Rubus saxatilis</i> L.	Костяника	В Средней России известна во всех областях, приурочена к влажным лесам, преимущественно хвойным.
V. Болотная экосистема			
36	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Сосна обыкновенная	Образует как чистые насаждения, так и растёт вместе с елью, берёзой, осиной, дубом; малотребовательная к почвенно-грунтовым условиям, занимает часто непригодные для других видов площади: пески, болота.
45	<i>Sphagnum</i> sp.	Сфагнум	Поселяется на влажных местах, способствует быстрому заболачиванию территории, так как способен активно поглощать и удерживать влагу.
VI. Ельник травяной зелемошный			
33	<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.	Ель европейская	Растёт на почвах разного механического состава — от песков до тяжёлых суглинков, но довольно требовательна к плодородию почвы. Предпочитает увлажнение проточными водами, избегает заболоченных почв с застойным увлажнением. Засухоустойчива, морозостойка, но страдает от весенних заморозков.
39	<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.	Плеуразиум Шребера	Обычный мох в различных типах леса, изредка встречается на болотах.
VII. Берёзовый лес (как фоновый, так и на отвалах вскрышных пород)			
34	<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	Берёза пушистая	Встречается как примесь к различным лесообразующим породам в хвойных и лиственных лесах или образует леса. Эта берёза, в отличие от берёзы повислой, выносит заболачивание почвы и произрастает в сыроватых лесах, на их опушках, на окраинах болот, на болотах и по берегам озёр.
41	<i>Cetraria islandica</i> (L.) Ach.	Цетрария исландская	Цетрария исландская — характерный представитель напочвенных лишайников сосновых лесов, верещатников, болот, тундр и лесотундр. Растёт прямо на почве или на коре старых пней. Предпочитает песчаные незатенённые места, где иногда образует почти чистые заросли. Развивается только в условиях чистого воздуха.
43	<i>Cladonia</i> sp.	Кладония	Встречается в лесотундре и тундре, в редкостойких лесах Севера, на торфяных болотах на почве, на пнях, реже на обнажённой древесине. Растёт в местах с умеренным снежным покровом.
50	<i>Solidago virgaurea</i> L.	Золотарник обыкновенный	Растёт в светлых лесах, встречается по лесным опушкам, полянам, вырубкам, среди кустарников, на лугах, в придорожных насаждениях. Селится в основном на проницаемых песчаных почвах.

№	Латинское название	Русское название	Экологическая характеристика и местообитание вида
69	<i>Melampyrum nemorosum</i> L.	Марьянник дубравный	Растёт в лиственных лесах (иногда большими массивами), на опушках, полянах, в зарослях кустарников, на сырых, болотистых и торфяных лугах и на меловых склонах.
VIII. Рудеральная растительность техногенных объектов			
48	<i>Fragaria vesca</i> L.	Земляника лесная	Растёт на опушках, в осветлённых лесах, на лесных вырубках и среди кустарников.
60	<i>Taraxacum officinale</i> (L.) Webb ex F.H.Wigg.	Одуванчик лекарственный	Растёт на лугах, полянах, около дорог, на выгонах и у жилья, часто как сорняк в полях, садах, огородах и парках.
IX. Рудеральная растительность отвалов вскрышных пород			
47	<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	Иван-чай узколистный	Произрастает на почвах различного механического состава: от песков до тяжёлых суглинков. Мирится с различным содержанием влаги в почве, за исключением очень сухих и сырых почв. Отрицательно реагирует на близкое залегание грунтовых вод и длительное заливание полами водами.
52	<i>Tussilago farfara</i> L.	Мать-и-мачеха	Обычно встречается на участках, свободных от дёрна, — берегах водоёмов, на склонах оврагов и оползней, нередко на участках, подвергшихся антропогенному воздействию — полях, пустырях, свалках.
96	<i>Succisa pratensis</i> Moench	Сивец луговой	Сивец луговой широко распространён в лугово-болотных ценозах Евразии. Растение встречается на лугах, лесных полянах, вырубках, по обочинам дорог, в светлых лиственных лесах, всегда на влажной почве, в степных районах — на солонцеватых местах.
X. Берег отвала вскрышных пород			
30	<i>Hieracium</i> sp.	Ястребинка	Ареал — преимущественно умеренный пояс Северного полушария и горные районы тропиков.
53	<i>Trifolium repens</i> L.	Клевер ползучий	Встречается в составе поемных и суходольных лугов, растёт по берегам рек, в светлых лесах, по опушкам леса, на горных лугах.
XI. ТКЯ рекультивированных лесов			
18	<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer	Луговик извилистый	Хвойные, преимущественно сосновые леса, поляны, опушки, вырубки. Хорошо разрастается после вырубки леса или пала. После последнего разрастается особенно пышно благодаря уничтожению лишайниково-мохового покрова
55	<i>Trifolium campestre</i> Schreb.	Клевер полевой	Растёт по полям и лугам, на склонах и речных наносах, на легких песчаных почвах и песках.
63	<i>Lathyrus pratensis</i> L.	Чина луговая	Растёт по разреженным смешанным и берёзовым лесам и их опушкам, среди кустарников, по степным лугам и лесным склонам.
79	<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.	Нивяник обыкновенный	В умеренном поясе Евразии встречается по лугам, лесным полянам, кустарникам, залежам, иногда как сорное на полях и в огородах.
100	<i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.	Ожика волосистая	Произрастает в тенистых лесах.
XII. ТКЯ на отвалах под мелколиственными породами			
49	<i>Vicia cracca</i> L.	Мышиный горошек	Растение с широкой биологической пластичностью. Произрастает на лугах, склонах, в кустарниках, на лесных опушках, реже в светлых лесах. Как сорное растение встречается на полях и по обочинам дорог.
56	<i>Achillea millefolium</i> L.	Тысячелистник обыкновенный	Тысячелистник обыкновенный растёт в лесной, лесостепной и степной зонах, на суходольных лесных лугах, в луговых степях, среди кустарников, в разреженных лесах, на опушках, межах, вдоль дорог, по оврагам, на залежах, пустырях, свалках, в посёлках, по берегам водоёмов, по окраинам полей.
XIII. ТКЯ на отвалах под хвойными породами			
9	<i>Lycopus europaeus</i> L.	Зюзник европейский	Часто произрастает в тростниковых и осоковых зарослях по берегам рек и в канавах, как правило, на временно затопленных почвах с невысоким содержанием кислот и щелочей. Азотофил.

№	Латинское название	Русское название	Экологическая характеристика и местообитание вида
31	<i>Juncus effusus</i> L.	Ситник развесистый	Встречается по сырым лугам и болотистым местам, по берегам водоёмов.
86	<i>Angelica sylvestris</i> L.	Дудник лесной	Растёт на влажных лугах, среди кустарников, в лесах, по берегам рек и прудов.
XIV. ТКЯ на отвалах под 40-летними ельниками			
32	<i>Lactuca muralis</i> (L.) Gaertn.	Латук стенной	Широко распространённый в лесной зоне Европы вид.
77	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	Вероника дубравная	Произрастает в светлых лесах, на опушках, среди кустарников, на лесных полянах, в садах и на полях, на субальпийских лугах.
102	<i>Hepatica nobilis</i> Mill.	Печёночница благородная	Растёт по лиственным лесам, кустарникам, реже открытым луговым местам.
XV. Сообщества, примыкающие к хвостохранилищу			
1	<i>Sorbus aucuparia</i> L.	Рябина обыкновенная	Растёт отдельными экземплярами, не образуя сплошных зарослей, в подлеске или втором ярусе хвойных, смешанных, изредка лиственных лесов, на лесных полянах и опушках, между кустарниками.
4	<i>Thalictrum flavum</i> L.	Василистник жёлтый	Растёт по сырым лугам, берегам рек, кустарникам, опушкам леса.
5	<i>Trientalis europaea</i> L.	Седмичник европейский	Произрастает в лесах, на севере вплоть до тундры, преимущественно в еловых лесах.
7	<i>Viola palustris</i> L.	Фиалка болотная	Основные местообитания вида: сырые и заболоченные луга и леса, лесные болота, опушки, берега водоёмов.
10	<i>Matricaria chamomilla</i> L.	Ромашка аптечная	Из-за ярко выраженного светолюбия ромашка аптечная не выдерживает конкуренции с быстрорастущими травами, поэтому растёт только в несформированных фитоценозах: на залежах, пустырях, по обочинам железных и шоссейных дорог, в населённых пунктах, садах, виноградниках, посевах зерновых и пропашных культур и так далее.
20	<i>Alopecurus pratensis</i> L.	Душистый колосок	Встречается на суходольных и пойменных лугах, по берегам водоёмов, на опушках и полянах, среди кустарников.
23	<i>Bidens tripartita</i> L.	Черёда трёхраздельная	Растёт по сырым берегам рек, вдоль мелиоративных каналов, у прудов и озёр, на болотах, в канавах, где часто образует заросли. Рассеянно встречается на лугах, как сорняк в огородах и на полях.
25	<i>Chenopodium album</i> L.	Марь белая	В России и сопредельных странах — обычное сорное растение полевых, огородов, мусорных мест.
29	<i>Geum rivale</i> L.	Гравилат речной	Растёт на влажных и сырых плодородных, слабокислых почвах, в лиственных лесах, по берегам рек и краям болот, на лугах, по зарослям кустарников.
35	<i>Salix sp.</i>	Ива	Растёт в сырых лесах разного состава (реже в хвойных, преимущественно на богатых почвах, вырубках, опушках, вдоль дорог, часто у жилья).
37	<i>Populus tremula</i> L.	Осина	Встречается на границе леса и тундры, растёт в лесной и лесостепной зонах. Её можно встретить по берегам водоёмов, в лесах, по опушкам, изредка на сухих песках и вырубках, по оврагам, болотам и в горах; поднимается до верхней границы леса.
44	<i>Polytrichum commune</i> Hedw.	Кукушкин лён обыкновенный	Растёт в сырых заболочиваемых таёжных лесах-долгомошниках, на мокрых лугах и болотах.
94	<i>Rubus chamaemorus</i> L.	Морошка	Встречается на торфяных болотах, в заболоченных лесах, моховых и кустарниковых тундрах в арктической и северной лесной полосе северного полушария, в средней полосе европейской части России, в Белоруссии, Сибири, на Дальнем Востоке.
98	<i>Convallaria majalis</i> L.	Ландыш майский	Ландыш растёт в лиственных и сосновых, а также в смешанных лесах, на опушках и полянах. Особенно хорошо развивается в пойменных дубравах, на богатой почве при хорошем увлажнении и нейтральной реакции.

№	Латинское название	Русское название	Экологическая характеристика и местообитание вида
103	<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P.Fuchs	Щитовник игольчатый	Теневыносливое и даже тенелюбивое растение. Растёт по сырым каменистым осыпям и россыпям в субальпийском поясе, в кустарниковых зарослях, в разнообразных лесах, преимущественно темнохвойных, по опушкам и полянам, часто у стволов ели, между корневыми лапами и у разлагающихся пней, способен выживать на вырубках.

Проведённый анализ на основе построения плейд показал, что наибольшее отличие от условно-фоновых территорий в части растительного покрова наблюдается на территориях, прилегающих к хвостохранилищу (на самом хвостохранилище, растительность борта хвостохранилища, понижения перед хвостохранилищем, а также луговые сообщества в 200 м от него). Только в этих сообществах можно встретить *Thalictrum flavum*, *Matricaria chamomilla*, *Alopecurus pratensis*, *Bidens tripartita* и *Chenopodium album*. Отметим, что разнообразие почв, режима увлажнения и степени антропогенной трансформации приводит к пестроте видов, встречающихся рядом с хвостохранилищами.

Сообщества на отвалах отличаются от условно-фоновых территорий не столь явно. Анализ плейд позволил выделить небольшие группы по 2-7 видов, которые характерны для различных условий – в целом, для всех техногенных объектов, конкретно для отвалов вскрышных пород, а также для определённых пород (мелколиственных или хвойных), вплоть до группы, встречающейся в 40-летних рекультивированных ельниках.

По полученным результатам видно, что основными причинами, влияющими на видовой состав фитоценозов, являются режим увлажнения, почвенный покров и подстилающие породы, генезис и наличие антропогенного влияния на территорию. Для условно-фоновых территорий характерно обилие влаголюбивых видов, что доказывает наличие в доминантах таволги вязолистной *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., разных видов хвощей и др. Зональными лесными экосистемами являются ельники кислотно-зеленомошные, ельники травяные зеленомошные и березняки или ольшаники с влаголюбивыми видами в ТКЯ. На территории месторождения дополнительно к зональным видам растений в сообщество оказываются включены рудеральные виды, такие как *Taraxacum officinale*, *Chamaenerion angustifolium* и *Tussilago farfara*.

### Выводы к главе 5

Методом геоботанических описаний исследовано 46 пробных площадей, включающих как условно-фоновую территорию, так и территорию месторождения. Главной причиной изменения растительного покрова на территории исследования



является антропогенная деятельность, связанная с добычей фосфоритов, образованием отвалов и рекультивацией техногенных объектов.

На отвалах вскрышных пород Кингисеппского месторождения фосфоритов выделено пять стадий формирования сообщества после рекультивации: начиная от посева многолетних трав и заканчивая мёртвопокровными ельниками, так как основная порода, которой проводилась и проводится по настоящее время рекультивация, – это *Picea abies*.

Подрост мелколиственных пород активно развивается в первые 20-30 лет рекультивации, затем он вытесняется из-под полога ели европейской *Picea abies* (при условии, что рекультивация проводилась елью). При этом на условно-фоновых территориях и берёза пушистая *Betula pubescens*, и ольха серая *Alnus incana* встречаются в естественных лесах с избыточным увлажнением.

Самым распространённым видом травяно-кустарничкового яруса является вейник *Calamagrostis sp.* Статистически достоверно снижение обилия вейника на территории месторождения, что может свидетельствовать о том, что почвы и техногенные поверхностные образования месторождения богаты питательными веществами (в частности, соединениями азота и фосфора), поскольку вейник предпочитает небогатые в отношении минерального питания почвы.

В работе был использован метод корреляционных плеяд, с помощью которого были выделены 15 групп растительности на основе встречаемости видов в геоботанических описаниях: из них 3 большие группы, включающие более 15 видов, и 12 малых групп – от 2 до 6 видов. Анализ этих групп показал, что сообщества на отвалах вскрышных пород и на отвале фосфогипса различаются с условно-фоновыми территориями только наличием ряда рудеральных видов. При этом сообщества, примыкающие к хвостохранилищу, отличались от условно-фоновых сильнее всего (например, наличием видов, которые встречаются только у хвостохранилища).

Антропогенное воздействие – производство фосфорных удобрений – изменяет естественные экосистемы, ранее располагавшиеся на территории месторождения, и взамен них возвращает в природу путём рекультивации новые сообщества, которые имеют иную структуру, что наиболее явно проявляется в видовом составе травяно-кустарничкового яруса. Восстановленные территории могут быть использованы в целях рекреации или лесного хозяйства.

**Защищаемое положение.** Еловые сообщества на отвалах вскрышных пород производства фосфорных удобрений проходят пять стадий формирования. При этом травяно-кустарничковый ярус даже через 40 лет после рекультивации представлен, в

основном, рудеральными видами. Наиболее значительно изменяется видовой состав растительности на территории месторождения, прилегающей к хвостохранилищам.

## **Заключение**

В результате обработки полученного автором фактического материала, а также изучения имеющихся литературных источников можно сделать следующие выводы:

1. Ландшафтно-деструкционное воздействие производства фосфорных удобрений заключается в изъятии из недр фосфоритовых руд, образовании карьеров, перемещении вскрышных пород, формировании отвалов вскрышных пород и отвала фосфогипса, создания хвостохранилищ. Указанные процессы приводят практически к полному уничтожению почвенно-растительного покрова месторождения. Поэтому проводятся мероприятия по рекультивации нарушенных земель.

Снимки LandSAT показывают, что некоторым экосистемам, созданным на месте бывших отвалов вскрышных пород, уже несколько десятилетий. Пик нарушенных земель приходился на 80-е гг. XX века. К 2022 году нерекультивированных отвалов вскрышных пород практически не осталось.

Ландшафтно-деструкционное воздействие на исследованной территории за последние два десятилетия значительно сократилось. Более того, разрабатываются новые технологии по применению материала отвала фосфогипса.

2. Эмиссионное воздействие производства фосфорных удобрений может проявляться в воздействии на природную среду посредством выбросов в атмосферу, сбросов сточных вод и путём размещения опасных отходов. Технологические выбросы при производстве фосфорной кислоты включают фториды, фосфаты, пыль, кадмий, свинец, цинк и радионуклиды (образуются в ходе термического процесса производства). При производстве суперфосфата в атмосферу могут поступать и впоследствии осаждаться фториды, хлориды, соединения азота и пыль. При производстве комплексных удобрений в качестве загрязняющих веществ выделяют соединения азота, фториды и хлориды.

Отдельным источником загрязняющих веществ является отвал фосфогипса. Согласно данным литературы, основными загрязняющими веществами при воздействии отвала фосфогипса на прилегающие территории выступают стронций, фтор, фосфор и сера, а также природные радионуклиды.

3. Почвенный покров Кингисеппского месторождения фосфоритов значительно изменён в ходе хозяйственной деятельности человека. Естественные типы почв сменились техногенными поверхностными образованиями. На 3 пробных площадях месторождения остался естественный почвенный покров с зональными типами почв (дерново-подзолистая и подбур), во всех остальных посттехногенных экосистемах были реплантозёмы (последствие рекультивации). В качестве горизонтов реплантозёмов выделяют горизонты RAT и TCH.

Перемещение литогенного материала и размещение крупнотоннажных отходов привело к изменению рельефа и формированию перепадов высот до нескольких десятков метров. Согласно проведенным исследованиям, на территории месторождения действуют три процесса, меняющих естественную геохимическую обстановку: поступление загрязняющих веществ посредством выбросов при производстве фосфорной кислоты и фосфорных удобрений, аэрогенный перенос частиц фосфогипса на прилегающие ландшафты и влияние химического состава вскрышных пород, залегающих под значительной частью территории месторождения.

4. Изучено современное экологическое состояние почвенного покрова Кингисеппского месторождения фосфоритов широкой группой химических элементов. По степени антропогенного воздействия выделено три типа территорий — условно-фоновые (лесные и болотные экосистемы), рекультивированные отвалы вскрышных пород, а также крупные техногенные объекты – отвалы фосфогипса и хвостохранилище. Установлено, что на условно-фоновой территории встречаются превышения ПДК по меди, марганцу, никелю и цинку. На рекультивированных отвалах вскрышных пород есть превышения ПДК по марганцу, меди, цинку и свинцу. В почвах на отвале фосфогипса и хвостохранилище зафиксированы превышения ПДК по марганцу, меди, свинцу, никелю, хрому и цинку.

Низким варьированием (коэффициент вариации меньше 30 %) характеризуются барий и свинец; средним (коэффициент вариации 30–60 %) — кобальт, хром, железо, марганец, скандий, цинк; высоким (коэффициент вариации 60–100 %) — медь, никель, сурьма, ванадий; аномально высоким (коэффициент вариации больше 100 %) — кадмий и стронций. Установлено, что максимальное содержание валовых форм бария, кадмия, меди, никеля, сурьмы, стронция, ванадия, цинка характерно для почв, отобранных на отвале фосфогипса и хвостохранилище. В почвах техногенных объектов наблюдается также снижение количества органического вещества. Кобальт, марганец, свинец, скандий равномерно распространены по территории исследования.

Значения  $K_k$  максимального содержания химических элементов в почвах крупных техногенных объектов, рассчитанные по ОДК / ПДК, показали, что гигиенические нормативы превышены для ванадия — в 1,5 раза; меди и цинка — в 2 раза; кадмия — в 3 раза; никеля — в 5 раз; серы — в 7 раз. Средние значения содержания элементов в почвах техногенных объектов превышают гигиенические нормативы только для серы.

Коэффициенты концентрации средних и особенно максимальных содержаний элементов в почвах крупных техногенных объектов показывают, что значения зонального фона для большинства элементов значительно превышены. На условно-фоновой

территории зональный фон превышен по цинку в 1,2 раза, по фосфору в 1,3 раза, по фтору в 1,5 раза, по свинцу в 2,2 раза, по бария в 12 раз. ПДК на условно-фоновой территории превышена по сере в 7 раз.

В целом, если сравнивать, коэффициенты концентрации, рассчитанные по зональному фону (среднее) и южно-таежным почвам Баренцрегиона (медиана), совпадают по перечню элементов. Коэффициенты, превышающие единицу, рассчитанные и по зональному фону (среднее), и по южно-таежным почвам Баренцрегиона (медиана), наблюдаются для бария, кальция, фосфора, фтора, стронция. Процент подвижных форм возрастает с увеличением валовых содержаний. Малоподвижные (0–1 %) элементы отсутствуют, средняя подвижность (1–10 %) характерна для бария, свинца, никеля и цинк, повышенная (10–20 %) — для марганца и меди, высокоподвижные (более 20 %) элементы отсутствуют. Открытым остается вопрос о разработке экологических нормативов и установлении фоновых концентраций для разных регионов Российской Федерации.

В почвах лёгкого гранулометрического состава накапливаются стронций и фтор и подвижные формы никеля, а в почвах тяжёлого гранулометрического состава — подвижные формы бария. В квазизёмах накапливаются больше чем в других почвах кобальт, фтор, железо, марганец, фосфор и стронций, в торфяных почвах — сурьма, в литозёмах — барий, в текстурно-дифференцированных почвах — сера, в глеезёмах — хром, медь и скандий, а в альфегумусовых — свинец.

Химический состав почв на исследованной территории определяют четыре фактора — породный фактор (44 %), производство фосфорных удобрений (20 %), влияние вскрышных пород (14 %), поступление серы от отвала фосфогипса (7 %).

Проведённое исследование показало, что на Кингисеппском месторождении фосфоритов не наблюдается повышения активности природных радионуклидов, даже наоборот — активность некоторых радионуклидов меньше, чем на условно-фоновой территории. Все пробы имеют значение удельной эффективной активности менее 370 Бк/кг (допустимая удельная эффективная радиоактивность строительных материалов (таких как песок и щебень), используемых в жилищном строительстве), самое большое — 124 Бк/кг — на отвале фосфогипса. То есть, исследование показало безопасность и отвала фосфогипса, и почв, расположенных в зоне его влияния, в плане радиоактивного воздействия. Более того, стоит отметить, что в рассматриваемом районе ситуация наоборот — активность отдельных радионуклидов на территории месторождения ниже на 50-75%.

Воздействие производства фосфорных удобрений изменяет кислотность почв. Однако в мировой практике существуют различные тенденции: на предприятиях Испании

и Турции фосфогипс значительно подкисляет прилегающие к производствам почву; в Ливане, наоборот, – увеличивается рН почвы. На территории Кингисеппского месторождения фосфоритов показатель рН в среднем повышается на 2 ед. в сравнении с условно-фоновой территорией: как при водной вытяжке (актуальной кислотности), так и при солевой (потенциальной кислотности). Стоит отметить, что в тех регионах Мира, где фосфориты залегают рядом с известняками, наблюдалась та же ситуация – показатель рН почв повышался.  $pH_{вод}$  на условно-фоновой территории составил 5,3 ед. рН, а на территории месторождения  $pH_{вод}$  – 7,2 ед. рН.  $pH_{КСl}$  на условно-фоновой территории – 4,3 ед. рН, на территории месторождения – 6,6 ед. рН. Изменение реакции среды, в свою очередь, влияет на растительный покров, создавая благоприятные условия для развития видов, предпочитающих близкую к нейтральной реакцию среды.

5. Индикаторными элементами при оценке воздействия производства фосфорных удобрений на почвы могут быть: валовое содержание стронция, фтора и фосфора. Содержание фтора увеличивается в 3 раза в сравнении с условно-фоновой территорией, а водорастворимые формы аммонийные азота – в 4 раза. От отвала фосфогипса на прилегающие территории поступает стронций и фосфор. Содержание стронция отличается от условно-фоновой территории в 1,6 раз, а фосфора – в 4 раза в сторону увеличения.

Одним из наиболее значимых индикаторов производства фосфорных удобрений на исследуемой территории является коэффициент концентрации химических элементов, рассчитанный на основе регионального фона Баренцева региона для почв южной тайги.

6. Можно выделить пять стадий формирования елового сообщества на отвалах вскрышной породы Кингисеппского месторождения фосфоритов путём лесной рекультивации. Первая стадия – это нанесение грунта и засев многолетними травами для формирования устойчивого почвоподобного покрова. Вторая стадия представляет посадку лесных культур (в основном, на месторождении используется ель европейская *Picea abies*). Окончание второй стадии определяется выходом самых высоких особей в древесный ярус (более 6 м). Третья стадия формирования сообщества заключается в росте всех насаждений до уровня древостоя и в создании берёзово-елового или елово-берёзового леса, так как в возрасте ориентировочно 30 лет ель европейская на рекультивированных ею территориях может занимать до 50 % в составе древостоя. На четвёртой стадии ели вытесняют берёзы из состава сообщества, оставаясь почти единственным представителем древесного яруса, начиная формировать пятую стадию, которая ещё не представлена на исследованной территории, – мёртвопокровные ельники. В районе города Кингисепп на отвалах вскрышной породы ели достигают четвёртой

стадии ориентировочно к 40 годам. С точки зрения использования нарушенных территорий (таких как отвалы вскрышной породы), лесная рекультивация является оптимальным вариантом.

7. Метод корреляционных плеяд позволил выделить 15 групп растительности на основе встречаемости видов в геоботанических описаниях: из них 3 большие группы, включающие более 15 видов, и 12 малых групп – от 2 до 6 видов. Анализ этих групп показал, что сообщества на отвалах вскрышных пород и на отвале фосфогипса различаются с условно-фоновыми территориями только наличием ряда рудеральных видов. При этом сообщества, примыкающие к хвостохранилищу, отличались от условно-фоновых сильнее всего (например, наличием видов, которые встречаются только у хвостохранилища). Только в этих сообществах можно встретить *Thalictrum flavum*, *Matricaria chamomilla*, *Alopecurus pratensis*, *Bidens tripartita* и *Chenopodium album*. Отметим, что разнообразие почв, режима увлажнения и степени антропогенной трансформации приводит к пестроте видов, встречающихся рядом с хвостохранилищами.

Сообщества на отвалах отличаются от условно-фоновых территорий не столь явно. Выделены малые группы, характерные для различных условий – в целом, для всех техногенных объектов, конкретно для отвалов вскрышных пород, а также для определённых пород (мелколиственных или хвойных), вплоть до группы, встречающейся в 40-летних рекультивированных ельниках.

8. Как итог, можно сделать вывод, что территория, испытавшая воздействие производства фосфорных удобрений, характеризуется сменой естественных типов почв на техногенные поверхностные образования, содержащие в повышенном количестве стронций, фтор и фосфор. При условии залегания сырья под карбонатными породами происходит дополнительное воздействие, выражающееся в виде подщелачивания и увеличения валового железа, марганца и натрия в почве. Природно-антропогенные экосистемы, образующие почвенно-растительный покров месторождения фосфоритов после рекультивации, имеют значительные отличия от зональных условно-фоновых по причине обилия видов, устойчивых к химическому составу и свойствам реплантозёмов.

### **Благодарности**

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 20-35-90099 «Геоэкологическая оценка воздействия отвалов фосфогипса на окружающую среду и разработка оптимальных путей их рекультивации».

Исследование проведено при поддержке Ресурсного центра «Методы анализа вещества» Научного парка СПбГУ.

**Список использованных источников**

1. Абакумов Е.В. Регенерационное почвообразование в посттехногенных экосистемах карьерно-отвалных комплексов Северо-Запада России: автореф. дис. канд. биол. наук. : специальность 03.00.27 – Санкт-Петербург: СПбГУ, 2004. – 16 с.
2. Абакумов, Е. В. Гумусовое состояние почв заброшенных карьерно-отвалных комплексов Ленинградской области / Е. В. Абакумов, Э. И. Гагарина // Почвоведение. – 2008. – № 3. – С. 287-298.
3. Абрамов А.М., Галиев Р.С., Соболев Ю. Б. Организация производства РЗМ при комплексной переработке фосфогипса // Актуальные вопросы добычи, производства и применения редкоземельных элементов в России: материалы Всероссийской конференции по редкоземельным материалам «РЗМ-2013», 19–21 ноября 2013 г.: тезисы докладов / ред. Кербель Б. М.. – Северск : Изд-во СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – С.60–64.
4. Белобров В.П. Особенности биологической рекультивации отвала фосфогипса Балаковского филиала АО «Апатит» / Белобров В.П., Гребенников А.М., Куленкамп А.Ю., Ряшко А.И., Торочков Е.Л. // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2015. – №1. – С.20–25.
5. Бережная Н.П., Бережная В.П. Влияние осадков сточных вод и фосфогипса на свойства почвы и продуктивность озимой пшеницы // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2012. – №2. – С.27–29.
6. Беренштейн Ф.Я. К вопросу о влиянии солей стронция на углеводный обмен в организме животных // Доклады Национальной академии наук Беларуси. – 1961. – №7. – С.462.
7. Векшин А.К. Воздействие прекращения горных работ на гидролого- и гидрогеологические условия на территории ООО ПГ «Фосфорит» : выпускная квалификационная работа (бакалаврская работа) / РГГМУ. – СПб : РГГМУ, 2019. – 70 с.
8. Вода России // Научно-популярная энциклопедия. – URL: <https://www.water-ru.ru> (дата обращения: 25.09.2021).
9. Воропаева З.И., Троценко И.А., Парфенов А.И. Изменение свойств коркового солонца содового засоления при проведении однократной и повторной мелиорации фосфогипсом // Почвоведение. – 2011. – №3. – С.346–357.
10. Выханду Л.К. Об исследованиях многопризнаковых биологических систем // Применение математических методов в биологии / ред. Терентьев П.В.. – 1964. – №3.



11. Георгиевский А.Ф., Бугина В.М. Современное состояние и перспективы развития фосфатно–сырьевой базы России // Вестник РУДН. Инженерные исследования. – 2020. – №3. – С.197–207. – DOI 10.22363/2312–8143–2020–21–3–197–207 .
12. Горлов А.А., Кречетов П.П., Рогова О.Б. Изменение химического состава почв под влиянием фосфогипса // XXIII Международная научная конференция студентов, аспирантов и молодых ученых «Ломоносов-2016». – 2016. – С.106–107.
13. ГОСТ 17.4.3.01-2017. Межгосударственный стандарт. Охрана природы. Почвы. Общие требования к отбору проб.
14. ГОСТ 26427-85. Почвы. Метод определения натрия и калия в водной вытяжке.
15. ГОСТ 26428-85. Почвы. Методы определения кальция и магния в водной вытяжке.
16. ГОСТ Р 53219-2008. Определение содержания нитратного азота, аммонийного азота и общего азота в воздушно-сухих почвах с помощью хлорида кальция в качестве экстрагирующего вещества.
17. ГОСТ Р 54650-2011. Почвы. Определение подвижных соединений фосфора и калия по методу Кирсанова в модификации ЦИНАО.
18. Государственная геологическая карта России. ГГК-200. Лист О–35–V. Масштаб 1:200 000. Геологическая карта // ВСЕГЕИ. – URL: [www.geolkarta.ru/](http://www.geolkarta.ru/) (дата обращения: 25.11.2020).
19. Государственная геологическая карта России. ГГК–200. Лист О–35–V. Масштаб 1:200 000. Карта четвертичных отложений // ВСЕГЕИ. – URL: [www.geolkarta.ru/](http://www.geolkarta.ru/) (дата обращения: 25.11.2020).
20. Грибова С.А., Исаченко Т.И., Лавренко Е.М. Растительность Европейской части СССР . – СПб : Наука, 1980. – 236 с.
21. Дадали В.А., Судья Д.А., Иванова Л.В. Биохимические нарушения при хронической интоксикации солями стабильного стронция // Профилактическая и клиническая медицина. – 2014. – №4. – С.124–131.
22. Дмитракова Я.А., Абакумов Е.В. Восстановление почвенно–растительного покрова на участках рекультивации Кингисеппского месторождения фосфоритов // Почвоведение. – 2018. – №5. – С.630–640.
23. Дмитриев В.В., Фёдорова И.В., Бирюкова А.С. Подходы к интегральной оценке и ГИС-картографированию устойчивости и экологического благополучия геосистем. Часть IV. Интегральная оценка экологического благополучия наземных и водных экосистем // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Серия 7. Геология. География. – 2016. – №2. – С.37–53. – DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.204.

24. Докучаев В.В. К учению о зонах природы: Горизонтальные и вертикальные почвенные зоны . – СПб : тип. СПб. градоначальства, 1899. –28 с.
25. Елсукова Е.Ю. Загрязнение почв в зоне воздействия производства фосфорных удобрений / Елсукова Е.Ю., Недбаев И.С., Кузьмина Д.С. // Вестник Санкт-Петербургского государственного университета. Науки о Земле. – 2022. – №4. – С. 652-674 – doi: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.406>
26. Елсукова Е. Ю., Недбаев И. С. и Цывкунова Н. В. Воздействие добычи фосфоритов на кислотно–основные свойства почв // Экологическая деятельность и экологическое просвещение: региональный аспект : материалы Всероссийской научной конференции, Санкт–Петербург, 16 декабря 2020 года. – СПб. : ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2020. – С.55–59.
27. Елсукова Е.Ю. Загрязнение почв подвижными формами химических элементов в зоне воздействия производства фосфорных удобрений / Елсукова Е.Ю., Недбаев И.С., Кузьмина Д.С., Выдренкова А.С. // Материалы VII Международного симпозиума «Биокосные взаимодействия в природных и антропогенных системах». – СПб. : СПбГУ, 2022. – С.78–79.
28. Елсукова Е.Ю., Недбаев И.С. Комплексная и покомпонентная оценка природной среды, находящейся под воздействием добычи и переработки фосфатов // Актуальные вопросы устойчивого природопользования: научно–методическое обеспечение и практическое решение : Материалы международной научно–практической конференции, посвященной 60–летию НИЛ экологии ландшафтов факультета географии и геоинформатики БГУ, / ред. Воробьев Д.С.. – Минск : Белорусский государственный университет, 2022. – С.80–83.
29. Жукова А.Д., Хомяков Д.М. Экологическая оценка состояния почвенного покрова на участке промышленного района Московско–Окской эколого–экономической зоны // Вестник Московского университета. Серия 17: Почвоведение. – 2016. – №1. – С.18–25.
30. Заленский О.В., Корчагин А.А., Лавренко Е.М. Полевая геоботаника . – Москва–Ленинград : Издательство Академии наук СССР, 1959. – Т. 1 из 4. – 444 с.
31. Иванова В.В. Влияние фосфогипса на некоторые свойства воды реки Кубань // Экологический Вестник Северного Кавказа. – 2011. – № 7. – С.77–78.
32. Кабата-Пендиас А., Пендиас Х. Микроэлементы в почвах и растениях . – М.: Мир, 1989. – С.439.

33. Касимов А.М., Решта Е.Е. Комплексная переработка фосфогипса из отвалов и отходов текущего производства минеральных удобрений ОАО «Ровноазот» // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. – 2013. – №3. – С.213–217.
34. Кизинек С.В., Шеуджен А.Х., Аканова А.Н. Экологические и агроэкономические аспекты применения фосфогипса в сельском хозяйстве // *XXI век: итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. – 2013. – №9. – С.206–216.
35. Климатическое районирование России // *Национальный атлас России*. – 2004. – Т. 2. – URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/146–150.html> (дата обращения: 25.12.2020).
36. Коробанова Т.Н. Российский и зарубежный опыт утилизации фосфогипса // *Наука вчера, сегодня, завтра*. – 2016. – №11. – С.63–71.
37. Кушнир Е.А., Недбаев И.С., Трещевская Э.И. Оценка состояния лесных насаждений и почвенного покрова на участках рекультивации Кингисеппского месторождения фосфоритов // *Труды Санкт–Петербургского научно–исследовательского института лесного хозяйства*. – 2021. – №3. – С.68–80. – doi: 10.21178/2079–6080.2021.1.68.
38. Луга // *Большая российская энциклопедия*. – URL: <https://bigenc.ru/geography/text/5728357> (дата обращения: 25.01.2021).
39. Материалы по оценке воздействия на окружающую среду новой технологии «Производство и применение Рекультиванта на основе фосфогипса нейтрализованного» ООО «ПГ «Фосфорит». – М.: ООО «Центр экотестирования исследований «ЭПИцентр»», 2021. – 324 с.
40. Мезева А.А. К вопросу безопасности использования отходов промышленности в строительстве автомобильных дорог // *Материалы Международного Экологического Форума «Природные ресурсы Сибири и Дальнего Востока – взгляд в будущее»* (Россия, Кемерово, 19 – 21 ноября 2013 г.) в 2–х т. Т. 2 / ред. Галанина Т.В. и Баумгартэн М.И.. – Кемерово: КузГТУ, 2013. – С.63–66.
41. Мельникова А.Д., Хомяков Д.М. Загрязнение почвенного покрова в импактной зоне предприятий по производству комплексных минеральных удобрений // *Сборник научных трудов международных семинаров, проведенных в рамках Российско–Финляндского проекта «Чистые реки – в здоровое Балтийское море» SE 717 в 2013–2015 годах* / ред. Минин В.Б.. – СПб.: Негосударственное образовательное учреждение «Институт агробизнеса, экономики и права», 2016. – С.73–75.

42. М–МВИ–80–2008 Методика выполнения измерений массовой доли элементов в пробах почв, грунтов и донных отложениях методами атомно–эмиссионной и атомно–абсорбционной спектрометрии.
43. МП ВСЕГЕИ N 10/2010 «Определение макро и микроэлементов (в том числе редкоземельных) методом масс–спектрометрии с индуктивно–связанной плазмой в горных породах, почвах и рыхлых отложениях».
44. Найманбаев М.А. Извлечение РЗЭ из фосфогипса от переработки фосфоритов Каратау / Найманбаев М.А., Лохова Н.Г., Балтабекова Ж.А., Дукембаева, А.Ж // Актуальные вопросы добычи, производства и применения редкоземельных элементов в России: материалы Всероссийской конференции по редкоземельным материалам «РЗМ–2013», 19–21 ноября 2013 г.: тезисы докладов / ред. Кербель Б.М.. – Северск: Изд–во СТИ НИЯУ МИФИ, 2013. – С.60–64.
45. Наследов А.Д. Математические методы психологического исследования. Анализ и интерпретация данных. Учебное пособие . – СПб.: Речь, 2007. – 392 с.
46. Неведров Н.П., Проценко Е.П., Глебова И.В. Соотношение содержания валовых и подвижных форм тяжелых металлов в почвах Курска // Почвоведение. – 2018. – №1. – С.111–117.
47. Недбаев И.С. Изучение последствий рекультивации: характеристики березовых сообществ на техногенных объектах Кингисеппского месторождения фосфоритов / Недбаев И.С., Кушнир Е.А., Елсукова Е.Ю., Трещевская Э.И. // Материалы IV Всероссийской научной конференции с международным участием «Научные основы устойчивого управления лесами». – М.: ЦЭПЛ РАН, 2020. – С.205–208.
48. Недбаев И.С., Елсукова Е.Ю. Изучение мирового и российского опыта по разработке оптимальных путей рекультивации нарушенных земель // Вестник евразийской науки. – 2021. – №6. – EDN АПСР.
49. Недбаев И.С., Цывкунова Н.В., Елсукова Е.Ю. Обзор российского и мирового опыта решения экологических проблем производства, хранения, переработки и использования фосфогипса // Вестник евразийской науки. – 2022. – №4. – С.10.
50. Недбаев И.С., Цывкунова Н.В., Кузьмина Д.С. Геохимические особенности формирования маломощных почв в районе воздействия Кингисеппского месторождения фосфоритов // Материалы Международной научной конференции Лицейские чтения «Шаг в будущее: современное студенчество как творческий, научный и профессиональный потенциал России». – СПб.: ЛГУ им. А.С. Пушкина, 2021. – С.52–53.

51. Нешатаев Ю.Н. Методы анализа геоботанических материалов . – Л.: Изд-во ЛГУ, 1987. – 192 с.
52. Нешатаев Ю.Н. Опыт применения перфокарт для анализа сообществ лесостепных дубрав // Ботанический журнал. – 1968. – №4.
53. Нешатаев Ю.Н. Простейшие алгоритмы для вычисления коэффициента межвидовой сопряженности Бравэ для целей классификации растительности // Ботанический журнал. – 1976. – №5.
54. О состоянии и использовании минерально-сырьевых ресурсов в Российской Федерации в 2019 году : Государственный доклад / Министерство природных ресурсов и экологии РФ. – М.: Минприроды, 2020. – URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (дата обращения: 25.02.2021).
55. Об утверждении приоритетных направлений развития науки, технологий и техники в Российской Федерации и перечня критических технологий Российской Федерации : Указ Президента Российской Федерации от 7 июля 2011 г. N 899 // Информационно-правовой портал «Гарант». – URL: <https://base.garant.ru/55171684/> (дата обращения: 17.05.2023).
56. Опекунова М.Г. Методы физико-химического анализа почв и растений: Методические указания / Опекунова М.Г., Арестова И.Ю., Елсукова Е.Ю., Шейнерман Н.А. – СПб : Изд-во С.-Петер. ун-та, 2014. – 70 с.
57. Опекунова М.Г., Муратова Э.Э. Применение метода корреляционных плеяд для оценки трансформации природных комплексов в зоне воздействия Башкирского медно-серного комбината // Вестник СПбГУ. Науки о Земле. – 2005. – №2. – С.51–66.
58. Паспорт научной специальности ВАК 25.00.36 «Геоэкология» // ВАК. – URL: <http://arhvak.minobrnauki.gov.ru/316> (дата обращения: 25.03.2021).
59. Петренко Д.В., Белюченко И.С. Влияние отходов Белореченского химзавода на содержание стронция в окружающих ландшафтах // Экологический вестник Северного Кавказа. – 2012. – №1. – С.4–79.
60. Плеханова В.А. Проблема нормирования содержания кадмия в почве // Вестник Казанского государственного энергетического университета. – 2010. – №2. – С.55–59.
61. Прогноз погоды // World Weather. – URL: <https://worldweather.ru/archive/russia/kingisepp/> (дата обращения: 25.04.2021).

62. Проект QGIS // Официальный сайт. – URL: <https://qgis.org/ru/site/> (дата обращения: 22.09.2021).
63. Разработка Программы создания и ведения ММТПИ и согласование её с территориальным органом государственного водного надзора. Проведение работы по мониторингу на территории отработанных карьеров ООО «ПГ «Фосфорит» / ЦНЭЭ СПб НЦ РАН. – СПб : ЦНЭЭ СПбНЦ РАН, 2009.
64. Раменский Л.Г. Экологическая оценка кормовых угодий по растительному покрову / Раменский Л.Г., Цаценкин И.А., Чижиков О.Н., Антипин Н.А. – М.: Государственное издательство сельскохозяйственной литературы, 1956. – 240 с.
65. Растворова О.Г. Химический анализ почв: Учебное пособие / Растворова О.Г., Андреев Д.П., Гагарина Э.И., Касаткина Г.А., Федорова Н.Н. – СПб., Издательство С.-Петербургского университета, 1995. – 264 с.
66. Растительность России // Национальный атлас России. – 2004. – Т.2. – URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/328–330.html> (дата обращения 25.04.2021).
67. Руководство по охране окружающей среды, здоровья и труда для производства фосфорных удобрений // IFC. Международная финансовая корпорация. – 2013. – URL: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/edef4856–b62f–4005–936519c581a3e072/Phosphate%2BFertilizer%2BPlants%2B–%2BRussian%2B%2BFinal.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jkD2EM1&ContentCache=NONE&CACHE=NONE> (дата обращения: 22.03.2021).
68. Сает Ю.Е., Ревич Б.А., Янин Е.П. Геохимия окружающей среды. – М.: Недра, 1990. – 335 с.
69. Самонов А.Е., Мелентьев. Г.Б., Ваньшин Ю.В. Экологическое воздействие хранилищ фосфогипса и пиритных огарков на среду обитания и перспективы их комплексной переработки с получением высоколиквидной товарной продукции // Экология промышленного производства. – 2008. – №2. – С.65–76.
70. СанПиН 1.2.3685–21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.
71. Сенькин О. В. Ландшафтно-экологическое картографирование и экологическая оценка нарушенных территорий с применением методов биоиндикации : Учебно-методическое пособие / О. В. Сенькин, М. Г. Опекунова, В. М. Щербаков. – Санкт-Петербург : Издательство Санкт-Петербургского государственного университета, 2000. – 68 с.
72. Сердюкова А.Ф., Барабанщиков Д.А. Последствия загрязнения почвы тяжелыми металлами // Молодой учёный. – 2017. – Т.51. – С.131–135.

73. Судья Д.А., Ластков Д.О. Проблема токсического действия солей стабильного стронция на организм // Украинский журнал современных проблем токсикологии. – 2013. – №3. – С.55–60.
74. Сухачева, Е. Ю. Типология антропогенно-измененных СПП / Е. Ю. Сухачева, Б. Ф. Апарин // Почвы в биосфере : Сборник материалов Всероссийской научной конференции с международным участием, посвященной 50-летию Института почвоведения и агрохимии СО РАН, Новосибирск / Ответственный редактор А.И. Сысо. Том 2. – Новосибирск: Национальный исследовательский Томский государственный университет, 2018. – С. 434-438.
75. Тарчигина Н.Ф., Карабаев. Г.В., Капранова М.П. Экологические проблемы в производстве фосфорной кислоты // Вестник Московского Государственного открытого университета. Москва. серия: техника и технология. – 2011. – №3. – С.60–63.
76. Терентьев В.П. Метод корреляционных плеяд // Вестник Ленинградского университета. – 1959. – №9.
77. Уразаев Н.А., Бакулин А.А., Никитин А.В. Сельскохозяйственная экология. – М.: Колос, 2000. – 304 с.
78. ФР.1.38.2011.10712. Методика измерений удельной активности природных радионуклидов, цезия–137, стронция–90 в пробах объектов окружающей среды и продукции промышленных предприятий с применением спектрометра–радиометра гамма– и бета–излучений и гамма–спектр.
79. ФР.1.39.2007.03222. Биологические методы контроля. Методика определения токсичности воды и водных вытяжек из почв, осадков сточных вод, отходов по смертности и изменению плодовитости дафний.
80. Черныш Е.Ю., Пляцук Л.Д. Исследование эффективности биосульфидной обработки осадков городских сточных вод // Вісник Сумського державного університету. Серія Технічні науки. – 2012. – №4. – С.168–179.
81. Чугунов А.А., Макаров В.Д. Способ получения комплексного азотно–фосфорно–сульфатного удобрения из фосфогипса (варианты) : патент : RU 2478599 С1. – Россия, 10.04.2013.
82. Шершнёв О.В. Оценка воздействия отходов фосфогипса на компоненты окружающей среды // Экологический вестник. – 2016. – №2. – С.97–103.
83. Яковлев А.С., Каниськин М.А., Терехова В.А. Экологическая оценка почвогрунтов, подверженных воздействию фосфогипса // Почвоведение. – 2013. – №6. – С.737. – DOI 10.7868/S0032180X13060130.

84. Янин Е.П. Скандий в окружающей среде (распространенность, техногенные источники, вторичные ресурсы) // Проблемы окружающей среды и природных ресурсов. – 2007. – №8. – С.70–90.
85. Яшин С.О. Технология и свойства модифицированных фосфогипсом битумоминеральных композиций : автореф. дис. канд. техн. наук / Северо–Кавказский Федеральный университет: Северо–Кавказский Федеральный университет, 2013.
86. Al-Hwaiti M., Al-Khashman O. Health risk assessment of heavy metals contamination in tomato and green pepper plants grown in soils amended with phosphogypsum waste materials // *Environmental Geochemistry Health*. – 2015. – Vol.37. – P.287–304. – DOI 10.1007/s10653-014-9646-z.
87. Andersson M. Bacteria, molds, and toxins in water-damaged building materials / Andersson M., Nikulin M., Kõljalg U., Andersson M., Rainey F., Reijul K., Hintikka E., Salkinoja-Salonen M. // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1997. – Т.63. – С.387–393.
88. Aoun M. Releases of phosphate fertilizer industry in the surrounding environment: investigation on heavy metals and polonium-210 in soil / Aoun M., El Samrani A.G., Lartiges B.S., Kazpard V., Saad Z. // *Journal of environmental sciences*. – 2010. – Т.22.– P.1387–1397. – doi: 10.1016/S1001-0742(09)60247-3.
89. Arocena J.M., Rutherford P.M., Dudas M.J. Heterogeneous distribution of trace elements and fluorine in phosphogypsum by-product // *The Science of the Total Environment*. – 1995. – Т.162. – P.149–160.
90. Azouazi M. Natural radioactivity in phosphates, phosphogypsum and natural waters in Morocco / Azouazi M., Ouahidi Y., Said F., Andres Y. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2001. – №2. – P.231–42. – DOI:10.1016/S0265-931X(00)00153-3.
91. Betti M. Results of the European Commission Marina II Study Part II – Effects of discharges of naturally occurring radioactive material / Betti M., Aldave De Las Heras L., Janssens A., Henrich E., Hunter G., Gerchikov M., Dutton M., Van Weers A.W., Nielsen S., Simmonds J., Bexon A., Sazykina T. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2004. – Т.74. – P.255–277.
92. Binnemans K. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review / Binnemans K., Jones P. T., Blanpain B., Van Gerven T., Pontikes Y. // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – Т.99. – P.17–38.



93. Bolívar J., García-Tenorio R., Más J. Radioactivity of Phosphogypsum in South-West of Spain // *Radiation Protection Dosimetry*. – 1998. – T.76. – P.185–189. – DOI:10.1093/OXFORDJOURNALS.RPD.A032263.
94. Carbonell-Barrachina A., DeLauneb R. D., Jugsujindab A. Phosphogypsum chemistry under highly anoxic conditions // *Phosphogypsum chemistry under highly anoxic conditions*. – 2002. – T.22. – P.657–665.
95. Dartan G., Taşpınar F., Toroz I. Analysis of fluoride pollution from fertilizer industry and phosphogypsum piles in agricultural area // *Journal of Industrial Pollution Control*. – 2017. – №1. – P.662–669.
96. Degirmenci N., Okucu A., Turabi A. Application of phosphogypsum in soil stabilization // *Building and Environment*. – 2007. – T.42. – P.3393–3398.
97. Dueñas C. Exhalation of (222)Rn from phosphogypsum piles located at the Southwest of Spain / Dueñas C., Liger E., Cañete S., Pérez M., Bolívar J. P. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2007. – T.95. – P.63–74. – doi: 10.1016/j.jenvrad.2007.01.012.
98. Elbaz-Poulichet F. Metal biogeochemistry in the Tinto–Odiel rivers (Southern Spain) and in the Gulf of Cadiz: A synthesis of the results of TOROS project / Elbaz-Poulichet F., Braungardt C., Achterberg E., Morley N., Cossa D., Beckers J.-M., Nomérange P., Cruzado A., Leblanc M. // *Continental Shelf Research*. – 2001. – T.21. – P.1961–1973.
99. Gaudry A. Heavy Metals Pollution of the Atlantic Marine Environment by the Moroccan Phosphate Industry, as Observed through their Bioaccumulation in *Ulva Lactuca* / Gaudry A., Zeroual S., Gaie-Levrel F., Moskura M. // *Water Air and Soil Pollution*. – 2007. – №1. – P.267–285. – DOI:10.1007/s11270-006-9196-9.
100. Gezer F. Natural radionuclide content of disposed phosphogypsum as TENORM produced from phosphorus fertilizer industry in Turkey / Gezer F., Turhan S., Uğur F., Gören E. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2012. – T.50. – C.33–37. – DOI:10.1016/j.anucene.2012.07.018.
101. Mousa S., Hanna A. Synthesis of nano-crystalline hydroxyapatite and ammonium sulfate from phosphogypsum waste // *Materials Research Bulletin*. – 2015. – T.48. – C.823–828.
102. Nedbaev I.S. Forest recultivation of overburden dumps of the Kingisepp phosphorite field / Nedbaev I.S., Elsukova E.Yu., Kushnir E.A., Treschevskaya E.I. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – T.875. – C.012029. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012029>.

103. Nedbaev I.S., Elsukova E.Yu. Geochemical features of the accumulation of phosphorus and fluorine in soils in the zone of influence of the phosphogypsum dump // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геохимия окружающей среды»*. – М.: Всероссийский научно–исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, 2022. – С.74.
104. Nedbaev I.S., Elsukova E.Yu., Chunyaeva E.O. Geocological assessment of the impact of phosphate fertilizer production on taiga soils // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*. – 2023.
105. Nielsen K. Production of mycotoxins on artificially inoculated building materials / Nielsen K., Thrane U., Larsen T. O., Nielsen P., Gravesen S. // *Chemistry*. – 1998.
106. Nortcliff S. Standardisation of soil quality attributes // *Agriculture, Ecosystems and Environment*. – 2002. – Т.88. – P.161–168.
107. Papaslioti E.-M. Stable isotope insights into the weathering processes of a phosphogypsum disposal area / Papaslioti E.-M., Pérez-López R., Parviainen A., Macías F., Delgado Huertas A., Garrido C. J., Marchesi C., Nieto J. // *Water Research*. – 2018. – Т.140. – P.344–353. – doi: 10.1016/j.watres.2018.04.060.
108. Production of phosphoric acid worldwide // *Statista*. – URL: <https://www.statista.com/statistics/1289301/global-phosphoric-acid-production-by-region/> (дата обращения: 21.09.2021).
109. Rutherford P.M., Dudas M., Samek R. Environmental impacts of phosphogypsum // *Science of The Total Environment*. – 1994. – Т.149. – P.1–38. – DOI:10.1016/0048-9697(94)90002-7.
110. Saadaoui E. Phosphogypsum: potential uses and problems – a review / Saadaoui E., Ghazel N., Romdhane C., Massoudi N. // *International Journal of Environmental Studies*. – 2017. – doi: 10.1080/00207233.2017.1330582.
111. Salminen R., Chekushin V., Bogatyrev I. Geochemicals atlas of eastern Barents region // *Journal of Geochemical Exploration*. – 2004. – Т.83.
112. Saueia C.H.R., Mazzilli B.P. Distribution of natural radionuclides in the production and use of phosphate fertilizers in Brazil // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2006. – Т.89. – P.229–239.
113. Shen W. Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material / Shen W., Zhou M., Ma W., Hu J., Cai Z. // *Journal of Hazardous Materials*. – 2009. – Т.164. – P.99–104.
114. Shen W., Zhou M., Zhao Q. Study on lime–fly ash–phosphogypsum binder // *Construction and Building Materials*. – 2007. – Т.21. – P.1480–1485.

115. Shirakawa M. A. Susceptibility of phosphogypsum to fungal growth and the effect of various biocides / Shirakawa M. A., Selmo S., Cincotto M. A., Gaylarde G., Brazolin S., Gambale W. // *International Biodeterioration & Biodégradation*. – 2002. – Vol.49. – P.293–298.
116. Silva L. A review on the environmental impact of phosphogypsum and potential health impacts through the release of nanoparticles / Silva L., Oliveira M., Crissien T., Santosh M. // *Chemosphere*. – 2022. – DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.131513.
117. Sousa A. Validation of avoidance assays for the screening assessment of soils under different anthropogenic disturbances / Sousa A., Pereira R., Antunes S. C., Cachada A., Pereira E., Duarte A. C., Gonçalves F. // *Ecotoxicol Environ Safety*. – 2008. – №3. – P.661–70. – DOI: 10.1016/j.ecoenv.2008.02.004.
118. Tayibi H. Environmental impact and management of phosphogypsum / Tayibi H., Mohamed C., López F., Alguacil F., López-Delgado A. // *Journal of environmental management*. – 2009. – T.90. – P.2377–2386. – doi: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007.
119. Wang M. Distribution, health risk assessment, and anthropogenic sources of fluoride in farmland soils in phosphate industrial area, southwest China / Wang M., Li X., He W., Li J., Zhu Y., Liao Y., Yang J., Yang X. // *Environmental Pollution*. – 2019. – T.249. – doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.044.

## ПРИЛОЖЕНИЕ

Приложение 1. Местоположение отбора почвенных проб.

Название почвенной пробы	Широта	Долгота
Болото 1	59,3518	28,4393
Болото 2	59,35	28,4397
Болото 3	59,415833	28,304272
Болото 4	59,415567	28,306625
Лес 1-1	59,4149	28,3658
Лес 1-2-1	59,4125	28,3629
Лес 1-2-2	59,4125	28,3629
Лес 1-3-1	59,4098	28,3596
Лес 1-3-2	59,4098	28,3596
Лес 2-1-1	59,3956	28,377
Лес 2-1-2	59,3956	28,377
Лес 2-2	59,394	28,3728
Лес 2-3-1	59,3922	28,3731
Лес 2-3-2	59,3922	28,3731
Лес 3-1	59,383406	28,372594
Лес 3-2-1	59,383831	28,373281
Лес 3-2-2	59,383831	28,373281
Лес 3-3-1	59,384414	28,373919
Лес 3-3-2	59,384414	28,373919
Лес 4-1	59,4556	28,503153
Лес 4-2-1	59,456061	28,504994
Лес 4-2-2	59,456061	28,504994
Лес 4-2-3	59,456061	28,504994
Лес 4-3-1	59,457339	28,507186
Лес 4-3-2	59,457339	28,507186
Лес 4-3-3	59,457339	28,507186
Лес у дороги	59,381386	28,374075
Отвал 1-1	59,3859	28,444
Отвал 1-2	59,386	28,447
Отвал 1-3	59,3851	28,4465
Отвал 1-4	59,3825	28,4339
Отвал 1-5	59,3851	28,4454
Отвал 1-6	59,3839	28,4376
Отвал 2-1-1	59,3751	28,4337
Отвал 2-1-2	59,3751	28,4337
Отвал 2-2-1	59,3745	28,4317
Отвал 2-2-2	59,3745	28,4317
Отвал 3-1-1	59,3762	28,4373
Отвал 3-1-2	59,3762	28,4373
Отвал 3-2-1	59,374	28,436
Отвал 3-2-2	59,374	28,436
Отвал 4-1	59,3709	28,4402
Отвал 4-2	59,3695	28,4434

Название почвенной пробы	Широта	Долгота
Отвал 4-3-1	59,3664	28,44
Отвал 4-3-2	59,3664	28,44
Отвал 4-4	59,3643	28,4436
Отвал 4-5-1	59,3626	28,436
Отвал 4-5-2	59,3626	28,436
Отвал 4-6	59,3612	28,4403
Отвал 4-7-1	59,3594	28,4376
Отвал 4-7-2	59,3594	28,4376
Отвал 5-1	59,389047	28,430717
Отвал 5-2-1	59,386592	28,423419
Отвал 5-2-2	59,386592	28,423419
Отвал 5-2-3	59,386592	28,423419
Отвал 5-3-1	59,379261	28,426392
Отвал 5-3-2	59,379261	28,426392
Отвал 5-4	59,383939	28,426844
Отвал 5-5	59,383048	28,427709
Отвал 6-1	59,376239	28,459803
Отвал 6-2	59,3732	28,458961
Отвал 6-3	59,369242	28,458392
Отвал 6-4	59,365314	28,458369
Отвал 6-5	59,362331	28,459469
Ферма-1	59,4125	28,3629
Ферма-2	59,4125	28,3629
Фосфогипс 1	59,3906	28,4393
Фосфогипс 2	59,3914	28,4375
Фосфогипс 3	59,3916	28,4381
Фосфогипс 3-1	59,393197	28,435608
Фосфогипс 3-1	59,393197	28,435608
Фосфогипс 3-2	59,393006	28,435164
Фосфогипс 4	59,3931	28,435
Фосфогипс 5	59,392	28,4373
Фосфогипс 6	59,3916	28,4366
Хвост 1	59,3994	28,4342
Хвост 2	59,3919	28,4262
Хвост 4	59,391783	28,426108
Хвост 5-1	59,400986	28,406318
Хвост 5-2	59,400986	28,406318
Хвост 6-1	59,402623	28,404475
Хвост 6-2	59,402623	28,404475
Хвост3-1	59,403514	28,406053
Хвост3-2	59,403514	28,406053

## Приложение 2. Типы почв и растительные сообщества на пробных площадях

Название точки	Почва	Растительное сообщество
Болото 1	Олиготрофно-торфяная почва	Ерниково-ивово-тростниковое сфагновое с примесью сосны
Болото 2	Олиготрофно-торфяная почва	Ерниково-ивово-тростниковое сфагновое с примесью сосны
Болото 3	Эфтрофно-торфяная почва	Пырейно-сфагновое с примесью сосны
Болото 4	Олиготрофно-торфяная почва	Бруснично-сфагновое с примесью сосны и осины
Лес 1-1	Глеезём серогумусовый	Берёзовое кислично-купыре-таволговое зеленомошное
Лес 1-2	Глеезём серогумусовый	Берёзовое вейниково-хвощовое
Лес 1-3	Глеезём серогумусовый	Берёзовое вейниково-зеленомошное
Лес 2-1	Глеезём серогумусовый	Вейниковый луг
Лес 2-2	Литозём серогумусовый	Ольховосерое таволговое
Лес 2-3	Литозём серогумусовый	Еловое кислично-зеленомошное
Лес 3-1	Глеезём серогумусовый	Осиново-берёзово-еловое кислично-таволгово-зеленомошное
Лес 3-2	Дерново-подбур	Еловое кислично-зеленомошное
Лес 3-3	Дерново-подбур иллювиально-железистый	Еловое вейниково-зеленомошное
Лес 4-1	Олиготрофно-торфяная почва	Ивовое вейниково-сфагновое
Лес 4-2	Перегноино-глеевая почва	Ольховосерое паслёно-вейниково-зеленомошное
Лес 4-3	Дерново-подбур	Ольховосерое вейниково-таволгово-зеленомошное
Лес у дороги	Дерново-подбур иллювиально-гумусовый грубогумусированный	Еловое кислично-чернично-зеленомошное
Отвал 1-1	Реплантозём	Еловое
Отвал 1-2	Реплантозём	Смешанный лес
Отвал 1-3	Реплантозём	Сосновое
Отвал 1-4	Реплантозём	Смешанный лес
Отвал 1-5	Реплантозём	Лиственнное
Отвал 1-6	Реплантозём	Берёзовое
Отвал 2-1	Реплантозём	Берёзово-еловое золотарниково-клеверо-вейниково-зеленомошное
Отвал 2-2	Реплантозём	Осиновое вейниковое
Отвал 3-1	Реплантозём	Берёзовое вейниково-снытево-щучковое зеленомошное
Отвал 3-2	Реплантозём	Осиново-берёзово-ивовое разнотравно-зеленомошное
Отвал 4-1	Реплантозём	Еловое вейниково-зеленомошное
Отвал 4-2	Реплантозём	Ивовое землянично-зеленомошное
Отвал 4-3	Реплантозём	Еловое мать-и-мачеховое

Название точки	Почва	Растительное сообщество
		зеленомошное
Отвал 4-4	Реплантозём	Елово-берёзовое луговико-вейниково-тысячелистниковое зеленомошное
Отвал 4-5	Реплантозём	Берёзовое чино-вейниковое зеленомошное
Отвал 4-6	Реплантозём	Еловое вейниково-чиновое
Отвал 4-7	Реплантозём	Ивовое чиновое
Отвал 5-1	Реплантозём	Ивовое вейниково-кипрейное
Отвал 5-2	Реплантозём	Осиновое пырейно-вейниковое
Отвал 5-3	Реплантозём	Сосново-еловое щитовниково-вейниково-сфагновое
Отвал 5-4	Реплантозём	Еловое снытево-зеленомошное
Отвал 5-5	Реплантозём	Еловое снытево-вейниково-зеленомошное
Отвал 6-1	Реплантозём	Сосновое снытево-зеленомошное
Отвал 6-2	Реплантозём	Еловое печёночно-зеленомошное
Отвал 6-3	Реплантозём	Сосново-еловое вейниково-грушанко-зеленомошное
Отвал 6-4	Реплантозём	Ивово-берёзово-еловое мать-и-мачехо-грушанково-зеленомошное
Отвал 6-5	Реплантозём	Ивово-берёзово-осиновое землянично-вейниково-зеленомошное
Ферма	Дерново-подзолистая	Снытево-боро-ежовое
Фосфогипс 1	Реплантозём	Осиновое
Фосфогипс 2	Реплантозём	Сосновое
Фосфогипс 3	Реплантозём	Отсутствует
Фосфогипс 3-1	Реплантозём	Отсутствует
Фосфогипс 3-2	Реплантозём	Отсутствует
Фосфогипс 4	Реплантозём	Осиновое щучковое
Фосфогипс 5	Реплантозём	Отсутствует
Фосфогипс 6	Реплантозём	Полынно-кипрейное
Хвост 1	Реплантозём	Ивовое крапиво-зеленомошное
Хвост 2	Реплантозём	Берёзовое грушанко-кипрейно-вейниковое
Хвост 3	Подбур иллювиально-гумусовый глееватый	Ольхово-вязо-ивовое снытевое
Хвост 4	Реплантозём	Берёзовое грушанко-кипрейно-вейниковое
Хвост 5	Дерново-подбур	Ивовое таволго-кипрейное
Хвост 6	Агрозём альфегумусовый глеевый	Ольховосерое снытевое

## Приложение 3. Описание почвенных разрезов по ГОСТ 17.4.4.02-2017.

1 Разрез N 1

2 Адрес: Ленинградская область, Кингисеппский район, Большелуцкое сельское поселение, рекультивированные карьеры вскрышной породы.

3 Общий рельеф: вершина отвала вскрышной породы.

4 Микрорельеф: обломки горной породы.

5 Растительный покров: берёзово-еловое золотарниково-клеверо-вейниковое зеленомошное сообщество.

6 Угодье и его культурное состояние: земли лесного фонда, защитные полосы автодорог.

7 Признаки заболоченности, засоленности и другие характерные особенности отсутствуют.

8 Уровень почвенно-грунтовых вод не вскрыт.

9 Материнская и подстилающая порода: доломиты и известняки.

10 Название почвы: реплантозём на отвале вскрышных пород.

Горизонт и мощность, см	Описание разреза: механический состав, влажность, окраска, структура, плотность, новообразования, включения, характер перехода горизонта и другие особенности	Глубина взятия образцов, см
W (0 – 8 см)	буро-серый, рыхлый, органические остатки, переход ясный, граница ровная.	0 – 8 см
R	плотная порода: вскрышные породы (известняки и доломиты волховской и обуховской свит) или фосфогипс	-



1 Разрез N 2

2 Адрес: Ленинградская область, Кингисеппский район, Большелуцкое сельское поселение, фермерское хозяйство.

3 Общий рельеф: речная терраса.

4 Микрорельеф: кочки.

5 Растительный покров: снытево-боро-ежовое сообщество.

6 Угодье и его культурное состояние: земля сельскохозяйственного назначения, зона фермерского хозяйства.

7 Признаки заболоченности, засоленности и другие характерные особенности отсутствуют.

8 Уровень почвенно-грунтовых вод не вскрыт.

9 Материнская и подстилающая порода: флювиогляциальные отложения.

10 Название почвы: дерново-подзолистая почва среднemocная неглубокоподзолистая легкосуглинистая со слаборазвитым профилем на флювиогляциальных отложениях.

Горизонт и мощность, см	Описание разреза: механический состав, влажность, окраска, структура, плотность, новообразования, включения, характер перехода горизонта и другие особенности	Глубина взятия образцов, см
AУ (0 – 12 см)	светло-серый, уплотнённый, легкосуглинистый, мелкокомковатый, свежий, с ходами дождевых червей, присутствуют светлые зёрна минералов, включения крупных корней и гальки, переход заметный, граница волнистая	0 – 12 см
EL (12 – 15 см)	белый, уплотнённый, легкосуглинистый, плитчатый, свежий, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней и гальки, переход заметный, граница волнистая	-
BEЛ (15 – 17 см)	светло-бурый, уплотнённый, легкосуглинистый, плитчатый, свежий, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней и гальки, переход заметный, граница карманная	-
BT (17 – 28 см)	бурый, тяжелосуглинистый, орехово-призматический, свежий, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней и гальки, переход заметный	17 – 28 см
BC (более 28 см)	серый, тяжелосуглинистый, бесструктурный, свежий, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней и гальки	-

1 Разрез N 3

2 Адрес: Ленинградская область, Кингисеппский район, Большелуцкое сельское поселение, болото Пятницкий мох.

3 Общий рельеф: понижение на речной террасе.

4 Микрорельеф: кочки.

5 Растительный покров: сосновое ерничково-ивово-тростниковое сфагновое сообщество.

6 Угодье и его культурное состояние: земли лесного фонда, запретные полосы лесов, расположенные вдоль водных объектов.

7 Признаки заболоченности, засоленности и другие характерные особенности: заболоченность.

8 Уровень почвенно-грунтовых вод: 9 см.

9 Материнская и подстилающая порода: торф.

10 Название почвы: олиготрофно-торфяная почва сфагновая.

Горизонт и мощность, см	Описание разреза: механический состав, влажность, окраска, структура, плотность, новообразования, включения, характер перехода горизонта и другие особенности	Глубина взятия образцов, см
ТО (0 – 50 см)	светло-коричневый, сырой, состоит преимущественно из остатков сфагновых мхов разной степени разложения, не превышающей 50%, переход постепенный	0 – 50 см
ТТ (более 50 см)	коричневый, сырой (под водой), состоит преимущественно из остатков сфагновых мхов разной степени разложения, не превышающей 50%	-

1 Разрез N 4

2 Адрес: Ленинградская область, Кингисеппский район, Большелуцкое сельское поселение, лесной массив близ села Первомайское.

3 Общий рельеф: речная терраса.

4 Микрорельеф: кочки.

5 Растительный покров: ольховосерое таволговое сообщество.

6 Угодье и его культурное состояние: земли лесного фонда, эксплуатационные леса.

7 Признаки заболоченности, засоленности и другие характерные особенности: начальные признаки заболоченности.

8 Уровень почвенно-грунтовых вод не вскрыт.

9 Материнская и подстилающая порода: элюво-делювий известняка.

10 Название почвы: литозём серогумусовый среднemosный легкосуглинистый с неразвитым профилем на элюво-делювии известняка

Горизонт и мощность, см	Описание разреза: механический состав, влажность, окраска, структура, плотность, новообразования, включения, характер перехода горизонта и другие особенности	Глубина взятия образцов, см
AУ (0 – 18 см)	буровато-серый, уплотнённый, легкосуглинистый, мелкокомковатый, влажный, присутствуют светлые зёрна минералов, включения корней, гальки, валунов, обломков породы, переход резкий, граница ровная	0 – 18 см
R (более 18 см)	плотная горная порода: песчаники саблинской свиты или известняки и доломиты волховской и обуховской свит	

1 Разрез N 5

2 Адрес: Ленинградская область, Кингисеппский район, Большелуцкое сельское поселение, лесной массив близ села Первомайское

3 Общий рельеф: речная терраса.

4 Микрорельеф: кочки.

5 Растительный покров: ольховосерое снытевое зеленомошное сообщество.

6 Угодье и его культурное состояние: земли лесного фонда, эксплуатационные леса.

7 Признаки заболоченности, засоленности и другие характерные особенности отсутствуют.

8 Уровень почвенно-грунтовых вод не вскрыт.

9 Материнская и подстилающая порода: флювиогляциальные отложения.

10 Название почвы: дерново-подбур типичный мощный супесчаный со среднеразвитым профилем на флювиогляциальных отложениях

Горизонт и мощность, см	Описание разреза: механический состав, влажность, окраска, структура, плотность, новообразования, включения, характер перехода горизонта и другие особенности	Глубина взятия образцов, см
АУ (0 – 27 см)	тёмно-серый, легкосуглинистый, мелкокомковатый, влажный, с ходами дождевых червей, присутствуют светлые зёрна минералов, включения крупных корней и гальки, переход ясный	0 – 20 см
ВНФ (27 – 61 см)	тёмно-бурый, свежий, супесчаный, бесструктурный, рыхлый, включения корней, камней, переход постепенный	30 – 50 см
ВС (более 61 см)	бурый, свежий, супесчаный, бесструктурный, плотный, включения корней, камней	-

1 Разрез N 6

2 Адрес: Ленинградская область, Кингисеппский район, Большелуцкое сельское поселение, производственная территория ПГ ООО «Фосфорит».

3 Общий рельеф: речная терраса.

4 Микрорельеф: кочки, колеи от проезда крупногабаритной техники.

5 Растительный покров: ивовое таволгово-кипрейное сообщество.

6 Угоде и его культурное состояние: земли промышленности, зона размещения предприятий I класса опасности.

7 Признаки заболоченности, засоленности и другие характерные особенности: пятна оглеения в профиле свидетельствуют о наличии глеевого процесса.

8 Уровень почвенно-грунтовых вод не вскрыт.

9 Материнская и подстилающая порода: флювиогляциальные отложения.

10 Название почвы: агрозём альфегумусовый оглеенный среднепахотный среднемощный глубокооглеенный легкосуглинистый со среднеразвитым профилем на флювиогляциальных отложениях

Горизонт и мощность, см	Описание разреза: механический состав, влажность, окраска, структура, плотность, сложение, новообразования, включения, характер вскипания, характер перехода горизонта и другие особенности	Глубина взятия образцов, см
P (0 – 34 см)	чёрный, рыхлый, комковатый, влажный, легкосуглинистый, переход ясный, граница волнистая	0 – 20 см
ВНФ (34 – 57 см)	буро-охристый, влажный, супесчаный, бесструктурный, рыхлый, включения корней, камней, затёки тёмных пятен, переход резкий, граница волнистая	35 – 55 см
G (57 – 65 см)	сизый цвет при обнаружении горизонта, окрашивается в бурый цвет при нахождении на воздухе, тяжёлый суглинок, сырой, бесструктурный, мелкопористый	57 – 65 см

1 Разрез N 7

2 Адрес: Ленинградская область, Кингисеппский район, Большелуцкое сельское поселение, земли лесного фонда.

3 Общий рельеф: речная терраса.

4 Микрорельеф: кочки.

5 Растительный покров: ольховосерое паслёно-вейниково-зеленомошное.

6 Угодье и его культурное состояние: земли лесного фонда, запретные полосы лесов, расположенных вдоль водных объектов.

7 Признаки заболоченности, засоленности и другие характерные особенности: признаки глеевого процесса.

8 Уровень почвенно-грунтовых вод не вскрыт.

9 Материнская и подстилающая порода: флювиогляциальные отложения.

10 Название почвы: перегнойно-глеевая почва поверхностно оглеенная среднесуглинистая со среднеразвитым профилем на флювиогляциальных отложениях.

Горизонт и мощность, см	Описание разреза: механический состав, влажность, окраска, структура, плотность, новообразования, включения, характер перехода горизонта и другие особенности	Глубина взятия образцов, см
H (0 – 43 см)	тёмно-бурый, уплотнённый, среднесуглинистый, сырой, бесструктурный, мелкопористый, включения корней, переход заметный, граница волнистая	0 – 20 см
G (43 – 60 см)	сизый цвет при обнаружении горизонта, окрашивается в бурый цвет при нахождении на воздухе, глина, сырой, бесструктурный, мелкопористый, переход постепенный	45 – 60 см
CG (более 60 см)	серый, глинистый, сырой, бесструктурный, плотный, пятна оглеения	-

SAINT PETERSBURG STATE UNIVERSITY

Manuscript Copyright

**Nedbaev Ivan Sergeevich**

**GEOECOLOGICAL ASSESSMENT OF THE IMPACT OF PHOSPHATE FERTILISER  
PRODUCTION ON SOIL AND VEGETATION**

Scientific specialty 1.6.21. Geoecology

Dissertation submitted for the degree of candidate  
of geographical sciences

Translation from Russian

Scientific supervisor:  
candidate of geographical sciences,  
Ekaterina Yurievna Elsukova

Saint-Petersburg  
2023

## Содержание

Introduction .....	136
Approbation of the work .....	140
Chapter 1: Overview of the impact of phosphate fertilizer production on the natural environment .....	144
Chapter 2: Materials and methods .....	152
2.1 Field research methods .....	152
2.2 Laboratory research methods.....	155
2.3 Methods of cameral work .....	156
Conclusions to Chapter 2.....	158
Chapter 3: Physical and geographical characteristics of the area.....	159
3.2 Climatic conditions.....	161
3.3 Natural waters.....	163
3.4 Soil cover.....	164
3.5 Vegetation cover.....	171
Conclusions to Chapter 3.....	177
Chapter 4. Geo-environmental assessment of the impact of phosphate fertilizer production on soils.....	179
4.1 Current ecological status of the soil cover at the Kingisepp phosphorite field .....	179
4.2 Indicators of the impact of soil phosphate fertilizer production.....	192
Conclusions to the chapter 4.....	208
Chapter 5. Geoecological assessment of the impact of phosphate fertilizer production on vegetation .....	211
5.1 Quantitative analysis of geobotanical descriptions .....	211
5.2 Assessing the transformation of phytocenoses by the correlation pleiad method.....	218
Conclusions to chapter 5 .....	226
Conclusion.....	228
Acknowledgements .....	232
References .....	233
APPENDIX .....	244



## Introduction

Phosphate fertilisers are mineral fertilisers: calcium and ammonium salts of phosphoric acid. They are produced from phosphate rock and apatite. The use of these fertilisers in agriculture stimulates faster crop development. Phosphate fertilizer production, like any other industrial anthropogenic activity, transforms the natural landscapes in the territory of the production facilities themselves, as well as affecting the condition of adjacent landscapes. The main impact on the natural environment described in the scientific literature is an increase of radionuclides, fluorine, strontium, cadmium, lead and zinc in landscape components (Saet et al., 1990; Rutherford et al., 1994; Andersson et al., 1997; Bolívar et al., 1998; Nielsen et al., 1998; Shirakawa et al., 2002; Dueñas et al., 2007).

In the present work the gross content and mobile forms of heavy metals (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, V, Zn), fluorine, phosphorus, sulphur content, water-soluble forms of nitrogen, potassium, magnesium, sodium and calcium, potential and actual acidity, humus content, toxicity by biotesting (test object *Daphnia magna* Straus.), specific activity of natural radionuclides, and a study of vegetation cover by geobotanical descriptions was carried out. Heavy metals are currently one of the most common groups of elements requiring widespread assessment in environmental monitoring due to their toxicity at high concentrations (Nortcliff, 2002; Sousa et al., 2008; Serdyukova, Barabanshchikov, 2017). High strontium levels lead to the replacement of calcium with strontium in the cells of living organisms, resulting in strontium rickets. This disease is characteristic of the fauna of regions where soils are contaminated with strontium (Berenstein, 1961; Judge, Lastkov, 2013; Dadali et al., 2014). Fluorides inhibit a number of enzymes necessary for the complete existence of living systems (Urazaev et al., 2000).

The isolation of indicators of changes in the natural environment under the influence of human economic activity and the assessment of changes in modern landscapes are areas of research in geoecology within the geographical sciences (Passport of scientific specialty..., 2022). The present work is aimed at identifying indicators of changes in the natural environment (the soil as a depositing medium, which is a "mirror of the landscape" (Dokuchaev, 1899), and phytocenosis as the most exposed part of an ecosystem) under the influence of phosphate fertilizer production was chosen as an object of research. The study also aims to assess changes in the contemporary landscape due to anthropogenic influences. For these reasons, this thesis aims to address geoecological challenges.

The objects of the research were technogenic (active dumps and tailings) and post-technogenic (reclaimed dumps) objects of the Kingisepp phosphate rock deposit (Kingisepp District, Leningrad Region), as well as natural and natural-anthropogenic complexes formed in

the field and outside the field - in the landscape represented mainly by forested or marshy areas of the Luga River terrace. The following types of sites are encountered within the deposit area: phosphogypsum dumps, three tailings ponds and overburden rock dumps, a significant portion of which have already been rehabilitated (the first rehabilitations were carried out 40 years ago). The natural-anthropogenic complexes include reclaimed overburden dumps with an established plant community including a tree layer, as well as agricultural land. The natural complexes include forest and marsh ecosystems, located on the territory of the forest fund, at varying distances from the phosphorite deposit sites.

The problem of environmental pollution from phosphate fertilizer production was raised by Saueia C.H.R., Mazzilli B.P. (2006), Betti M., Aldave De Las Heras L., Janssens A., Henrich E., Hunter G., Dutton M., Van Weers A.W., Nielsen S., Simmonds J., Bexon A (2004). Impacts on water bodies considered by Elbaz-Poulichet F., Braungardt C., Achterberg E., Morley N., Cossa D., Beckers J.-M., Nomérange P., Cruzado A., Leblanc M. (2001). Possible ways to reduce waste dumps in phosphate fertiliser production were discussed by Tayibi H., Choura M., López F.A., Alguacil F.J., López-Delgado A. (2009).

Research on waste from phosphate fertiliser production in the USSR began in the 1950s in the works of D.Y. Itkina, M.G. Pastukhova, S.I. Wolfkovich, R.E. Simanovskaya and V.A. Naidonova. B.S. Niyazbekova, I.M. Maltseva, O.V. Shelepova and K.A. Khutsishvili started to talk about the impact of this production on the soil cover in the 80s. In the 1990s, this trend was continued by Y.A. Kiperman, V.I. Skorobogatov, T.A. Antonets, V.G. Kazak, and A.I. Angelov. At the beginning of the XXI century the most popular researches on this topic are those of I.S. Belyuchenko, E.I. Muravyev, Y.Y. Nikiforenko, A.V. Litvinovich, A.V. Lavrishchev, D.V. Petrenko and others.

Over the past 20 years in the Russian Federation at least two dozen PhD and doctoral dissertations have been defended on various aspects related to the production of phosphate fertilizers. This impact on soil cover, on vegetation and on the landscape as a whole was studied in their works by M.A. Kaniskin, A.D. Zhukova and D.V. Petrenko. The impact on natural and ground waters was covered by D.V. Makarov in his works. K.S. Kosodurov, M.Yu. Loktionov and A.N. Limanskiy spoke about the possibility of using phosphogypsum as fertilizer in agriculture. The application of phosphogypsum in other areas was addressed by A.V. Polyakov, I.L. Oleinik, A.A. Molkov, M.G. Iglenkova and V.A. Reshetov.

Comparative-geographical and landscape-geochemical methods were used in the work to plan the locations of the sample sites. Geoecological profiling methods were used to lay the sample points. After the field phase, physico-chemical methods of soil sample analysis were used in the laboratory. Mathematical statistics methods were used to analyse the obtained

materials. And for construction of cartographic materials and spatial analysis of information the cartographic method of research was used. The theoretical basis was the works of A.G. Isachenko, M.A. Glazovskaya, A.I. Perelman, V.G. Morachevsky, V.V. Dmitriev, A.Yu. Opekunov and M.G. Opekunova.

Scientific work on the study of the dumps at the Kingisepp phosphate rock deposit began with the first reclamation work on the dumps. In 1986-1992 this area and the soil-vegetation cover forming on the dumps were studied by the researchers of the LenNIILKH: Yu. At present (2006-2022) research of the state of communities at the dumps continues. Abakumov E.V., Dmitrakova Y.A., Gagarina E.I. and Kushnir E.A. are actively engaged in them.

**The aim of the work** is to carry out a geocological assessment of the impact of phosphate fertiliser production on soils and vegetation.

**The objectives of the work** include:

- Defining the processes that constitute the landscape-destructive impact of phosphate fertilizer production;
- Determination of chemical elements and compounds that make up the emission impact in the production of phosphate fertilizers;
- Study of the transformation of the natural soil cover at the Kingisepp phosphate rock deposit and a description of the current technogenic surface formations of the study area;
- Study of the impact of phosphate fertilizer production on soil acidity and a description of the regional specifics of acidity changes as a result of production operations in Kingisepp District, Leningrad Region;
- Identification of indicators of phosphate fertilizer production on the soils of the southern taiga in the presence of phosphorites under carbonate rocks and determination of numerical values of these indicators in the study area;
- Description of the current environmental condition of the Kingisepp phosphate deposit soils and identification of areas with varying degrees of anthropogenic impact;
- search for regularities in the impact of phosphate fertilizer production on the activity of natural radionuclides and determination of their activity in the study area;
- Identification of stages of overgrowth of overburden rock dumps at the Kingisepp phosphate deposit with a description of the characteristic features of each stage of post-reclamation ecosystem formation;
- Analysis of geobotanical descriptions of sample plots located at the deposit and in the conditionally-background area and identification of vegetation groups by the method of correlation pleids.

**Scientific novelty.** Up-to-date data on the current state of ecosystems affected by the production of phosphate fertilizers at the Kingisepp phosphorite deposit have been obtained. For the first time, a geocological assessment of soils and vegetation in the subzone of the southern taiga was carried out under conditions of intensive landscape-destructive and emission anthropogenic impact of the production of phosphorus fertilizers in conditions of exposure to the surface of carbonate rocks. According to the degree of anthropogenic impact, three types of territories were distinguished - conditionally background (forest and swamp ecosystems), reclaimed overburden dumps, as well as large man-made objects - phosphogypsum dumps and a tailing dump. Indicators have been identified to assess the impact on soils of the production of phosphate fertilizers in the Leningrad region. An excess of the total content of a number of chemical elements in the soils of the study area was found in comparison with the regional background and standard indicators. Evaluated using the method of geobotanical descriptions of the stage of overgrowing of overburden dumps, represented by limestones and dolomites, as a result of recultivation by European spruce *Picea abies* (L.) H.Karst. over a period of about 40 years. A comparison was made of the species composition of phytocenoses located on the territory of the phosphorite deposit and on the conditionally background territory.

**Practical significance of the work.** A list of chemical elements is given, the content of which must be taken into account when using phosphogypsum as a basis for recultivation or as an agricultural fertilizer: strontium, fluorine, sulfur, phosphorus, as well as mobile forms of copper, manganese, nickel, lead, chromium and zinc. The radiological safety of the phosphogypsum dump and the absence of an increase in the activity of natural radionuclides in the territory of the Kingisepp phosphorite deposit are indicated. A set of indicators has been determined that can be recommended for inclusion in the soil quality monitoring system when assessing the impact of phosphate fertilizer production: an increase in the gross content of strontium, fluorine and phosphorus. Attention is drawn to the existing excesses of the permissible gross content and mobile forms of heavy metals, the gross content of fluorine, sulfur and phosphorus in the soils of the Kingisepp phosphorite deposit.

A database containing the results of laboratory analyses of soil samples and characteristics of geobotanical descriptions of sample plots has been created and submitted for registration, which can be used in subsequent studies of the ecological condition of the Kingisepp phosphate rock deposit.

The stages of overgrowth of carbonate rock dumps under the influence of phosphate fertilizer production are highlighted and a forecast of further development of plant communities is made.

This PhD thesis corresponds to the priority direction of development of science, technologies and techniques in the Russian Federation - rational nature management. The conclusions of the thesis are aimed at the development of critical technologies, represented by technologies for environmental monitoring and forecasting, prevention and elimination of environmental pollution (On Approval..., 2011). The work, in general, corresponds to the following priority of scientific and technological development: the possibility of effective response of the Russian society to big challenges, taking into account the interaction of man and nature, man and technology, social institutions at the current stage of global development, including the application of methods of humanities and social sciences (Strategy of scientific and technological..., 2016).

#### **Protected Statements:**

1. The impact of phosphate fertilizer production on soils and vegetation is expressed in mechanical disturbance of natural environment components, changes in relief, input of pollutants through emissions into the atmosphere and aerogenic transport of phosphogypsum dump particles. Indicators of impact are an increase in gross strontium content by 1.5 times, fluorine by 3 times and phosphorus by 4 times in soils compared to the conventional background area.

2. Spruce communities on overburden dumps of phosphate fertilizer production undergo five stages of formation. At the same time, the herb and shrub layer, even 40 years after reclamation, is represented mainly by ruderal species. The species composition of vegetation changes most significantly in the territory of the deposit adjacent to the tailings ponds.

3. The soils and substrats of the Kingisepp phosphate deposit are characterized by a neutral reaction of the environment, exceeding the MAC for sulphur, the zonal background for fluorine and phosphorus, the regional background of soils of the southern taiga of the Barents region for barium, cobalt, chromium, copper, iron, manganese, nickel, lead, antimony, strontium and vanadium. There are single exceedances of MPC in soil for manganese, copper, lead, nickel, chromium and zinc. The chemical composition of soils in the studied area is determined by four factors - rock factor (44 %), phosphate fertilizer production (20 %), impact of overburden rocks (14 %), sulfur intake from phosphogypsum dump (7 %).

#### **Approbation of the work**

12 papers were published on the dissertation topic: 3 of them VAK, 3 Scopus. The research results were presented at 8 conferences: All-Russian scientific conference with international participation "Scientific basis of sustainable forest management" (Voronezh: Voronezh State Forestry Technical University named after G.F. Morozov, October 26, 2020), All-Russian scientific conference "Environmental activities and environmental education: a

regional aspect" (Saint Petersburg: Pushkin State University, December 16, 2020), International forest forum "Forest ecosystems as a global biosphere resource: challenges, threats, solutions. Forestry - 2021" (Voronezh: Voronezh State Forestry Technical University named after G. F. Morozov, September 9-10, 2021), International Scientific Student Conference "Step into the Future: Modern Students as Creative, Scientific and Professional Potential of Russia" (Saint Petersburg: Leningrad State University named after. Pushkin State University, December 23, 2021), I Annual International Scientific Conference "Fundamental and Applied Problems of Geology and Geophysics in the Modern Natural Science Knowledge System" (Moscow: S.Ordzhonikidze Moscow State Mining Institute, March 10, 2022), All-Russian Conference with International Participation "Geochemistry of the Environment" (Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorov, March 10, 2022), Ecole d'Or, All-Russian Scientific Conference with International Participation (Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Mineral N. M. Fedorovsky All-Russian Research Institute of Mineral Resources, 23-26 August 2022), VII International Symposium "Biocosmic Interactions in Natural and Anthropogenic Systems" (Saint Petersburg: SPbSU, 26-29 September 2022), International Scientific and Practical Conference "Topical Issues of Sustainable Nature Management: Scientific and Methodological Support and Practical Solution" (Minsk: Belarusian State University, 9-11 November 2022).

#### **Articles in peer-reviewed journals Web of Science and Scopus:**

1. Nedbaev, I.S. Forest recultivation of overburden dumps of the Kingisepp phosphorite field / I.S. Nedbaev, E.Yu. Elsukova, E.A. Kushnir, E.I. Treschevskaya // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 2021. Vol.875. №012029. doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012029>
2. Elsukova, E.Yu. Pollution of soils in the zone of impact of phosphate fertilizer production / E.Y. Elsukova, I.S. Nedbaev, D.S. Kuzmina // *Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences*. 2022. №4. P.652-674. doi: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.406>
3. Nedbaev, I.S. Geocological assessment of the impact of phosphate fertilizer production on taiga soils / I.S. Nedbaev, E.Yu. Elsukova, E.O. Chunyaeva // *IOP Conference Series Earth and Environmental Science*, 2023. (accepted, but not yet published)

#### **Articles in peer-reviewed VAK journals:**

1. Kushnir, E.A. Assessment of the condition of forest plantations and soil cover at the reclamation sites of Kingisepp phosphorite deposit / E.A. Kushnir, I.S. Nedbaev, E.I. Treschevskaya // *Proceedings of St. Petersburg Research Institute of Forestry*. SPb: SPbNIILKh, 2021. №1. P.68-80. doi: 10.21178/2079-6080.2021.1.68.

2. Nedbaev I.S., Elsukova E.Yu. Study of world and Russian experience in developing optimal ways of reclamation of disturbed lands / I.S. Nedbaev, E.Y. Elsukova // *Vestnik of Eurasian Science*. 2021. T. 13. № 6. EDN AIICKP.

3. Nedbaev, I.S. Review of Russian and world experience in solving environmental problems of production, storage, processing and use of phosphogypsum / I.S. Nedbaev, N.V. Tsyvkunova, Elsukova E.Yu. *Vestnik of Eurasian Science*. 2022. T.14. № 4. P.10.

**Publications in RSCI journals not included in the VAK:**

1. Elsukova, E.Yu. The impact of phosphorite mining on the acid-base properties of soils / E.Y. Elsukova, I.S. Nedbaev, N.V. Tsyvkunova. Proceedings of the All-Russian Scientific Conference "*Environmental activities and environmental education: a regional aspect*". SPb: Pushkin Leningrad State University, 2020. P.55-59

2. Nedbaev, I.S. Study of reclamation effects: characterization of birch communities at technogenic sites of Kingisepp phosphorite deposit / I.S. Nedbaev, E.A. Kushnir, E.Yu. M.: TSEPL RAN, 2020. C. 205-208.

3. Nedbaev, I.S. Geochemical features of low-pitched soils formation in the area of Kingisepp phosphorite deposit impact / I.S. Nedbaev, N.V. Tsyvkunova, D.S. Kuzmina. Proceedings of International Scientific Conference Lyceum Reading "*Step into the future: modern students as creative, scientific and professional potential of Russia*". Saint-Petersburg: Leningrad State University named after A.S. Pushkin, 2022. P.52-53.

4. Nedbaev, I.S. Geochemical features of the accumulation of phosphorus and fluorine in soils in the zone of influence of the phosphogypsum dump / I.S. Nedbaev, E.Yu. Elsukova. Materials of All-Russian Conference with international participation "*Geochemistry of environment*". Moscow: All-Russian Scientific Research Institute of Mineral Resources named after N.M. Fedorov. N.M. Fedorovsky, 2022. P.74.

5. Elsukova, E.Yu. Pollution of soils by mobile forms of chemical elements in the zone of phosphate fertilizer production / E.Y. Elsukova, I.S. Nedbaev, D.S. Kuzmina, A.S. Vydrenkova. Proceedings of the VII International Symposium "*Biocosmos interactions in natural and anthropogenic systems*". SPb.: SPbSU, 2022. P.38-39.

6. Elsukova E.Y. Integrated and component-by-component assessment of the natural environment affected by phosphate mining and processing / E.Y. Elsukova, I.S. Nedbaev // *Actual issues of sustainable nature management: scientific and methodological support and practical solutions*: Proceedings of the International Scientific Conference dedicated to the 60th anniversary of the Research Laboratory of Landscape Ecology of the Faculty of Geography and Geoinformatics at BSU, Minsk, November 09-11, 2022 / Editorial Board: D.S. Vorobyov (ed.) [et al.]. Minsk: Belarusian State University, 2022. P.80-83.

**Grants**

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research under scientific project No. 20-35-90099 "Geoecological assessment of the environmental impact of phosphogypsum dumps and development of optimal ways of their reclamation".



## **Chapter 1: Overview of the impact of phosphate fertilizer production on the natural environment**

### *Key features of the impact of phosphate fertilizer production*

World reserves of phosphate are estimated at around 70 billion tonnes (Georgievsky and Bugina, 2020). In the Russian Federation, phosphate reserves in phosphate rock are estimated at 217 million tonnes and another 708 million tonnes in apatite (State Report..., 2020). In the Russian Federation, phosphogypsum dumps are located in the areas of phosphorite and apatite deposits. The largest deposits are located in the Khibinskaya group of deposits (Murmansk Oblast), and there are also large deposits in the Kirov Oblast and the Sakha Republic. The main phosphate fertilizer plants are located in the following cities: Cherepovets, Balakovo, Veliky Novgorod, Dorogobuzh, Rossosh, Kingisepp, Belorechensk, Kirovo-Chepetsk, Voskresensk and Meleuz (State Report..., 2020).

Phosphate fertilizer production may impact the natural environment through air emissions, wastewater discharges, disposal of hazardous wastes and phosphate rock exposure. This study will summarise the impact of air emissions directly from phosphate fertiliser production (process emissions from phosphoric acid, phosphate superphosphate and complex fertiliser production) and the impact of airborne transport of pollutants from the phosphogypsum dump that enter the soil and vegetation cover of adjacent areas.

Process emissions from phosphoric acid production include fluorides (as phosphate rock contains 2-4% fluoride), phosphate, dust, cadmium, lead, zinc and radionuclides (generated during the thermal production process). In the production of superphosphate, fluorides, chlorides, nitrogen compounds and dust may enter the atmosphere and subsequently be deposited. In compound fertilizer production, nitrogen compounds, fluorides and chlorides are emitted as pollutants (Environmental Guidelines..., 2013).

The fertilizer industry can also be a source of pollutants such as arsenic, mercury and uranium, whose accumulation has been noted in estuaries of rivers that receive runoff from phosphate-based product manufacturing plants (Elbaz-Poulichet et al., 2001). At high inputs of phosphogypsum into water bodies, bacteria can vegetate under anaerobic conditions with zero dissolved oxygen (Ivanova, 2011).

### *The problem of phosphogypsum dumps*

Phosphogypsum is a by-product of the formation of products derived from phosphate rock and apatite. Phosphogypsum is a white, solid substance consisting mainly of calcium sulphate, with a number of impurities that depend on the processing technology of the phosphate rock and storage conditions. Large areas of land have to be permanently expropriated to create waste dumps for phosphate fertilizer production (Tarchigina et al., 2011). Phosphogypsum

dumps are located in the area of phosphoric acid production, as it is phosphoric acid production that is the main source of phosphogypsum formation. The largest production is concentrated in East Asia, Africa and North America (Production of phosphoric..., 2021).

Phosphogypsum can affect soil acidity and lead to contamination with fluorine, heavy metals and radionuclides. The main hazard of using phosphogypsum storage material has been identified by researchers as increased radioactivity. Phosphate rock contains Ca, P and natural radionuclides of the uranium ( $^{238}\text{U}$ ) and thorium ( $^{232}\text{Th}$ ) series (Shirakawa et al., 2002; Yakovlev et al., 2013; Korobanova, 2016).

The production of building materials and products is one of the promising industries for recycling and utilisation of industrial waste, including phosphogypsum (Yashin, 2013). Phosphogypsum is also suitable for use in the production of gypsum binders and products based on them, in the cement industry (Kasimov et al., 2013). Phosphogypsum can be used to make cement mixtures, as suggested by Turkish scientists due to the high cost of cement and the availability of unused phosphogypsum storage facilities (Degirmenci et al., 2007). In China, phosphogypsum, fly ash and waste steel have been proposed for road paving (Shen et al., 2009). Another study (Shen et al., 2007) shows that phosphogypsum together with slaked lime and ash can be used as road base material. The use of phosphogypsum in road construction solves the problem of disposal of this waste and is efficient and economical. However, according to a study (Mezeva, 2013), the toxic components contained in phosphogypsum can enter the human body through the respiratory tract, eyes and contaminated hands and adversely affect human health.

Mineral fertilisers can be made from phosphogypsum. The patent (Chugunov et al., 2013) presents several ways of producing a complex nitrogen-phosphorus-sulphate fertilizer from phosphogypsum. Phosphogypsum is used to increase soil productivity. Besides the expenses for phosphogypsum preparation can pay back in 3-4 years, as the average annual increase in productivity ranges from 1.33 to 1.68 t/ha (depending on the dose of phosphogypsum preparation - respectively, 8-32 t/ha). When crops are cultivated without irrigation in areas with predominantly irrigated agriculture after one-time and repeated phosphogypsum application, three zones of salinity are distinguished: desalinization, transit and salt accumulation (Voropaeva et al., 2011). Phosphogypsum together with wastewater and sawdust can be applied as an alternative approach to rational influence on soil fertility as these substances influence the physical and chemical properties of soils and morphological features of development (Berezhnaya et al., 2012).

Phosphogypsum waste in Russia contains 1 million tonnes of rare earth elements (REEs). The rare-earth concentrate isolated from phosphogypsum waste is distinguished by increased content of the medium rare-earth group: yttrium, dysprosium, samarium, europium, gadolinium,

terbium (Abramov et al., 2013). In the near future, processes to extract rare-earth elements from phosphogypsum should be developed, as the cost of rare-earth elements is gradually increasing, and these elements can be contained in phosphogypsum. However, the extraction of rare earth elements is necessary at the phosphoric acid production stage (Binnemans et al., 2015). The techniques typical of apatite processing do not yield the stated results for the recovery of REE from phosphogypsum of phosphorite processing (Naimanbaev et al., 2013).

Nanocrystalline hydroxyapatite and ammonium sulphate can be obtained from phosphogypsum (Mousa et al., 2015). Nanocrystalline hydroxyapatite is used in medicine as a filler to replace parts of lost bone, as a coating for implants and in some other cases. Ammonium sulphate is a nitrogen-sulphur mineral fertiliser for soils.

A study (Chernysh et al., 2012) considered the use of phosphogypsum as a mineral additive for biosulphide treatment of sewage sludge. Phosphogypsum is a source of sulphate necessary for the growth of sulphate-reducing bacteria and calcium necessary for more efficient extraction of heavy metals. During treatment the organic chelate complexes with the heavy metals are broken down.

Normal plant growth and development on phosphate fertilizer production dumps is hindered by high acidity, high strontium content, lack of natural organic matter, wide variability in the content of exchangeable potassium, and excessive amounts of mobile phosphorus. The most promising of the remediants are the humus horizon of the soils of the area adjacent to the dump and the sludge from the sludge reservoir. The best is the humus horizon of soils, as it contains useful natural microflora, on the symbiotic relationship with which the growth, development and establishment of plants and the formation of turf as the main protective surface component largely depend (Belobrov et al., 2015).

*The impact of phosphate fertiliser production on the content of selected chemical elements in the soil and the reaction of the environment*

The impact of phosphate fertiliser production on soil acidity is mixed. In the Leningrad region (Elsukova et al., 2020) phosphogypsum leads to an increase in pH to 7-8 units, while in Spain phosphogypsum leads to a decrease in pH to highly acidic soils (Dueñas et al., 2007). In a study by A.D. Zhukova et al. (Moscow region) (Zhukova et al., 2016), the actual acidity in the conditionally-background area was 6.5 pH units, and in the area affected by phosphate fertilizer production 6.5-6.6 units. In the same study in the impact zone of the phosphate fertilizer production facility, the potential soil acidity ranged from 5.6 to 7.3 units. That is, there was no soil acidification. Soil acidity is probably influenced by the composition of rocks in the study area.

According to known data (Saet et al., 1990), sodium content is increased in soils of areas adjacent to phosphate fertiliser production. Sodium content in phosphogypsum varies from 300 ppm to 47000 ppm (Arocena et al., 1995; Tayibi et al., 2009; Saadaoui et al., 2017).

Exceeding the background levels of heavy metals can spread over an area of up to 4 km (Zhukova et al., 2016). The main reason for the significant content of heavy metals in chemical plant emissions is the large amount of impurities of many elements in phosphate raw materials (titanium - over 1200 ppm, strontium - over 2550 ppm, lead - over 12 ppm, etc.); the more production, the more emissions, including heavy metals. Data show that 1 tonne of P2O5 in some ores contains 40100 kg of fluorine, 20-40 kg of strontium and 20-25 kg of rare earth oxides. During the processing of natural phosphate rock, most of the fluorine and strontium compounds are converted into fertilizer (Kizinek et al., 2013). Phosphogypsum dumps are depleted in mobile iron (11 ppm) (Carbonell-Barrachina et al., 2002), with gross contents ranging from 200-7000 ppm (Arocena et al., 1995; Tayibi et al., 2009; Saadaoui et al., 2017). Mobile strontium accumulates in areas affected by phosphate fertilizer production, with gross strontium content as high as 6500 ppm (Petrenko et al., 2012). Researchers (Tayibi et al., 2009; Aoun et al., 2010; Wang et al., 2019) note that manganese content in phosphogypsum waste varies from 15 to 1200 ppm. When assessing the impact of phosphogypsum on soils, exceedances of the MAC for cadmium (up to 4 ppm) have been identified (Melnikova et al., 2016). Cases of contamination of the area adjacent to phosphogypsum production with lead (up to 99 ppm) have been noted (Zhukova et al., 2016).

Concentrations of water-soluble forms of fluoride in soils adjacent to production can reach 25 ppm, while the established MAC for soils is 2.8 ppm (Yakovlev et al., 2013). Phosphorus is contained in phosphogypsum in amounts ranging from 200 ppm to 35200 ppm (Arocena et al., 1995; Tayibi et al., 2009; Shershnev, 2016; Saadaoui et al., 2017). Sulphur can accumulate in soils when exposed to phosphate fertilizer production, but this is not always the case: the sulphur content up to 6 km from production was 40 ppm, significantly lower than the sulphur content at 5.6 km from phosphate fertilizer production in the Moscow region (220-390 ppm) (Zhukova et al., 2016).

In phosphate rock from different regions of the world,  $^{238}\text{U}$  and  $^{226}\text{Ra}$  content varies widely: from 37 to 4900 Bq/kg for  $^{238}\text{U}$  and from 100 to 10 000 Bq/kg for  $^{226}\text{Ra}$  (Saeia et al., 2006). In Spain (Dueñas et al., 2007) and Turkey (Papaslioti et al., 2018), it is the radioactivity of the dumps that is highlighted as the main hazard of phosphogypsum, but chemical contamination with the above components is also observed (Gezer et al., 2012). In China, phosphogypsum dumps lead to an increase in radioactivity as well as a number of heavy metals:

As, Se and Pb (Dartan et al., 2017). In Morocco, the situation is similar: increased radioactivity (Silva et al., 2022) and heavy metals (Azouazi et al., 2001).

*Overview of the impact of phosphate fertiliser production in Kingisepp district, Leningrad region*

The objects of research in geoecology are both sources of anthropogenic impact and the ecosystems that are affected, so the production areas and facilities located at the Kingisepp phosphate rock deposit (Kingisepp District, Leningrad Region), and natural and natural-anthropogenic complexes formed in the field and beyond are landscapes, represented mainly by forested or swampy areas of the river terrace of the R The Kingisepp deposit was discovered in 1948. In 1964, all exploration work was completed and the development of the deposit began. In the 1990s, the reserves were depleted and the plant started using imported raw materials.

Currently, Phosphorit Industrial Group LLC (PG Phosphorit LLC) is part of EuroChem Mineral and Chemical Company JSC (EuroChem MCC JSC) and is one of the leading producers of phosphate fertilizers and feed phosphates in Northwest Russia, as well as, sulphuric and phosphoric acids for the needs of own production.

Until 2022, more than 90% of PG Phosphorit's production was exported to Western Europe, the Baltics and Latin America. In Russia, the main consumers of the product are other enterprises of EuroChem MCC, agricultural producers and feed mills.

The phosphorus content in the ore from the Kingisepp phosphate deposit was 6-7%. Extraction was carried out in open pits. As each pit was mined, reclamation was carried out (i.e. parallel recultivation). The overburden that was extracted during the mining of the new pit was deposited in an excavation from the old pit. Overburden rock dumps are the first type of technogenic objects in the area of the deposit. The second type of technogenic objects is tailing dumps, where particularly toxic for the natural environment wastes generated during ore processing are stored. The area of tailings occupies more than 400 hectares. The content of phosphorus in the tailings is about 2%. And the third type of technogenic objects is a phosphogypsum dump formed during waste storage in the process of phosphoric acid production. Per 1 tonne of phosphoric acid produced, up to 5-6 tonnes of phosphogypsum may be generated.

*Landscape-destructive impacts*

LandSAT satellite images were used to investigate disturbed areas in the Kingisepp phosphate deposit. The earliest images of the study area suitable for analysis date back to 1975 (Figure 1). These are the images taken by LandSAT 2. The red spectrum image shows anthropogenic objects in white and light grey colour, due to the fact that they reflect the electromagnetic waves of the red spectrum more intensely.

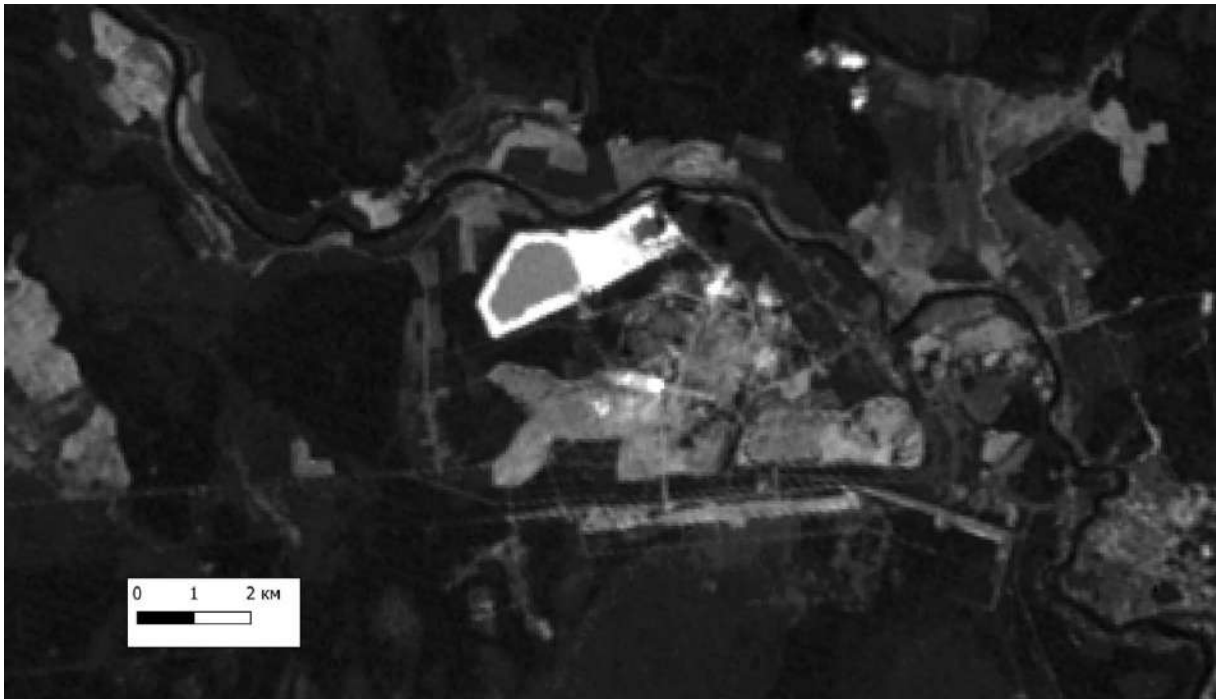


Figure 1: Fragment of a LandSAT satellite image of the study area from 1975.

At the time of the active development of the deposit (mid 70s) the area of phosphogypsum dump was about 60 thousand m<sup>2</sup>. The area of all anthropogenic objects on the deposit occupied more than 20 km<sup>2</sup>. The northern and eastern borders of the deposit coincide with the Luga River shoreline. In the first decades of field's development its northern part (Northern section) was especially actively exploited. The mining front moved from north to south along the dip of the bed. Currently, all pits in the northern section have been reclaimed, as its reserves were depleted in 1980. In addition to reclamation, a complex of chemical workshops with auxiliary production facilities has been erected in the depleted areas.

The lowest light grey stripe in Figure 1 identifies the start of development of the southern section. Between 1980 and 2000 it became the main one and the area of the mine workings increased significantly to the south (Figure 2). As the mining front moved southwards (towards the Pyatnitskii Mokh bog), water inflow into the pits increased dramatically.

Satellite images show an increase in vegetation cover in the study area. A large part of the northern section and almost all of the southern section underwent reclamation with topsoil, perennial grass sowing and subsequent planting of tree species. Preference was given to *Picea abies*.

LandSAT 2, 3, 5, 7 and 8 images were used. The images show that some of the ecosystems created on the site of former waste dumps are several decades old. Disturbed land peaked in the 1980s. By 2020, there are practically no unrehabilitated overburden dumps left. However, the area of the phosphogypsum dump (and its height, and consequently the volume of waste) is continuously increasing due to ongoing production. Prior to 1985, there was a Phase 1

dump, which has now been fully depleted - phosphogypsum storage has been discontinued. Phase 2 has been in operation since 1985 and is currently in operation. The volume of deposited phosphogypsum amounts to 77 million tonnes as at 01.01.2019. The area currently occupied by phosphogypsum is about 1 km<sup>2</sup>.

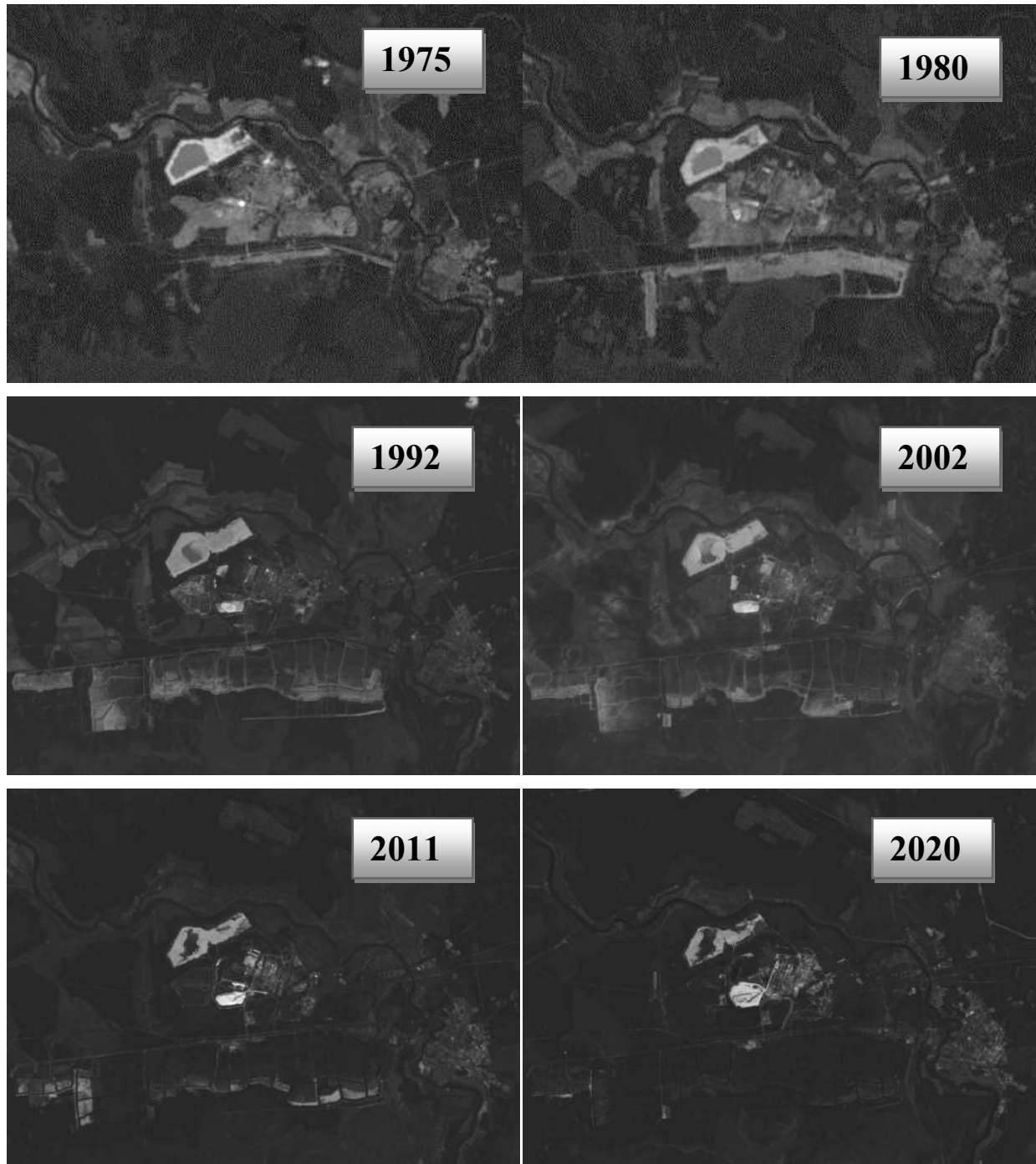


Figure 2: Satellite images of the study area by year.

Landscape-destructive impacts on the study area have been significantly reduced over the last two decades. Moreover, new technologies for the application of phosphogypsum dump material are being developed by PG Phosphorit Ltd. If the technologies are implemented and

used effectively, we can soon expect a reduction in the chemical impact on the surrounding area as well. This confirms the relevance of conducting a geo-environmental assessment now.

Phosphogypsum is produced in accordance with TU 2182-015-56937109-2010, according to which this product was successfully used at the enterprise as a raw material for production of calcium thermosulfate - white filler for paints, plastic masses, rubber goods, water-dispersion paints and linoleum. Calcium thermosulphate is used in the cement industry, in the production of gypsum binders, building materials and is used for construction work. However, the plant stopped producing calcium thermosulphate in 2012 due to the extremely low number of customers. As production was expensive and demand for the products was low, it was not profitable to produce calcium thermosulphate and in 2019 the workshop was liquidated (Vekshin, 2019). However, in 2019, PG Phosphorit Ltd. commissioned EPI Centre for Ecopesticide Research (Moscow) to develop a new technology for using phosphogypsum dump material to produce a reclamation agent for disturbed lands in the Leningrad region (Assessment materials..., 2021). The development was completed in March 2021. A new use of the available spoil material is therefore expected soon.

The first reclamation of the technogenic objects at the Kingisepp phosphate rock deposit took place in 1981-1987, meaning that the plant communities planted at that time are already 35-41 years old, which is the age of the established post-reclamation ecosystem. The stages of reclamation in the study area are as follows:

- 0-5 years - islands of vegetation, pioneer clusters (reedgrass, meadow-grass, horsetail)
- 5-20 years - medium-thickness, grass, mixed grass, wormwood
- more than 20 years - complete density, forest community formation.

In 2009-2010 part of the design solutions for environment protection was implemented.

### **Conclusions to chapter 1**

Based on the review of available materials, it can be concluded that strontium, fluorine and phosphorus, as well as natural radionuclides, are the main pollutants from the impact of phosphogypsum production (Nedbaev, Tsyvkunova, Elsukova, 2022) and emissions from the phosphorus industry. The only regional difference is the variation in acidity of the components of the landscapes adjacent to the industries. There is also slight regional variation in heavy metal content in the impacted area, but this does not represent a pronounced trend. Rather, the chemical composition of the rocks in each area determines the difference in heavy metal content.



## Chapter 2: Materials and methods

Geo-ecological assessment is a parametric determination of the state of anthropogenic-transformed geosystems, which ensures the existence of specific communities of living organisms and humans (society), in order to highlight the anthropogenic component and consequences of these changes on the background of natural processes (Dmitriev, et al., 2016). Soil chemical composition and species composition of phytocenoses were taken as parameters of the state of anthropogenic-transformed geosystems in the present study.

### 2.1 Field research methods

The work is based on materials collected personally by the author and by the SPbSU field team under the guidance of the author during the 2019-2022 field seasons.

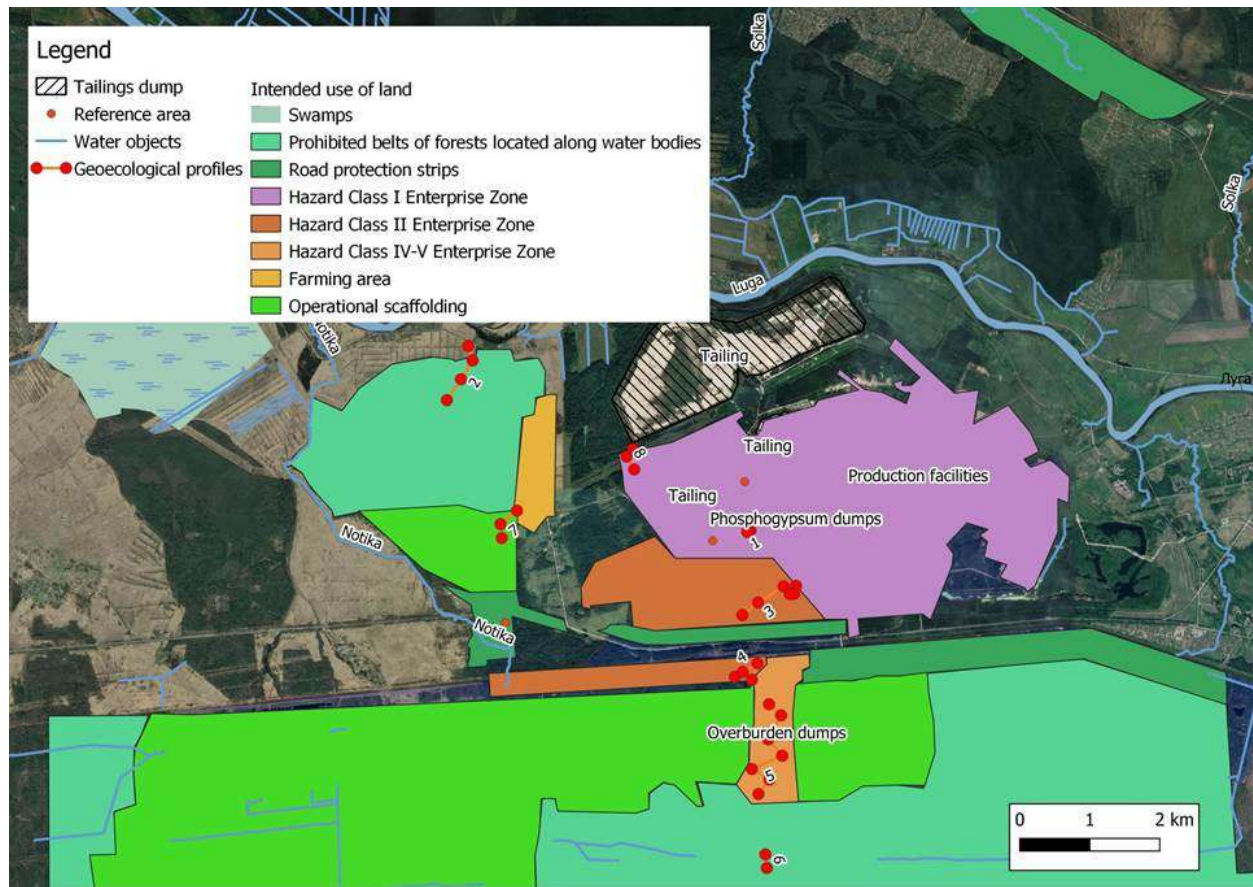


Figure 3: Layout of the sample areas in relation to the technogenic objects in the study area.

The objects of the research were the Phosphorit Production Plant Ltd. for the production of phosphate fertilizers located near the town of Kingisepp (Leningrad Region) and a number of natural-territorial complexes (PTC) located at a distance of 0-9 km from the enterprise. Figure 3 shows the layout of the sample areas in relation to the technogenic objects in the study area. Large technogenic objects in the investigated territory are represented by phosphogypsum dumps, three tailing pits and a number of reclaimed overburden dumps.

Geo-ecological profiles and reference areas were laid at different distances from the phosphogypsum dump. When planning the location of the sample areas the following features were taken into account:

- geological structure of the area;
- soil-forming rocks
- type of landscape;
- intended use of the land;
- distance to production;
- wind rose.

On the laid sample areas descriptions of natural-territorial complexes were made, which included the position in the mesorelief, microrelief, type of migration flows, geobotanical descriptions according to standard methods, stand characteristics, bioindication characteristics. Geobotanical descriptions were carried out according to forms developed by the Department of Geoecology and Nature Management of Institute of Earth Science SPbU for geo-ecological monitoring purposes. Fifty-one sample plots were established. Due to anthropogenic impact most soils are replantozem so rarely did the thickness of the section exceed 30 cm. Under field conditions the soil type was determined, under chamber conditions the type was subsequently refined and the determination to smaller hierarchical levels based on the descriptions made was carried out. Soil sampling was carried out in accordance with GOST 17.4.3.01-2017, which helped to ensure reliable analysis results, on the basis of which the conclusions in this paper were drawn and the defended provisions were developed. Genetic horizons of soils were sampled.

Thirteen geo-ecological profiles and 3 separate reference areas were established to study the impact on the land cover. The first reference area is located in the depression between the tailings pond and other technogenic objects of the deposit. The willow community grows there. The second reference area is located on the tailings pond itself and is represented by birch cypress-vein community on replantosols. The third reference area is the furthest conventional background area to the west (4 km from the enterprise), the study of which is restricted by the proximity of the Russian Federation state border. This reference area is home to a spruce bilberry-siliceous green-moss community.

Profile 1 is laid on the slope of the phosphogypsum dump and includes 3 sample areas, which reflect the geochemical catena - top, middle part of the slope and bottom of the phosphogypsum dump (Figure 4). The upper part of the slope has no vegetation cover, the middle part of the slope has an aspen-pine community and the foot of the dump has a cypress-grasshopper community on reptosols. The aspen community in the middle part of the slope is the result of reclamation.



Figure 4: Phosphogypsum dump near Kingisepp (author's photo).



Figure 5. Reclamation of overburden dumps (author's photo).

Profile 2 is a reference baseline profile. It is laid 4-5 km north-west of the phosphogypsum dump. It consists of four test plots: the first test plot is in a pasture and the other three are in the forest ecosystems on the terrace of the Luga River. Under all test plots in this profile there are Siver deposits. Grassland is represented by cereals-grass meadow on sod-podzol soils. Forest ecosystems are birch forests on gleyed soils with reedgrass *Calamagrostis* sp., meadowsweet *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim., willowgrass *Anthriscus sylvestris* (L.) and forest horsetail (*Equisetum sylvaticum* L.) in the herb and shrub layer.

Profiles 3-5 were laid on reclaimed overburden dumps (Figure 5). Profile 3 was laid on the overburden dump in close proximity to the phosphogypsum dump and Profiles 4-5 were laid over 1.5 km away. In total there are 12 trial areas on these three profiles. They were placed on different relief elements (mainly tops of dumps and slope facies) and in different vegetation communities (areas reclaimed by spruce, birch; self-overgrowing areas; mixed forests and meadow communities).

Profiles 6 and 7 are conditionally-background. Profile 6 is laid on Pyatnitskiy Mokh bog. It includes two test plots in a depression with a pine-herb-grass sphagnum community on peat oligotrophic soils. Profile 7 is situated 3-4 km west of the phosphogypsum dump. It consists of three sample plots. The first one is a reedgrass meadow; the second one is an alder forest; the third one is a spruce acidic-moss community.

Profile 8 was laid to study forest ecosystems in the vicinity of the tailings pond. It includes three sample plots laid on the Siverskaya Formation sediments. The first plot is a cypress-twist meadow; the second is an alder-alder-woodruff community and the third is an alder-woodruff-alder-woodruff community.

Profile 9 is located in close proximity to phosphogypsum dumps and represents reclaimed overburden dumps. The profile includes five sample plots distinguished by dominant species in vegetation cover: willow willow willow-vein community (sample plot 1), aspen willow-vein

community (2), pine-spruce spruce-vein shield-vein sphagnum community (3), spruce boggy green-moss community (4) and spruce boggy-vein green-moss community (5). The last three sample plots are the results of recultivation. The profile is characterised by a spread of low-powered replantozem.

Profile 10 is two wetland ecosystems located 8km northwest of the phosphogypsum dump. This profile is a conditional backdrop and is the most distant from the source of disturbance. These bogs are a transitional type from lowland to upland and as such may contain both abundant grasses and oligotrophic species. The soils are peaty.

Profile 11 is an opportunistic phosphogypsum forest ecosystem located 7km from the phosphogypsum site. The profile includes three sample plots. The first is a wetland ecosystem with willow reedgrass sphagnum community on peat soils. The second one is an alder-alder-reedy green-moss community on humus-gley soils. The third is an alder-alder-reedy reedgrass-reedy green-moss community on sod-podbura soils.

Profile 12 consists of five sample plots located from the top to the bottom of the overburden. Soil cover consists only of low-powered replantozem. Vegetation cover of the trial plots: 1 - pine-hemlock grassland community, 2 - spruce heathland grassland, 3 - pine-spruce reedgrass-broadleaf grassland, 4 - willow-berch-spruce-maple-mary-grassland grassland, 5 - willow-berch-aspen-rawberryberry-rospermgrassland grassland.

Profile 13 is an opportunistic background profile located adjacent to reference area 3. This profile is 4km west of the dump. It represents typical natural ecosystems of the study area: aspen, birch and spruce sagebrush, spruce sagebrush and spruce reedgrass communities on sod-pods (typical and illuvial-gleyzolic) and gleyzemes.

## **2.2 Laboratory research methods**

The gross content and mobile forms of heavy metals (Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Sb, Sr, V), as well as a number of other indicators characterizing the condition of the soil cover in the area of phosphogypsum dumps impact were determined in soils, namely, the concentration of fluorine, phosphorus, sulphur, nitrogen, potassium, magnesium, sodium, calcium, potential and actual acidity, humus content, toxicity by biotesting (test object *Daphnia magna* Straus. ), specific activity of natural radionuclides.

Concentrations of heavy metals in mobile forms (79 samples) were investigated by atomic emission spectrometry in Resource Centre "Methods for Analysis of Substance Composition" of SPbU Science Park. The research was conducted according to "M-MVI-80-2008 Methodology for measurement of element mass fraction in soil, soil and bottom sediments

samples by atomic-emission and atomic-absorption spectrometry" using ICPE-9000 optical emission spectrometer.

The total content of heavy metals (53 samples) was determined in the chemical-analytical laboratory of VSEGEI by the methods of the All-Union Scientific Research Institute of Geology and Mineralogy (Moscow State University) N 10/2010 "Determination of macro- and microelements (including rare-earth elements) by mass-spectrometry with inductively coupled plasma in rocks, soils and mellow sediments".

Sulphur, phosphorus and fluorine in soils (45 samples) were determined in the chemical-analytical laboratory of VSEGEI by infrared spectroscopy and ionometric method.

Actual and potential acidity (82 samples) was determined in the "Educational laboratory of physicochemical methods of analysis of the Department of technical support of educational programs in geography, geology, geoecology and soil science" of St. Petersburg State University. There, organic matter was determined according to the method of I.V. Tyurin (28 samples) (Opekunova, et al., 2014), mobile phosphorus (9 samples) according to GOST R 54650-2011.

Determination of calcium, magnesium (9 samples), potassium, sodium, chlorine, ammonium and nitrate forms of nitrogen (43 samples) in the aqueous extract was carried out in the "Training Laboratory of Physical and Chemical Methods of Analysis of the Technical Support Department of Educational Programs in Geography, Geology, Geoecology and Soil Science" at SPbSU using the methods outlined in the methodological manual issued by SPbSU for soil chemical analysis (Rastvorova et al., 1995).

Toxicity of soil samples (60 samples) was tested at the "Teaching Laboratory for Physico-Chemical Methods of Analysis, Department of Technical Support for Educational Programs in Geography, Geology, Geoecology and Soil Science", SPbU in accordance with FR.1.39.2007.03222.

Determination of natural radionuclide activity (3 pooled samples) was performed in the radiation control laboratory of OOO "Scientific and Technical Center "EcologicsLab" according to FR.1.38.2011.10712.

### **2.3 Methods of cameral work**

The database for the laboratory results was compiled in Microsoft Excel 2007. The same software was used to calculate measures of central tendency (median and arithmetic mean), to calculate correlation coefficients (using the optional "Data Analysis" package) and to calculate Brawe conjugacy coefficients for the construction of correlation plaid. The measure of variability (standard deviation), the analysis of samples for compliance to normal distribution

and the search for differences between samples were carried out in the statistical software SPSS Statistics.

Sampling variance criteria were used to find indicators of the impact of phosphate fertilizer production on landscapes. In most cases, we had to work with samples that did not follow the normal distribution law, so Mann-Whitney U-test was used to calculate measures of difference, rather than Student's or Fisher's tests.

In assessing soil performance, the plotted sample areas were grouped according to three main criteria:

- by division of soil classification;
- by distance to production;
- by nature and degree of anthropogenic disturbance.

Soil pH variation was revealed both by the difference of acidity in the areas adjacent to the waste dump and in the conditionally background sample plots, and by statistically reliable sample differences. Non-parametric criteria (Mann-Whitney U-criterion) were used to compare soil acidity, as the distribution of soil acidity did not follow the normal distribution.

Conformity to normal distribution was tested using the one-sample Kolmogorov-Smirnov test in SPSS Statistics software. If the two-sided asymptotic significance was greater than 0.05, the distribution was assumed to follow the normal law. If the asymptotic significance was less than 0.05, then the distribution was assumed to be non conforming to the normal law, and nonparametric criteria were applied to such a sample, and accordingly, the description of the tendency measures was taken as the median rather than the mean (Nasledov, 2007).

Correlation analysis was used to examine the relationship between the distribution of the different indicators analysed. Only indicators presented on a numerical quantitative scale were used. The strength of the relationship was determined by exceeding the modulus of the correlation coefficient of the critical value determined from the literature (Nasledov, 2007).

To assess the current structure of relationships between plant species in the studied PTC, the method of correlation pleids was used (Terent'ev, 1959; Neshataev, 1987; Opekunova et al., 2005). Correlation relations were determined using Brave's KB correlation coefficients (at a significance level of 0.05) (Neshataev, 1968; Neshataev, 1976). Bravae's cross-correlation coefficient is one of the variants of using the correlation coefficient in assessing qualitative traits. The species are combined into pleiades according to the method of linear correlation or the method of maximum path proposed by L.K. Vykhandu (Vykhandu, 1964).

Microsoft Excel 2007 software was used to create and visually design the graphs. Quantum GIS 3.14 and IDRISI 17.0 Selva software were used to create the mapping material and the mapping method of the study. Quantum GIS 3.14 is a freeware application available on

the official QGIS website (QGIS project, 2021). IDRISI 17.0 Selva was used on the software of the Institute of Earth Sciences of SPbU.

Quantum GIS was used for the following purposes: inserting the data from Microsoft Excel and plotting the locations of sample plots on the map image based on the coordinates recorded during field surveys; analysing the specifics of the area (functional zones, geological structure, topography, landscape type, accessibility, location of man-made objects, etc.) and determining the locations of geoecological profiles and sample plots; creating cartographic images for this work based on the vector layers created by the authors

IDRISI was used for the analysis of satellite images of the study area taken in different bands of the electromagnetic spectrum; for detecting visible anthropogenic disturbance of soil and vegetation cover; for comparing anthropogenic disturbance of the study area on images taken in different years.

### **Conclusions to Chapter 2**

The study is based on a geo-ecological assessment of the impact of phosphate fertilizer production on soils and vegetation. Materials for the thesis were collected by the author in 2019-2022 in the impact area of the Kingisepp phosphate deposit. Soil samples were used to determine environmental acidity, heavy metal content (bulk and mobile forms), macronutrients, toxicity by biotesting and specific activity of natural radionuclides, while vegetation was studied by geobotanical descriptions. Determination of chemical elements content in soil was carried out in the chemical-analytical laboratory of VSEGEI and in the Resource Centers of the Science Park of SPbU. The results obtained were analyzed by methods of mathematical statistics, including sample comparison criteria, correlation and factor analyses.



### Chapter 3: Physical and geographical characteristics of the area

The study area belongs to the north of the East European (Russian) Platform. Throughout the area in question, Cambrian and Ordovician rocks lie beneath the Quaternary sediments (Figure 6) (State Geological...). It is to these rocks that phosphorite and shale deposits in the Leningrad region are confined. Quaternary rocks are dominated by fluvioglacial deposits (gravel, pebbles and varved sands), boggy deposits (peat) and lake deposits (sands, silts, clays and peat) (State Geological...).

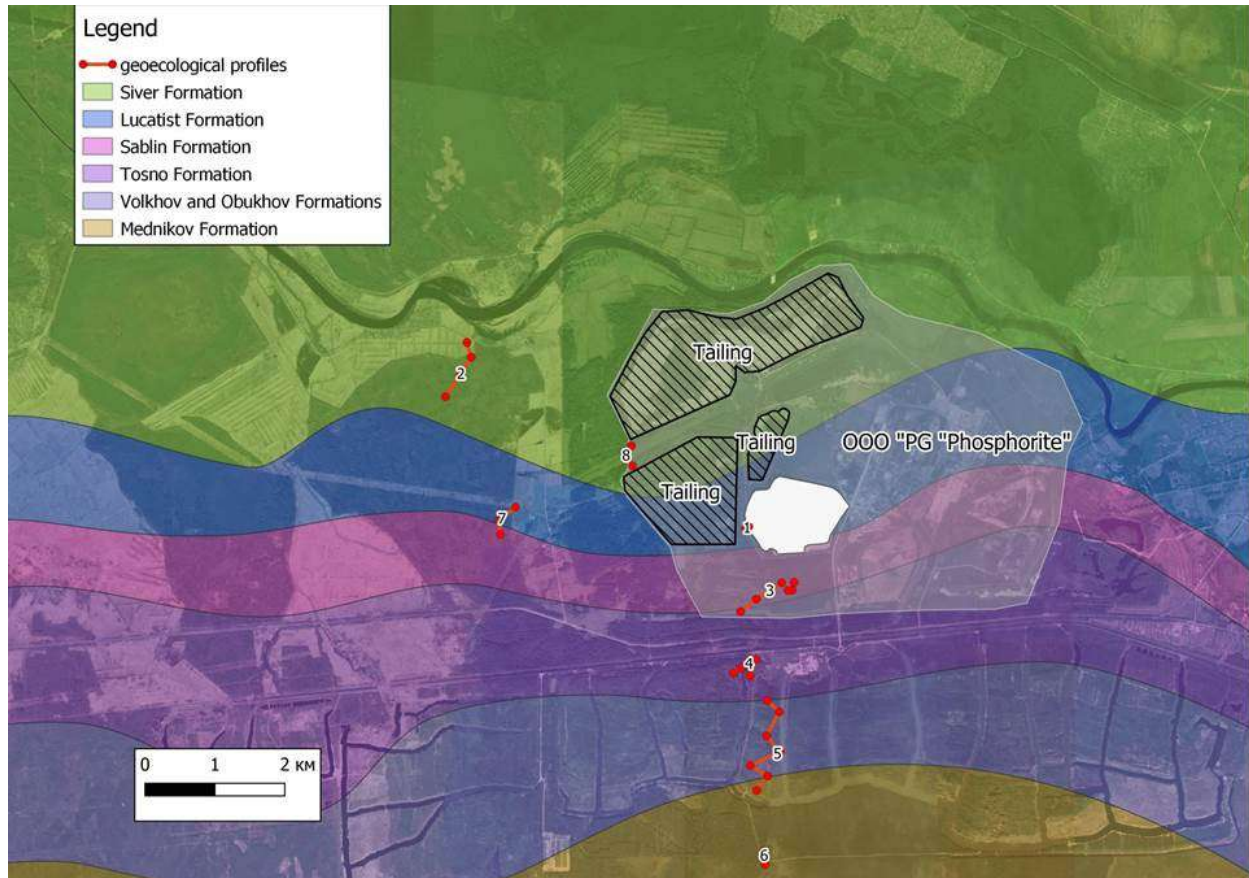


Figure 6: Geological structure of the study area (compiled by I.S. Nedbaev on the basis of VSEGEI open materials).

The territory is located at the juncture of Ordovician and Cambrian rock formations. The sedimentary rock began to accumulate around 500 million years ago with the onset of the sea. The Ordovician period is represented by the Mednikov, Volhovska, Obukhovska, Leetsetska and Tosno Formations. The Tosno Formation is quartz sands with a variable number of obolide shells (up to 25-30% of the rock volume). The Tosno Formation contains phosphorus-containing shells of marine organisms, the extraction of which led to the location of a phosphate fertilizer plant in the area. The Leetset Formation - sandy glauconite dolomites and marls with interlayers of calcareous glauconite clays. Volkhov Formation - dolomites and limestones. Overburden dumps are composed of rocks of the Volkhov Formation. Obukhov Formation - limestones, strongly clayey, and marls of thin layered, overburdened with inclusions of lenticular



ferruginous-phosphate oolites. The Mednikov Formation is limestones, usually strongly dolomitized, and dolomites.

The Cambrian period is represented by deposits of the Sablino, Lyukati, Tiskre and Siver Formations. The Siverskaya Formation is a homogeneous blue-greenish grey clay sequence. The average content of chemical elements is close to the average content of sedimentary rocks. The Lyukati Formation is clays interbedded with sandstones and siltstones. Tiskre Formation - yellow-grey siltstones and sands. The rocks are slightly radioactive. The Sablinski Formation - yellow and reddish-yellow sands and sandstones. The main minerals are quartz and feldspar.

The area of the study area has the Kingisepp-Volkhov mineralogenic zone. The Kingisepp phosphorite deposit (between the Luga and Narva rivers) is part of this zone.

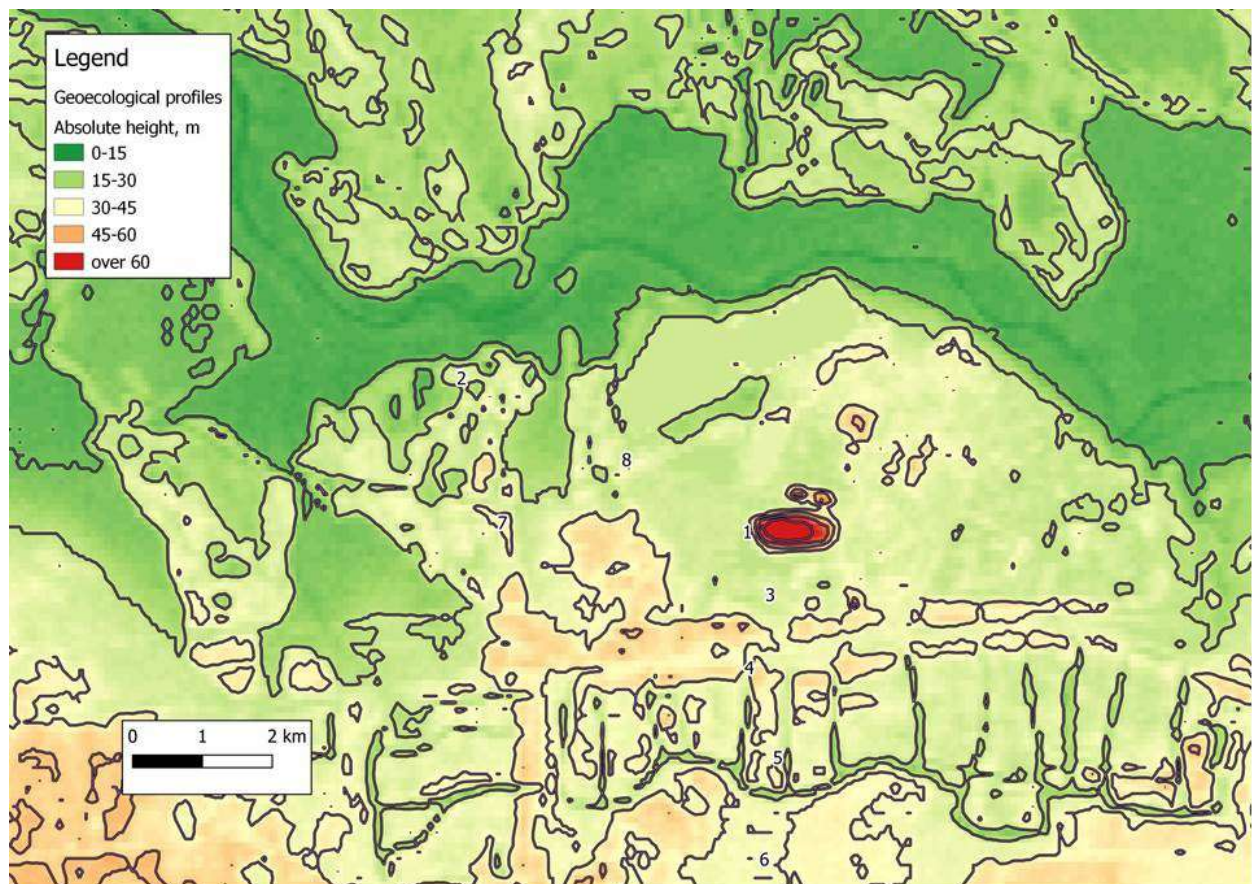


Figure 7. Elevation scheme of the study area (compiled by I.S. Nedbaev based on the SRTM digital elevation model).

According to the Geological Map of the Russian Federation, there is a geochemical anomaly of heavy metals (Pb, Zn, Cu, Ni, Co, Cd, Fe, Mn, Ag) in the area. This is possibly due mainly to the removal of elements during erosion of mineralised rocks developed on the Izhora Upland. There are local excesses of the local uranium background.

Peculiarities of the geomorphology of the area are determined by the relief of the pre-Quaternary surface and its location in a zone of glaciation and the Baltic Sea in the north-west of the East European Plain. The peculiarities of the geomorphology include the fact that the main

features of the pre-Quaternary relief were developed in the Middle Devonian to Neopleistocene period. In the Neopleistocene it was partly altered by glacial and marine activity and neotectonic movements and in the Holocene by marine accumulation and abrasion, erosion of modern rivers, peat formation and recent movements.

The main morphological elements of the surface area under consideration include the Vendian-Cambrian lowland, Ordovician cliffs and plateaus dissected by ancient valleys. The Vendian-Cambrian lowland is a flat, gently sloping plain to the north. Absolute levels of its surface vary from 5 to 10 m. The Ordovician plateau, occupying the eastern and southern parts of the territory, is the most elevated area with absolute heights of 20 to 50 m. In modern relief, it is the northern part of the Luzhskaya Lowland. The Ordovician escarpment is a transition zone between the Vendian-Cambrian lowland and the Ordovician plateau. The escarpment extends in the latitudinal direction. The ancient valleys run into the slopes of the Ordovician plateau.

The present-day relief was formed by glacial exaration and accumulation, marine transgressions and regressions and neotectonic movements. Peat formation and formation of the modern erosion network also played an important role. The main morphological elements of the present-day relief are the Luzhskaya Lowland, Izhorskaya Upland and the Baltic-Ladoga Escarpment. Structural-denudational and various types of accumulative relief are prevailing, while erosion-accumulative and abrasion types are less common.

The technogenic relief in the study area includes phosphogypsum and overburden dumps, as well as tailings pits. The phosphogypsum dump reaches a height of 65 m, overburden rock dumps are stretched in the meridional direction, reaching a height of 30 m (Figure 7). At present, the phosphogypsum dump continues to increase due to the introduction of new portions of waste. The overburden dumps have almost all been reclaimed.

### **3.2 Climatic conditions**

The climate of the study area belongs to the Atlantic-continental European (forest) region (National Atlas..., 2004). The climate is determined by the influence of Atlantic air and its subsequent transformation into continental air. During the cold season, the prevailing wind direction is south and south-west, which results in a high frequency of warm and humid Atlantic masses. In summer the prevailing winds are westerly and northwesterly, carrying relatively cold and humid Atlantic air. As a result of the advection of cold air, frosts are possible throughout the area, even in June. July and August are practically frost-free. In general, the climate of the study area can be described as moderately warm, humid, with mild winters.

The average annual air temperature is 4.4 °C. The average monthly air temperatures are shown in Table 1. The average date of the first frost in Kingisepp: 27 September. The average date on which frosts end: 20 May. Average number of frost-free days: 129 days.

Table 1. Average monthly air temperatures in Kingisepp.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperature, °C	-7,9	-8,0	-3,7	3,5	10,1	14,7	17,1	15,5	10,5	5,0	0,1	-4,5

The average annual soil temperature is 5 °C. The average monthly soil temperatures are shown in Table 2.

Table 2. Average monthly soil temperatures in Kingisepp.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Temperature, °C	-9	-9	-6	3	12	18	19	17	11	5	-1	-5

The average annual precipitation is 680 mm. The average monthly precipitation is shown in Table 3.

Table 3: Average monthly rainfall in Kingisepp.

Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
Precipitation, mm	36	33	34	40	47	67	83	88	80	65	61	46

Figure 8 shows the annual course of air temperature and precipitation (climatogram), based on data from the weather station in Kingisepp.

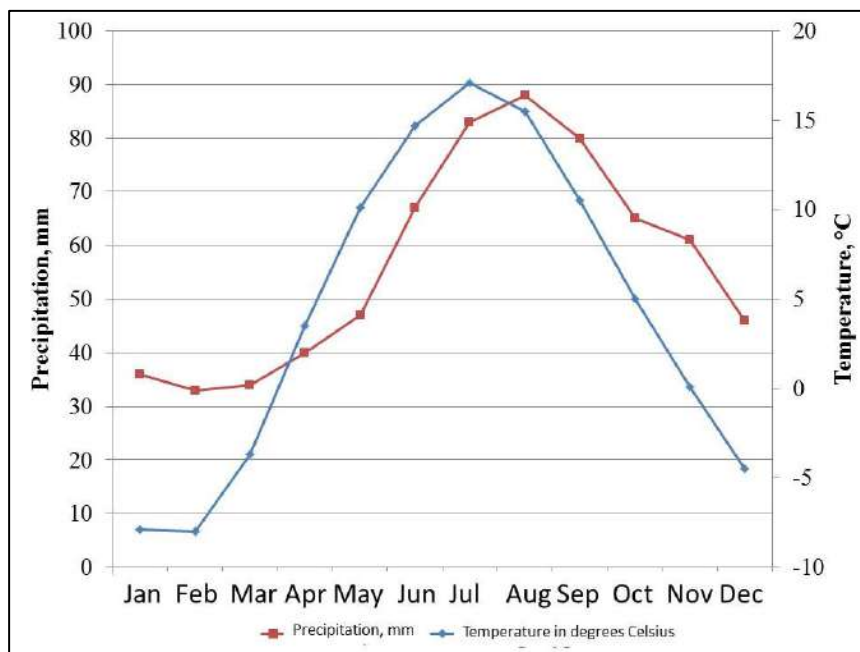


Figure 8. Annual variation in air temperature and precipitation (climatogram), based on data from the weather station in Kingisepp.

Figure 9 shows the wind pattern in Kingisepp.

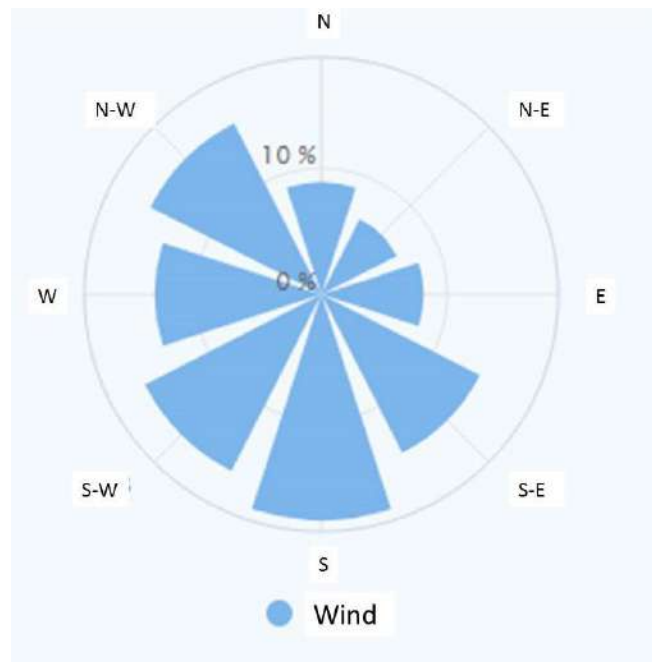


Figure 9. Wind rose in the city of Kingisepp (Weather forecast...).

Table 4 shows the wind directions as a percentage of the year in Kingisepp.

Table 4: Wind directions (in %) in Kingisepp.

N	N-W	W	S-W	S	S-E	E	N-E
8,9	15,2	13,2	15,7	17,9	14,1	8,1	6,7

Climate affects soil formation by determining the amount of water available for processes such as mineral weathering, mineral transport and elemental release. The climate of the study area is characterised by excessive or sufficient moisture.

### 3.3 Natural waters

The river network in the study area is not strongly developed. The sampling areas were located in the catchments of two rivers - the Luga River, a major watercourse of the Leningrad Oblast, and the Notika River, a tributary of the Luga River.

The Luga River flows to the north of PG Phosphorit Ltd. The river has a mixed feed, predominantly snowmelt (Bolshaya Sovetskaya...). By its chemical composition the water belongs to the hydrocarbonate class and calcium group. Average salinity is 170 mg/l (120-200 mg/l during the high-water period and 300-400 mg/l during the low-water period). The quality of river water is low due to the inflow of sewage water (Water of Russia...). The Notika River joins the Luga River in the west of the study area. The Luga River basin covers an area of over 13,000 km<sup>2</sup>. The length of the river is 353 km. Water flow rate is 93 m<sup>3</sup>/sec.

There are also a number of water bodies of anthropogenic origin in the study area. These are quarries, formed in the process of overburden and phosphate rock mining. There are more

than twenty of them. In addition, there are water-filled tailings ponds and technical ponds in the industrial territory of the enterprise. Most of the quarries that have already been rehabilitated through backfilling of overburden, backfilling of topsoil, grass seeding and tree planting are situated south of the A-180 (E20) motorway. Tailings ponds, technical ponds and several quarries are located to the north of the road. The phosphate pits extend over 15km in the latitudinal direction and almost 5km in the meridian direction.

The aquifers taking part in the watering of the deposit include:

1. Quaternary aquifer underlain by relatively impermeable lake-glacial moraine loams and clays 2-15 m thick.
2. the Ordovician aquifer complex. The average thickness is 11 m. It is 4 m thick in the north and up to 28 m thick in the south. Water-bearing rocks are lower and middle Ordovician limestones and dolomites, middle Devonian marls.
3. Cambro-Ordovician aquifer complex. The thickness of the complex is 22.5-36 m. Water-bearing rocks are sands and sandstones. Water bearing capacity is 100 m<sup>2</sup>/day. It is fed by overflow from the upper horizon.
4. Technogenic aquifer, confined to overburden rocks. The horizon is up to 22 m thick (Program Development..., 2009).

### 3.4 Soil cover

The study area belongs to the boreal geographical belt, to the European-Western Siberian taiga-forest soil-climatic province, to the soil zone of sod-podzol soils and sod-podzols of southern taiga, to the soil-climatic facies of moderately frozen soils, to the Baltic soil province (Gribova, et al., 1980).

The study revealed a considerable diversity of soil-ecological conditions, which forms the diversity of soils in the studied area. Ten soil types belonging to 7 divisions were identified, according to the Russian Soil Classification of 2004. The soil diversity is given in Table 5.

Table 5: Soil types in the study area.

Soil formation trunk	Division	Soil type	The formula
Postlithogenic	Alphegumus	Podbur	O – BHF – C
		Dernovo podbur	AY – BHF – C
	Texture-differentiated	Sod-podzolic	AY – EL – AEL – BEL – C
	Gley	Gleysem greyhumus	AY – G – CG
		Muck and gley	H – G – CG
	Lithosols	Greyhumus lithozem	AY – R



Soil formation trunk	Division	Soil type	The formula
	Agrozooms	Agrohumus    alfehumus глеевый	P – BH – G – CG
Organogenic	Peat	Peat-oligotrophic	TO – TT
		Peat-eutrophic	TE – TT
Technogenic surface formations	Quasisemes	Replantozem	RY – D

Below is a description of all soil divisions of the study area by the example of typical transects made in Kingisepp district during the field phase of the work. A description of the soil sections according to GOST 17.4.4.02-2017 is given in Appendix 4.

### **Postlithogenic soil formation stem**

#### *Alphegumus soils*

The variety of alphegumus soils in the study area is represented by podburas and sod-podburas (dernovo podburys).

#### Dernovo podburys

Turf-sub-drills are more widespread in the area than sub-drills, as in a large part of the area the bedrock is medium and basic rocks in terms of chemical composition (Figure 10).



Figure 10. Typical thick loamy sandy sod with a medium-developed profile on fluvioglacial deposits (author's photo).

AY (0 – 27 sm) – sod horizon, dark grey, lightly loamy, fine-clayey, moist, with earthworm tracks, light mineral grains, inclusions of large roots and pebbles present.

BHF (27 – 61 sm) – alphemus horizon, dark brown, fresh, sandy loam, unstructured, loose, inclusions of roots, stones.

Turfy-sub-soils are characteristic of and found only in the conditionally-backland areas. It is a typical soil for forest ecosystems in the study area, especially for soils in southern taiga on sandy sediments. A variety of sub-types of sub-soils can be found: typical, illuvial-humus, illuvial-iron, coarse-humus. This soil type is characterized by humus formation, leessivage, biogenic-accumulative processes and illuvial-accumulative processes.

#### *Gley soils*

##### Muck-gley soil

The humus-gley soil was described only on one conditionally-background sample plot (Figure 11). Vegetation community: alder-alder-alder-willow-grassland. Bedrock: clays of Siverskaya suite. To form humus-gleyey soil, additional moistening or permanent over-wetting is necessary. Mullein-gleyey soil is formed on heavy clays. This soil type is characterized by gleying, biogenic-accumulative processes and illuvial-accumulative processes.



Figure 11. A clayey-clayey surface-gleyey medium-loam soil with a medium-developed profile on fluvioglacial deposits (author's photo).

H (0 – 43 sm) – humus horizon, dark brown, medium-loam, damp, unstructured, weakly porous.

G (43 – 60 sm) – gley horizon, bluish colour when the horizon is detected, turns brown when exposed to air, clay, damp, structureless, weakly porous.

*Texturally differentiated soils*

Sod-podzol soil

A sod-podzol soil was only encountered in one sample plot located on a farm, which is quite natural as sod-podzol soil is a typical soil for grassland communities in the Leningrad Region (Figure 12). Vegetation community: herb-grass meadow. The underlying rocks are clays of the Siverskaya suite. The sod-podzol soils are characterized by the atmospheric type of moisture. They are formed on light clays. This soil type is characterized by humus formation, leaching, podzolic process, biogenic-accumulative processes and illuvial-accumulative processes.



Figure 12. Sod-podzol soils medium-podzol light loam with weakly developed profile on fluvioglacial deposits (author's photo).

AY (0 - 12 cm) - sod horizon, light grey, light loamy, fine-clayey, fresh, with earthworm passages, light mineral grains, inclusions of large roots and pebbles present.

EL (12 - 15 cm) - eluvial horizon, white, light loamy, flaky, fresh, light mineral grains, inclusions of roots and pebbles.

BEL (15 - 17 cm) - sub-alluvial horizon, light brown, light loamy, flattened, fresh, light mineral grains, inclusions of roots and pebbles present.

BT (17 - 28 cm) - textural horizon, brown, heavy loam, walnut-prismatic, fresh, light mineral grains, inclusions of roots and pebbles present.



*Lithosols*Greyhumus lithozem

Grey-humus lithosols are common in the study area (Figure 13) (Nedbaev et al., 2022). This soil type is found in conditionally-background areas in the presence of dense rocks. The vegetation community is forested and may be alder-grass-aspen or spruce sagebrush-grass. There is an active accumulation of organic matter in these ecosystems. A characteristic feature of grey-humus lithozem is exclusively atmospheric moistening. This soil type is characterized by humus formation and biogenic-accumulative processes.



Figure 13. Grey-humus medium-low loamy lithozem with undeveloped profile on limestone eluvium-deluvium (author's photo).

AY (0 - 18 cm) - sod horizon, brownish gray, light loamy, fine-clayey, moist, with light mineral grains, inclusions of roots, pebbles, boulders, rock fragments.

R - dense rock: sandstones of the Sablinsky Formation or limestones and dolomites of the Volkhov and Obukhov Formations.

*Agrozooms*Agrosoil alphegumus gley

The alphegumus agrosoil was found only in one trial area - in the meadow ecosystem in the immediate vicinity of the tailing pond edge (Figure 14). Plant community: alderwort glyphi. Underlying rocks: clays of the Siverskaya suite. The agrogenic horizon probably remains as a result of agricultural activities in the recent past in the study area. This soil type is characterised

by humus formation, loessivation, gleying, biogenic-accumulative processes and illuvial-accumulative processes.



Figure 14: Agrosol of alphegumus-gleyey medium-medium-modern deep-gleyey light loam with medium-developed profile on fluvioglacial sediments (author's photo).

P (0 - 34 cm) - arable horizon, black, loose, cloddy, moist, light loamy.

BHF (34 - 57 cm) - alfehumus horizon, brownish-ochre, moist, sandy loam, structureless, loose, inclusions of roots, stones, eclipses of dark spots.

G (57 - 65 cm) - gley horizon, bluish when the horizon is detected, turns brown when exposed to air, heavy loam, damp, unstructured, weakly porous.

### **The organogenic stem of soil formation**

#### *Peat soils*

#### Peaty oligotrophic soil

Of the organogenic trunk soils, oligotrophic peaty soils are the most common (Figure 15). They are the soils of the oligotrophic bog Pyatnitskii Moss, located to the south of the study area in the Luzhsko-Narva Depression, which is a flat plain on the watershed of the Narva and Luga Rivers. The characteristic plant community for these soils is sphagnum pine-herb-reeding. The bog is located on sediments of the Mednikov formation - clayey limestone and dolomite. The sampling locations are 4.3 to 4.5 km from the phosphogypsum dump. The only soil-forming process at this location is peat formation. Due to the close proximity of groundwater, it is not possible to visually assess the full section.



Figure 15. Oligotrophic peat-peat sphagnum soil (author's photo).

TO (0 - 9 cm) - oligotrophic peat horizon, light brown, damp, consisting predominantly of sphagnum moss residues of varying degrees of decomposition, not exceeding 50%. It represents the upper part of the peat layer, which is regarded as an organogenic rock.

Under the TO, the TT, the peat deposit, should be underlain.

### **Technogenic surface formations**

#### *Quasisemes*

#### Replantozem

In addition to soils, the object of soil research is traditionally man-made surface formations - quasi-soils, natural products, artifactual products and toxic-factual products - that come to the surface. Quasi-soils are urban soils (urban quasi-soils) and soils of reclaimed areas (replantozem).

Replantozem is found everywhere on reclaimed overburden dumps (Figure 16), phosphogypsum dumps and tailings ponds. It occurs with both coarse-humus horizons and sod-like features, as well as with signs of gleying. Regularities in the formation of vegetation cover are not observed. It can be very different. It is formed on eluvial-deluvium of dense rocks. This type of soil is characterized by humus formation and biogenic-accumulative processes. At the same time, it should be noted that the profiles of replantozems are especially strongly dependent on the underlying rocks (technogenic material), which determine the main processes in soils at



the initial stages of development (Abakumov, Gagarina, 2008). Dumps and tailings, which have not yet passed the stage of reclamation, can be attributed to the anthropogenic structure of the soil cover (SSC), to the type of SSC of mining quarries, and when a continuous cover is formed from replantozems, the structure of the soil cover becomes anthropogenically modified, eventually transforming into a recreational park type of SSC (Sukhacheva, Aparin, 2018).



Figure 16. Replantozem at the overburden dump (author's photo).

W (0 - 8 cm) - brownish-grey, loose, organic remains

R - dense rock: overburden rocks (limestone and dolomite of Volkhov and Obukhov Formations) or phosphogypsum.

### 3.5 Vegetation cover

According to (Gribova et al., 1980), the study area belongs to southern taiga forests of the Valday-Onega sub-province of the North-European taiga province of the Eurasian taiga (coniferous forest) region. According to (Vegetation of Russia..., 2004), the area is characterized by southern taiga pine (*Pinus sylvestris* L.) forests with southern boreal species, boreal plain vegetation. However, no pine forests were recorded within the study area. The vegetation is dominated by birch and spruce forests. The location of water bodies, underlying rocks, soils and anthropogenic transformation of the area play a significant role in the distribution of vegetation.

The regeneration of the soil and vegetation cover of the Kingisepp phosphate deposit has been studied by Abakumov E.V. (Abakumov, 2004). He noted that self-overgrowing vegetation

regeneration follows the type of ecogenetic succession, and each stage of plant community development corresponds to a distinctive soil with a certain set of features and properties. During reclamation associated with agrochemical and physical optimization of soils the vegetation succession proceeds faster than during self-overgrowing.

J.A. Dmitrakova points out that the abundance of spruce communities is due to the fact that reclamation of overburden rock dumps was carried out specifically by spruce (Dmitrakova, et al., 2018). E.A. Kushnir (Kushnir, et al., 2021) notes that on the overburden dumps, the most established forest plantations, which have not degraded in 35-38 years and formed forest ecosystems, are formed by the following tree species: birch downy, European spruce, Sukacheva larch and common pine. Plants of other species which were used during recultivation in the 80s have died out or are found only in sporadic specimens (the Berlin poplar, the Karaganah tree).

In general, it should be noted that according to the results of the conducted surveys, the vegetation cover of the territory is rather mosaic. Six types of plant formations can be distinguished: communities at the phosphogypsum dumps, communities at and near the tailings pond, communities at the overburden dumps, marsh, forest and meadow communities. Among the tree layer, the following dominant species can be found: birch *Betula pubescens*, European spruce *Picea abies*, pine *Pinus sylvestris*, willow *Salix* sp., aspen *Populus tremula*, grey alder *Alnus incana*, elm *Ulmus glabra*. Among natural ecosystems there are abundant moisture-loving species of herb and shrub layer: meadowsweet *Filipendula ulmaria*, forest horsetail *Equisetum sylvaticum* and others.

#### *Communities at the phosphogypsum dump*

At the end of the last century, attempts were made to reclaim the phosphogypsum dump. Currently, only the south-western slope of the dump is forested. There are two types of PTC: on the slope and at the foot of the dump. Soil cover is represented by replantosols. Common to the phosphogypsum disposal area facies is the presence of herbaceous shrub layer of willow-herb *Chamaenerion angustifolium* (abundance cop 1), dandelion *Taraxacum officinale* (sp), *Artemisia vulgaris* (sol) and boron *Millium effusum* (sol) and the absence of shrub and moss-lichen layer. On the slopes of the phosphogypsum dump, an aspen pine community was formed with European pine *Pinus sylvestris* and downy birch *Betula pubescens* in the tree layer and hedgehog *Dactylis glomerata* (variety 1) and strawberry *Fragaria vesca* (variety 1) in the herb and shrub layer (Figure 17), and at the foothills - cypress-grass community without a tree layer with *Urtica dioica* (sp), meadow-grass *Lathyrus pratensis* (sp) and *Tusilago farfara* (sp) in a herb-shrub layer.

#### *Communities on and near the tailings management facility*

There are three tailings dumps on the territory of the Kingisepp phosphate rock deposit. During the study it was possible to lay one test area at the reclaimed tailings storage facility and



4 test areas at the tailings sides and at the production area adjacent to the tailings storage facility. Accordingly, there are three types of POTC at this site: tailings storage facility, onboard and production area covered with vegetation. The soil cover is represented by replantozem.



Figure 17. Phosphogypsum dump slope with aspen pine community on the replantosere (author's photo).



Figure 18. Tailings pond edge with willow nettle greengrass community (author's photo).

Common to the facies on and near the tailings management facility is the presence of *Aegopodium podagraria* (sp) in the herbaceous-grass layer. A birch birch-quirenium-vein community has developed on the tailings site, including European pine *Pinus sylvestris* in the tree layer and reedgrass *Calamagrostis* sp. (sp) in the herb and shrub layer; at the tailings management facility - willow nettle green-moss community (Figure 18), alder-worthen green-moss community with birch *Betula pubescens* and alder-worthen green-moss community with oak *Quercus robur*; in the production area - willow meadow- willow-reed community.

*Communities on overburden dumps*

Overburden dumps cover a large area of the Kingisepp phosphate rock deposit. Their reclamation started in the 1980s and is still ongoing. Overburden rocks are represented by limestone and dolomite. The plant community is defined by the forest plantations used for reclamation and the shape of the mesorelief of the waste dumps. Soil cover is represented by replantozem. The vegetation cover of the overburden dumps is rather mosaic and it is not possible to identify any features characteristic of all facies on the dumps. Most of the dumps are characterized by reclamation with European spruce *Picea abies*. Moreover, it is possible to find already formed 40-year-old spruce forests, as well as recently planted ones, as the reclamation of waste dumps continues to this day. In addition to the European spruce, the stand may comprise the birch (*Betula pubescens*), aspen (*Populus tremula*), willow (*Salix* sp.) and pine (*Pinus sylvestris*) (Figure 19). In the herb-shrub layer, the common grasses include reedgrass *Calamagrostis* sp., mother-oil *Tussilago farfara*, common gout *Aegopodium podagraria*, and common goldenseal *Solidago virgaurea*. The moss-lichen layer is usually present, but does not cover large areas (on average, the projective coverage in the sample area on the dump is 30%).



Figure 19. Mixed forest on a reclaimed overburden dump (author's photo).



*Communities of wetland ecosystems in the study area*

All bog ecosystems are categorised as opportunistic. There are five test plots in this category: two in Pyatnitskiy Mokh bog located 5km from the current operation site, directly adjacent to the reclaimed overburden dumps which are currently forestry land; two further test plots located 8km north-west of the operation site; and a final test plot located 7km north of the operation site. The underlying rocks are both clayey limestones and dolomites of the Mednikovskaya Formation (Pyatnitskiy Mokh bog) and plastic clays of the Siverskaya Formation (the remaining bog test areas). Bogs are confined to negative landforms (depressions between positive landforms or river valleys). Both oligotrophic peat soils and eutrophic peat soils can be found in the study area. The cover of sphagnum mosses in bogs is 95-100 %. The projective cover of the herb-shrub layer varies greatly: from 15 to 80 %. Pyatnitskii moss bog is characterised by the presence of *Pinus sylvestris*, *Betula nana* dwarf birch and *Fragmites australis* reed (Figure 20).



Figure 20. Depression with a pine-herb-reeding sphagnum community on peat oligotrophic soils (author's photo).

*Forest ecosystem communities in the study area*

In the conditionally-background forest ecosystems, 11 sample plots have been laid at a distance of 4-7 km from the production area. All these ecosystems are located on the river terrace of the Luga River. The underlying rocks are the following geological formations: Siverskaya Formation (plastic clays with interlayers of siltstones); Lyukatistskaya and Tiskreskaya Formations (clays and siltstones); Sablinskaya Formation (sands and sandstones) and



Tosnenskaya, Leetsetskaya and Koporskaya Formations (sands, sandstones, mudstones and clays). The list of soil types of forest ecosystems is also quite diverse: gleyey soils (gleyzem grey-humus, humus-gleyey soils), lithozem (lithozem grey-humus) and alphegumus soils (sod-podburs: typical, illuvial-humus coarse-humus and illuvial-iron). Common to the forest facies is the presence of tree layer, absence of European pine *Pinus sylvestris* and willow *Salix* sp. in the tree layer (as on the dumps), European spruce *Picea abies* (Figure 21), birch downy *Betula pubescens* and aspen *Populus tremula* are in the dominant position. Projective coverage of the moss-lichen layer is 30-95%.



Figure 21. River terrace with spruce kiosk-grassland community on sod-podbura (author's photo).

*Meadow communities in agricultural fields (farms)*

Two sample plots have been established on agricultural land. The first one is at a distance of 4 km from production (Figure 22) and the second one is at a distance of 5 km. Their peculiarity is that they are used for farm production (in particular for grazing and feeding cattle). The underlying rocks are the following geological formations: the Siverskaya Formation (plastic clays with interlayers of siltstones) and the Lyukatista and Tiskre Formations (clays and siltstones). Soils are soddy-podzolic. Common to meadow facies is the absence of a woody layer, the presence in the herb and shrub layer of the buttercup *Ranunculus acris*, goose-foot lapwort

*Potentilla anserina*, meadow pea *Lathyrus pratensis*, mouse pea *Vicia cracca*, common yarrow *Achillea millefolium* and forest artemisia *Anthriscus sylvestris*. On a transect at the distance of 5 km the dominant species in the meadow community are hedgehog *Dactylis glomerata* (variety 1), common brome *Millium effusum* (variety 1), common gout *Aegopodium podagraria* (variety 1), field thistle *Sonchus arvensis* (variety 1), common cudweed *Alchemilla vulgaris* (variety 1). In the second trial area at a distance of 4km the dominant species is reedgrass *Calamagrostis* sp. (variety 3). Dandelion *Taraxacum officinale* (sp), meadow clover *Trifolium pratense* (sp) and others also occur. The moss-lichen layer is absent in these areas.



Figure 22. River terrace with reedgrass meadow on sod-podzol soils.

### **Conclusions to Chapter 3**

The study area belongs to the southern taiga plain landscapes of the north of the East European (Russian) Plain. Ordovician carbonate rocks underlie much of the area and Cambrian rocks are also common. The prevailing wind direction is south and west. The climate of the study area can be described as moderately warm, humid, with mild winters. River network is well developed, sampling areas were located in the catchments of two rivers - Luga River, a major watercourse of Leningrad oblast, and Notika River, a tributary of Luga. The study area belongs to the European-Western Siberian taiga-forest soil-climatic area, to the soil zone of sod-podzol soils and sod-podzols of southern taiga, to the soil-climatic facies of moderately frozen soils, to the Baltic soil province The replantozem soils are distributed in the field, and in the

conditionally background area alfhumus, gleyey, peaty and texture-differentiated soils. The vegetation is comprised of birch and spruce forests. The location of water bodies, underlying rocks, soils and anthropogenic transformation of the area play a significant role in the distribution of vegetation.

## **Chapter 4. Geo-environmental assessment of the impact of phosphate fertilizer production on soils**

### **4.1 Current ecological status of the soil cover at the Kingisepp phosphorite field**

In the course of the ecosystem study, several types of different sites were identified in the study area: natural - forest, meadow and marsh ecosystems - and natural-anthropogenic - at the phosphogypsum dump, at the site of tailings pits and at the site of reclaimed phosphate rock quarries. The pits were backfilled with overburden during reclamation.

The work is based on the following assumption: the conventional background area, the area of reclaimed overburden rock dumps and the area of large technogenic objects, such as tailings pits and phosphogypsum dumps. The difference between the three territories is confirmed by statistically significant differences in the samples, practically for all investigated chemical elements (Mann-Whitney U-criterion). The hypothesis is as follows: the conditionally-background territory has no (or only slight) traces of anthropogenic impact (the impact of phosphate fertilizer production); the territory of the recultivated overburden rock dumps was under strong anthropogenic pressure before; at present it is overgrown with forest vegetation and has partially belonged to the forest lands; the area of large technogenic objects is characterised by the maximum anthropogenic impact.

The current ecological state of the soil cover was assessed in terms of the content of suspected pollutants (heavy metals, fluorine, phosphorus and a number of other indicators) in comparison with background values found in literature and regulatory sources. The main results of this subsection of the chapter are presented in Vestnik SPbU (Elsukova, Nedbaev, Kuzmina, 2022). The results published in this thesis are specified and supplemented. Table 6 shows the content of mobile forms of heavy metals (HM) in soil samples.

The content of mobile forms of heavy metals depends on many factors, including the amount of precipitation, and changes from year to year more actively than the gross content of elements, nevertheless, their content is normalized and is an important indicator of the ecological state of soils. The results are compared with an indicative / maximum allowable concentration (MPC / MAC) for soils. The median content of mobile forms of elements in soils in the southern taiga of the Barents region (Salminen et al., 2004) was also used as a value for comparison.

In general, the content of mobile forms of heavy metals does not exceed the background values for the Barents region (except for barium and iron). Characteristically, the iron content in the conditionally-background area is higher than in the anthropogenic-disturbed areas. The average iron content in anthropogenic objects is 26,5 ppm, while in natural areas it is 14 times

higher - 386,5 ppm. Barium content averages 45 ppm, the maximum content is observed in soils of large technogenic objects and reaches 300 ppm.

Table 6: Content of mobile forms of heavy metals in soils, ppm (numerator - average value, denominator - minimum - maximum).

The element	Conditional Background Area (n=26)	Reclamation of overburden dumps (n=35)	Technogenic facilities (phosphogypsum dump and tailings pond) (n=18)	Average / median (n=79)	TAC (MPC) / Soils in the southern taiga of the Barents region (median)	Soils in the southern taiga of the Barents region (median)
Ba	<u>35</u> 5-110	<u>50</u> 2,5-190	<u>50</u> 2,5-300	<u>45</u> 30	-	34,5
Cd	<u>0,10</u> 0,02-0,40	<u>0,30</u> 0,02- 0,60	<u>0,80</u> 0,02-1,50	<u>0,30</u> 0,30	-	-
Co	<u>0,25</u> 0,25-0,25	<u>0,25</u> 0,25-0,25	<u>0,25</u> 0,25-2,00	<u>0,25</u> 0,25	5,0	0,25
Mn	<u>36,0</u> 5,5-141,5	<u>160,0</u> 6,0-432,5	<u>67,0</u> 1,0-249,0	<u>98,0</u> 54,0	pH 5.1–6.0 80 (for background) pH > 6.0 100 (for anthropogenic disturbed)	315
Ni	<u>0,5</u> 0,25-5,0	<u>0,5</u> 0,25-1,5	<u>2,0</u> 0,25-20,0	<u>1,0</u> 0,5	4,00	0,6
Pb	<u>2,0</u> 0,5-5,0	<u>2,0</u> 0,5-11,5	<u>3,0</u> 0,5-35,0	<u>2,5</u> 1,5	6,00	-
Cr	<u>0,5</u> 0,25-2,5	<u>0,5</u> 0,25-4,5	<u>1,0</u> 0,25-11,5	<u>0,5</u> 0,25	6,00	-
Cu	<u>2,0</u> 0,5-6,5	<u>3,0</u> 0,25-6	<u>4,0</u> 0,5-12,0	<u>3,0</u> 3,0	3,00	-
Fe	<u>386</u> 11-2080	<u>66</u> 0,5-524	<u>26</u> 1-119	<u>162</u> 46	-	28
V	<u>2,5</u> 2,5-10	<u>2,5</u> 2,5-2,5	<u>2,5</u> 2,5-10	<u>2,5</u> 2,5	-	-
Zn	<u>5,5</u> 1,0-27,5	<u>5,0</u> 1,0-26	<u>10,0</u> 1,0-37,5	<u>6,0</u> 3,0	23,00	22,8
Sr	<u>9,5</u> 1,5-53,5	<u>9,0</u> 2,5-17,0	<u>72,5</u> 3,5-377,0	<u>22,0</u> 8,0	-	-

**Note.** The figures for the last two columns are taken from: Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 28.01.2021 N 2 "On Approval of Sanitary Rules and Norms SanPiN 1.2.3685-21...". (for MAC / MPC) as well as (Salminen et al., 2004).

The average content of mobile forms of cadmium in soils formed on technogenic objects is 0,8 ppm and reaches 1,5 ppm in single samples on technogenic objects. At the same time local background of cadmium is on average 0,1 ppm. Excess of content of mobile forms of cadmium in natural-anthropogenic complexes over natural ones is observed several times. The mobile cobalt and chromium were found in insignificant concentrations not exceeding the normative values. It has been established that MAC exceedances of average concentrations in the conditionally-background area have not been detected for all elements, there are single

exceedances for manganese, nickel, zinc and copper. The reclaimed overburden dumps have exceeded MPCs for manganese, copper, lead and zinc. Soils at the phosphogypsum dump and the tailings dump have exceeded MPCs for manganese, copper, lead, nickel, chromium and zinc (Elsukova et al., 2022).

Table 7 and Figure 23 present the gross content of heavy metals in soils and acidity values. The results obtained are compared with the MAC / MPC for soils. For some elements the MPC/DAC values depend on the mechanical composition and acidity of soils. The soils of large technogenic sites are sandy loam in terms of their mechanical composition, conditionally-background areas and reclaimed overburden dumps are loam. In addition to the TOC, the median element content of soils in the southern taiga of the Barents region (Salminen et al., 2004) and the zonal background for podzolic soils (Saet et al., 1990) were taken as values for comparison.

A pH of 3.9 to 6.7 (strongly acidic to neutral reaction) with an average of 4.9 is typical for soils of conditionally-background territories, and a pH of 5.7 to 6.9 with an average of 6.4 (slightly acidic to neutral reaction) for TPO of large technogenic sites. In the studied area, anthropogenic activity leads to soil alkalization (Elsukova et al., 2020).

All soils in this region have an elevated barium content - on average about 500 ppm, which is 10 times higher than the average content in the soils of the world (50 ppm). The average value in the conditional-background area is 507 ppm, in the overburden dump is 543 ppm and in the phosphogypsum dump is 354 ppm. The maximum content is observed at the phosphogypsum dump and reaches 876 ppm.

Cadmium accumulates on the slopes of phosphogypsum dump and at the tailings dump, however, its content does not exceed any normative values. At large technogenic objects cadmium content is on the average 0.27 ppm, maximum concentration is 1.54 ppm. The problem of determination and rationing of cadmium in soil has not yet been solved (Plekhanova, 2010).

The content of gross cobalt averages 5.5 ppm, which is lower than the background for podzolic soils (8.4 ppm) and reaches a maximum (18.5 ppm) on reclaimed overburden dumps. In general, cobalt is evenly distributed over the study area.

Another element that tends to accumulate in the area of phosphogypsum and tailings dump location and which also does not exceed background values is chromium. It is relatively evenly distributed in the study area, its average content is 29 ppm, at large technogenic objects there is some tendency to increase, its maximum content reaches there 103 ppm.

Copper content averages 13 ppm and peaks at large technogenic objects at 63 ppm, 4 times higher than background area.

Table 7. Gross content of heavy metals in soils, ppm (in numerator - average value, in denominator - minimum - maximum) (Elsukova, 2022).

The element	Conditional Background Area (n=12)	Reclamation of overburden dumps (n=24)	Technogenic facilities (phosphogypsum dump and tailings pond) (n=7)	Average / median (n=43) / variation coefficient	MPC / MPC of background area / reclaimed landfill / technogenic sites	Zonal background (podzolic soils)	Soils in the southern taiga of the Barents region (median)
Ba	$\frac{507}{84-687}$	$\frac{543}{249-837}$	$\frac{354}{108-876}$	$\frac{530,12}{575}$ 29	–	50,00 (world soils)	84,3
Cd	$\frac{0,26}{0,06-0,64}$	$\frac{0,16}{0,08-0,52}$	$\frac{0,27}{0,04-1,54}$	$\frac{0,19}{0,14}$ 118	1,00 / 2,00 / 0,5	0,7	0,41
Co	$\frac{5,0}{1,5-9,0}$	$\frac{7,0}{2,5-18,5}$	$\frac{3,5}{0,5-7,5}$	$\frac{5,98}{5,97}$ 42	–	8,40	2,4
Cr	$\frac{29}{4-62}$	$\frac{28}{9-45}$	$\frac{32}{1-103}$	$\frac{32,18}{31,8}$ 52	–	180,00	6,17
Cu	$\frac{13}{5-24}$	$\frac{11}{6-19}$	$\frac{16}{1-63}$	$\frac{13,81}{12,5}$ 66	66,00 / 132,00 / 33	15,30	9,69
Fe	$\frac{16560}{5810-33810}$	$\frac{25680}{10080-49350}$	$\frac{16410}{448-32970}$	$\frac{22\ 834}{24\ 570}$ 37	–	–	3 750
Mn	$\frac{216,0}{86,0-458,0}$	$\frac{776,0}{240-3562,5}$	$\frac{355,5}{9,0-852,0}$	$\frac{510,13}{562,491}$ 54	1 500	715	524
Ni	$\frac{12}{5-23}$	$\frac{13}{4-23}$	$\frac{22}{1-105}$	$\frac{16,3}{13,6}$ 95	40,00 / 80,00 / 20,00	23,20	6,07
Pb	$\frac{28}{19-47}$	$\frac{20}{11-26}$	$\frac{14}{5-25}$	$\frac{20,69}{21,8}$ 27	65,00 / 130,00 / 32	11,50	24,2
Sb	$\frac{0,3}{0,2-0,7}$	$\frac{0,4}{0,1-0,7}$	$\frac{0,4}{0,1-1,9}$	$\frac{0,36}{0,29}$ 76	4,5	0,34	0,18
Sc	$\frac{6,8}{1,2-12,4}$	$\frac{7,0}{2,8-9,6}$	$\frac{3,4}{0,4-7,2}$	$\frac{6,81}{7,22}$ 33	–	7*	–
Sr	$\frac{92}{36-142}$	$\frac{171}{82-434}$	$\frac{2381}{65-17000}$	$\frac{627,24}{142}$ 406	–	238	22,7
V	$\frac{40,0}{7,5-90,0}$	$\frac{47,5}{20,0-82,5}$	$\frac{55,0}{2,5-217,5}$	$\frac{50,7}{48}$ 62	150	63,50	11,3
Zn	$\frac{43}{12-100}$	$\frac{51}{18-173}$	$\frac{37}{4-107}$	$\frac{48,82}{46,8}$ 38	110,00 / 220,00 / 55,00	41,30	51,1
pH (H <sub>2</sub> O)	$\frac{5,88}{5,07-7,01}$	$\frac{7,42}{6,59-8,00}$	$\frac{6,86}{5,49-7,40}$	–	–	–	–
pH (KCl)	$\frac{4,89}{3,85-6,71}$	$\frac{6,88}{6,29-7,30}$	$\frac{6,43}{5,71-6,93}$	–	–	–	–

\* By: Yanin, 2007.

**Note.** Values for the last two columns are taken from: (Saet et al., 1990) for zonal background; (Salminen et al., 2004) for soils in the southern taiga of the Barents region (median).

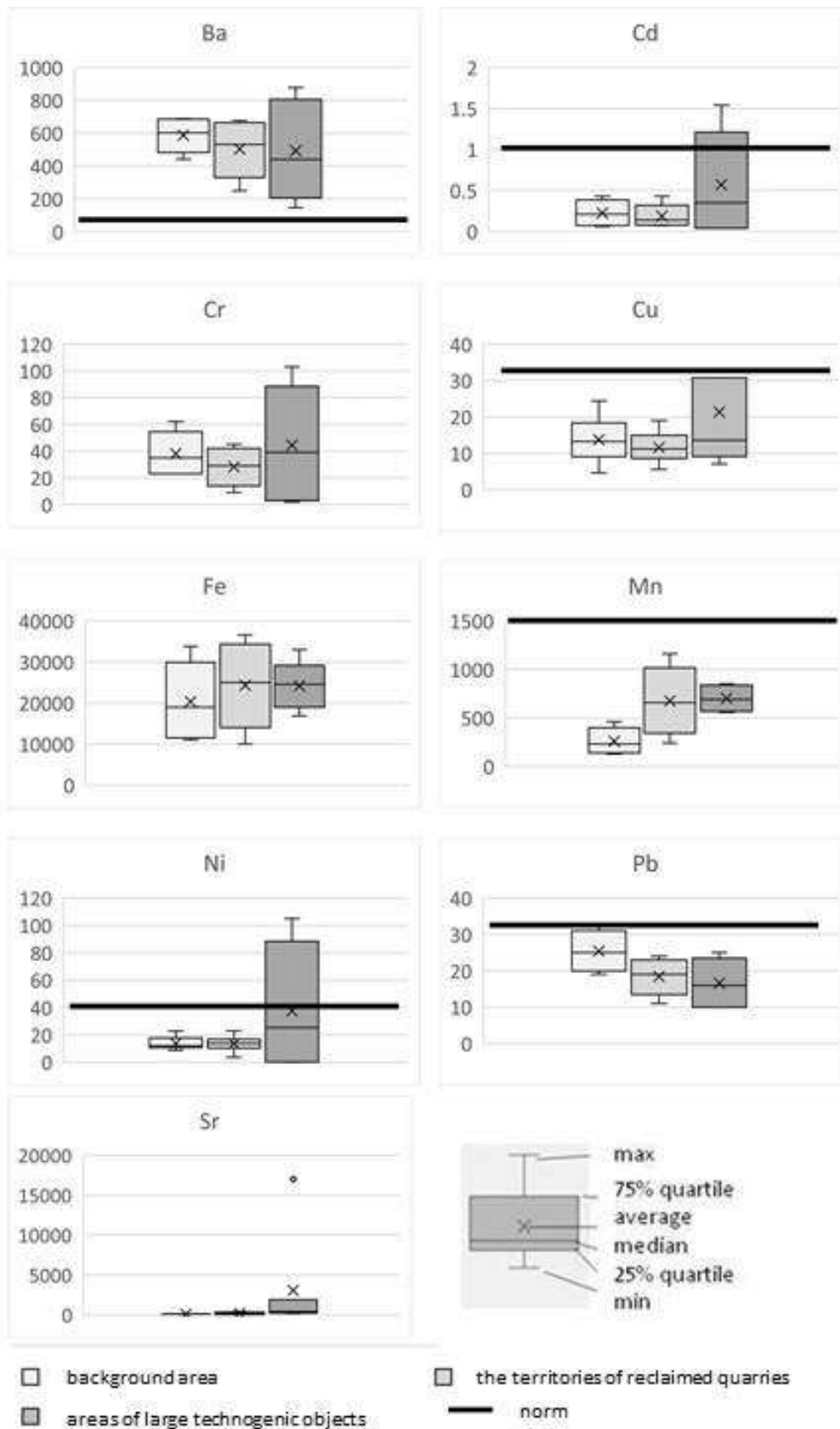


Figure 31. Gross heavy metal content (ppm) in the conditionally-background area, reclaimed quarries and large technogenic sites. The diagram shows the distribution of the data by quartiles. The vertical lines indicate the deviation beyond the upper and lower quartiles. The ×



sign indicates the mean value, and the horizontal line indicates the median. No standard line on the graph means that the standard value is above the values marked on the axis.

Gross iron is relatively evenly distributed over the study area. Its average content in soils is 21175 ppm.

Manganese in the conditionally background area is presented in the average quantity of 216 ppm. However, at the tailings dump and phosphogypsum dump its content increases by 1.5 times, up to 355.5 ppm. At reclaimed pits manganese content reaches 776 ppm (this is almost 4 times higher than in the conditionally-background area). However, all obtained values do not exceed zonal background and MAC for gross content.

The average nickel content is 15 ppm, reaching a maximum of 105 ppm at large technogenic sites, which exceeds the MAC by 5 times, and the background content by 4.5 times. Average values exceed the MAC for large technogenic objects for nickel.

The average gross lead content is 21 ppm, which is lower than the MPC and the background. It slightly decreases in anthropogenic areas (up to 15 ppm). The content of lead is probably related to the impact of road transport.

Antimony content increases towards phosphogypsum dumps and reaches 1.9 ppm, which is five to five times higher than background, but does not reach the MPC for gross content (4.5 ppm).

At present, scandium is not among the elements typical for formation of anthropogenic geochemical anomalies in various environmental components of economically developed areas (Yanin, 2007). Scandium content averages 6.2 ppm, which corresponds to the background (7 ppm).

In the conditionally-background area, the average strontium content is 92 ppm. At the overburden dumps, the average value increases almost twofold and amounts to 171 ppm. On the phosphogypsum dump slopes an abnormal situation is observed. Average strontium content is 2381 ppm which is an order of magnitude higher than zonal background (238 ppm) and clark (340 ppm) and also exceeds the upper limit of normal content of bulk strontium in soils according to V.V. Kowalski (600 ppm), the content of 600-1000 ppm is considered excessive (Kowalski, 1974), with a minimum of 65 ppm and a maximum of 17000 g/kg. These results fully confirm the conclusions of previous researchers about significant accumulation of strontium in phosphogypsum dumps.

Vanadium content is the highest in soils on the phosphogypsum dump slope and at the tailings dump - the average content reaches 55 ppm, and the maximum 217.5 ppm exceeds MPC by 2 times. On conditionally-background and in soils of recultivated pits vanadium content is lower - 40 and 47,5 ppm respectively.

Zinc is evenly distributed over the study area - its average content of 46 ppm approximately corresponds to the background values. It was found that the maximum content of gross forms of barium, cadmium, copper, nickel, antimony, strontium, vanadium and zinc is characteristic of soils sampled at the phosphogypsum dump and at the tailings dump. Cobalt, manganese, lead, scandium are evenly distributed over the study area.

According to the results of variation coefficient calculation, low variation (variation coefficient less than 30 %) is characterized by gross barium and lead; medium (variation coefficient 30-60 %) by cobalt, chromium, iron, manganese, scandium, zinc; high (variation coefficient 60-100 %) by copper, nickel, antimony, vanadium; abnormally high (variation coefficient over 100 %) by cadmium and strontium.

Table 8 and Figure 24 show the gross content of organic matter, fluorine, phosphorus and sulphur in soils and the content of water-soluble forms of calcium, chlorine, potassium, magnesium, sodium ammonium and nitrate forms of nitrogen.

The content of organic matter in soils in the conditional-background area is higher than in soils of anthropogenic sites. The surveyed soils are characterized by high calcium content, with an average content of 14225 ppm. Chlorine is distributed evenly over the study area, with a decrease in concentrations at large anthropogenic objects.

On conditionally background area the content of fluorine compounds does not exceed 1100 ppm, and on average it is 330 ppm. The average content on reclaimed overburden rock dumps amounts to 870 ppm, and on large technogenic objects - 1513 ppm. The maximum fluoride content was detected in a sample taken from the phosphogypsum dump. It amounted to 2860 ppm and was 10 times higher than the zonal background for podzolic soils.

Phosphorus is ubiquitous throughout the study area. The phosphorus content in the whole study area exceeds the known background values. This can be explained by the fact that the region is located in the area of the Kingisepp phosphate deposit. On the conditionally backgrounded territory the average phosphorus content is 1215 ppm, on the recultivated mines the increase of phosphorus content to 4535 ppm is observed, on the territory of large anthropogenic objects - to 8148 ppm. The maximum value in rehabilitated surface mines amounts to 17908 ppm, which is 25 times higher than background.

The content of water-soluble forms of potassium tends to accumulate on anthropogenic objects. On conditionally backgrounded territory it is 27 ppm, on recultivated overburden rock dumps - 110 ppm, on phosphogypsum and tailings dumps - 151 ppm. Magnesium mainly accumulates on overburden dumps (832 ppm - exceeding the median value for soils in the southern taiga of the Barents region), as does sodium (up to 10300 ppm). Nitrogen compounds also accumulate on reclaimed overburden dumps.

Table 8: Macronutrient content of soils (numerator - average value, denominator - minimum - maximum).

The element	Conditional Background Area	Reclamation of overburden dumps	Technogenic facilities (phosphogypsum dump and tailings pond)	Average / median / variation coefficient	MPC / MPC of background	Zonal background (podzolic soils)	Soils in the southern taiga of the Barents region (median)
Гумус (C), %	(n=5) <u>8,7</u> 2,2–17,0	(n=15) <u>5,2</u> 1,0–8,8	(n=8) <u>4,0</u> 0,6–8,1	(n=28) <u>5,5</u> 5,5	–	–	–
Ca*, ppm	n.d.	(n=6) <u>400</u> 25–2300	(n=3) <u>27800</u> 8350–53250	(n=9) <u>14225</u> 9962	–	720	5150
Cl*, ppm	(n=13) <u>29</u> 12–47	(n=15) <u>28</u> 9–68	(n=15) <u>7</u> 22–34	(n=43) <u>27</u> 23	–	–	–
F, ppm	(n=14) <u>330</u> 120–1110	(n=24) <u>870</u> 180–2070	(n=7) <u>1530</u> 540–2860	(n=45) <u>830</u> 600	–	208	–
K*, ppm	(n=13) <u>27</u> 4–97	(n=15) <u>110</u> 13–562	(n=15) <u>151</u> 12–475	(n=43) <u>92</u> 36	–	–	806
Mg*, ppm	n.d.	(n=6) <u>832</u> 23–4377	(n=3) <u>231</u> 31–362	(n=9) <u>631</u> 50	–	–	513
Na*, ppm	(n=13) <u>2800</u> н.ч.–13600	(n=15) <u>10300</u> 620–68800	(n=15) <u>4634</u> н.ч.–33060	(n=43) <u>6221</u> 2527	–	–	61
NH <sub>4</sub> *, ppm	(n=13) <u>7</u> 1–27	(n=15) <u>32</u> 2–345	(n=15) <u>24</u> 4–87	(n=43) <u>22</u> 9	–	–	–
NO <sub>3</sub> *, ppm	(n=13) <u>2760</u> 470–5780	(n=15) <u>6801</u> 27–51411	(n=15) <u>5082</u> 9–25590	(n=43) <u>5208</u> 2874	–	–	–
P, ppm	(n=14) <u>1245</u> 215–5370	(n=24) <u>4535</u> 484–17908	(n=7) <u>8148</u> 3080–13904	(n=45) <u>3897</u> 2376	–	700	927
S, ppm	(n=14) <u>1150</u> н.ч.–16900	(n=24) <u>650</u> н.ч.–11500	(n=7) <u>4400</u> н.ч.–17800	(n=45) <u>1501</u> н.ч.	160	720	1640

Note: n.d. – no data; \* – water-soluble form

Sulphur is very actively accumulated in the soils of the whole studied area, especially on the slopes of phosphogypsum dumps. In three sample areas, a flurry of sulphur content was detected - 16900 ppm (conditionally background area), 11500 ppm (reclaimed overburden rock dumps) and 17800 ppm (phosphogypsum dumps). Values for sulphur content in soils in Table 8 are calculated without these values. The average sulphur content increases from the conditionally background area to the phosphogypsum dumps and averages 750 ppm, which is almost 5 times the MPC.

The concentration coefficients (Cc) of chemical elements in the impact zone of Phosphorit enterprise are presented in Table 9.

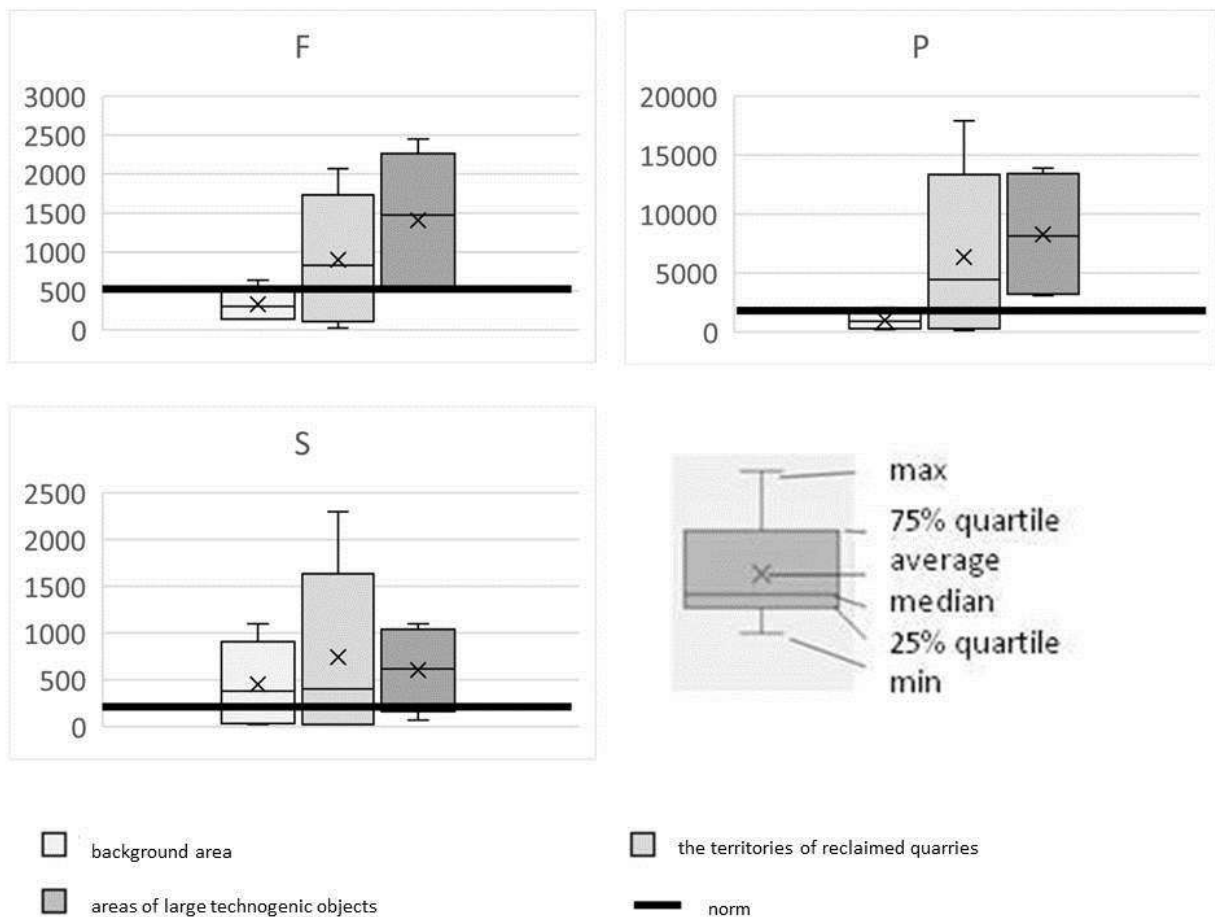


Figure 32. Fluorine, phosphorus and sulphur content (ppm) in the conditional background area, reclaimed quarries and large technogenic sites. The diagram shows the distribution of the data by quartiles. The vertical lines indicate the deviation outside the upper and lower quartiles. The × sign indicates the mean value and the horizontal line the median

To calculate the coefficients we used: zonal background for podzolic soils (according to Yu. E. Saet), content in soils of southern taiga of the Barents region (median), as well as hygienic standards.

Out of the 19 elements studied half of them (10 elements) have MAC / MPC, 15 elements have a zonal background, 17 elements have a median content in the soils of the southern taiga in the Barents region. Thus, all of the elements studied have a normative or background value for comparison. The zonal background for podzolic soils and southern taiga soils in the Barents region is in most cases below the hygienic standards.

Values of maximum permissible concentration of chemical elements in soils of large technogenic objects, calculated according to MPC / MPC showed that hygienic norms are exceeded: for vanadium - 1,5 times; for copper and zinc - 2 times; for cadmium - 3 times; for nickel - 5 times; for sulfur - 7 times; for labile fluorine - 3 times.

The average values of the content of elements in the soils of technogenic objects exceed the hygienic norms only for sulfur. Coefficients of concentration of average and especially

maximum contents of elements in soils of large technogenic objects show that values of zonal background for the majority of elements are considerably exceeded. On average for the territory under study the background is exceeded by zinc and nickel 1.2 times; by copper 1.4 times; by antimony 1.5 times; by lead 2 times; by fluorine 7 times; by phosphorus 12 times; by barium 8 times; by strontium 13 times; by calcium 40 times (Table 9).

Table 9: Coefficients of concentration Kk of the gross content of chemical elements in the impact area of the enterprise Phosphorit.

Territory / area statistical indicator	Norm	Elemental concentration ratios (shown in brackets)
Whole area (average)	Zonal background of podzolic soils (by Yu. Saet)*	Sb (1.1), Zn (1.2), Pb (1.8), F (4.1), P (5.8), Ba (10.6), Ca (19.8)
Technogenic sites (phosphogypsum dump and tailings pond) (medium)	Zonal background of podzolic soils (by Yu. Saet)*	V (1.03), Zn (1.2), Ni (1.2), Cu (1.4), Sb (1.5), Pb (1.7), F (7.3), Ba (8), P (11.6), Sr (12.9), Ca (38.6)
Technogenic sites (phosphogypsum dump and tailings pond) (max)	Zonal background of podzolic soils (by Yu. Saet)*	Mn (1.2), Cd (2.2), Pb (2.2), Zn (2.6), V (3.4), Cu (4.1), Ni (4.5), Sb (5.5), F (13.8), Ba (18), P (19.9), Sr (71), Ca (74)
Reclamation of overburden dumps (medium)	Zonal background of podzolic soils (by Yu. Saet)*	Zn (1.1), Pb (1.7), F (4.0), P (6.4), Ba (10)
Conditional Background Area (average)	Zonal background of podzolic soils (by Yu. Saet)*	Zn (1.2), P (1.3), Pb (2.2), F (1.5), Ba (12)
Whole area (median)	Content in soils in the southern taiga of the Barents region (median)**	Mn (1.1), Cu (1.4), Sb (1.6), Ca (1.9), Ni (2.2), Co (2.5), P (2.6), V (4.2), Cr (5.1), Ba (6.3), Sr (6.3), Fe (6.6)
Whole area (average)	TAC/TCP ***	S (2.7)
Technogenic sites (phosphogypsum dump and tailings pond) (medium)	TAC/TCP ***	S (3.9)
Technogenic sites (phosphogypsum dump and tailings pond) (max)	TAC/TCP ***	V (1.5), Cu (1.9), Zn (1.9), Cd (3.1), Ni (5.3), S (6.8), F <sub>mob.</sub> (2.9)
Reclamation of overburden dumps (max)	TAC/TCP ***	S (14.4)
Conditional Background Area (max)	TAC/TCP ***	S (6.9)

\* (Saet et al., 1990).

\*\* (Salminen et al., 2004).

\*\*\* Decree of the Chief State Sanitary Doctor of the Russian Federation of 28.01.2021 N 2 "On Approval of Sanitary Rules and Norms SanPiN 1.2.3685-21...".

On the territory with zonal background the zonal background is exceeded by 1,2 times for zinc; 1,3 times for phosphorus; 1,5 times for fluorine; 2,2 times for lead; 12 times for barium. MPC in the conditional-background area was exceeded 7 times for sulphur.

Coefficients of element concentrations calculated using a median value for soils in the southern taiga of the Barents region are exceeded by 12 elements, including copper and antimony (1.5 times), calcium and nickel (2 times), cobalt and phosphorus (2.5 times), vanadium (4 times), chrome (5 times), barium and strontium (6 times), iron (7 times).

In general, background exceedances are observed for most of the elements (for 13 out of 19 studied). In general, when compared, the Kc calculated for zonal background (mean) and southern taiga soils of the Barents region (median) are the same for the list of elements. The coefficients calculated from the median below are smoother. Coefficients greater than one calculated for both zonal background (mean) and southern taiga soils of the Barents region (median) are observed for barium, calcium, phosphorus, fluorine, strontium.

Figure 25 shows the ratio of mobile forms and gross content of some heavy metals in the studied area.

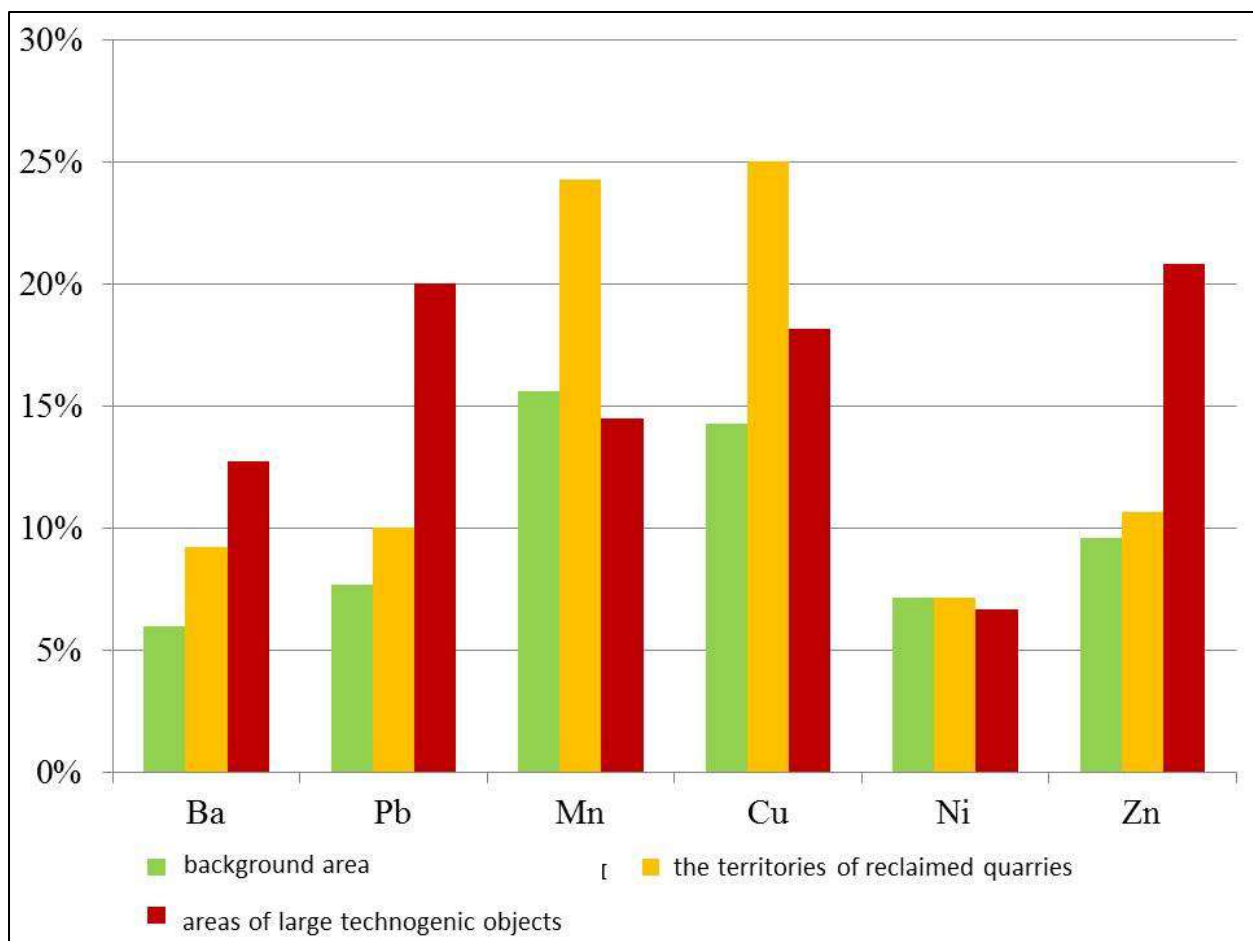


Figure 25. Mobility of heavy metals from the gross contents in the study area.

The current challenges include the search for patterns of transition of TM from the labile state into easily accessible forms for plants and microorganisms (Nevdov et al., 2018). This

indicator makes it possible to assess, among other things, the availability of trace elements to plants.

The percentage of mobile forms increases with the increase of the gross content. Low-mobile (0-1 %) elements are absent, medium mobility (1-10 %) is characteristic for barium, lead, nickel and zinc, high (10-20 %) - for manganese and copper, high-mobile (more than 20 %) elements are absent.

For most elements mobility increases with increasing degree of anthropogenic disturbance of the site (barium, lead, manganese, copper, zinc). Percentage of mobile forms of barium is high only on the territory of large technogenic objects (13%), on other territories it does not exceed 6-9%. Percentage of mobile forms of lead is rather high at large technogenic objects. At the content of mobile forms of 3 ppm the gross content is 15 ppm. At the same time on conditionally-background territory the gross content of lead on the average is 26 ppm, and the content of mobile forms is only 2 ppm.

For manganese the situation is as follows: relative amount of mobile forms increases from conditionally background area (16 %) to recultivated quarries (24 %), but decreases at large technogenic objects (15 %). Copper is characterized by increased mobility throughout the study area. The mobile forms of nickel in the investigated territory make up 6-7 % of the total content, with slightly less mobile forms at large technogenic objects. In phosphogypsum dump and tailing pond soils the relative amount of mobile forms of zinc is 21%. On other territories this indicator does not exceed 10-11 %. Thus, anthropogenic activity of phosphate mining increases the mobility of barium, manganese, lead, copper and zinc.

During the dissertation study, toxicity was also determined by biotesting for 60 soil samples. The test object was *Daphnia magna* Straus daphnia. However, when analyzing the results obtained, it turned out that the survival rate of *Daphnia* in soil extracts obtained from samples taken in the field area is close to 100%, while in the conditional-background area the median of this indicator is 60%. The explanation of this fact can be found taking into account acidity of soils. Most likely it was the lower pH values that caused the environment to be more toxic for the daphnia. This method was taken as an experimental one and after the work it can be concluded that in regions with natural soil acidity less than 5.5 pH it is not worth using biotesting with the test object *Daphnia magna*. In the territory of the Kingisepp phosphate deposit the soil acidity is 6-7 units of pH, which is a comfortable environment for *Daphnia*, therefore there was a high survival rate in extracts of soil samples from the deposit as well. However, we can also state that in the area of phosphogypsum dumps and overburden rock dumps, in the production area and tailing pits, soils are not toxic, according to the selected biotesting method.

The impact of phosphate fertilizer production on the territory of the Kingisepp phosphate rock deposit results in the formation of positive landforms - dumps, which change the migration flows of chemical elements. The production area is located on the river terrace of the Luga River, bordering the river valley. The river floodplain is located at elevations up to 10 m from sea level. The main part of the notional background area is at elevations of 10 to 30 m, and the terrain is flat, with sub-horizontal or slight slope present in the terrain (within one PTC) (Figure 26). In the southern area of the deposit, which stretches in the latitudinal direction, there are overburden dumps with anthropogenic channels running between them. The height of dumps at the foot is from 10 to 20 meters, on top - from 20 to 30 meters. The average height of the heaps is 5 to 10 metres. The highest point in the studied area is the top of the phosphogypsum dump (more than 60 m above sea level). Accordingly, anthropogenic activities have resulted in the formation of rugged landforms and elevation differences of up to 30 m.

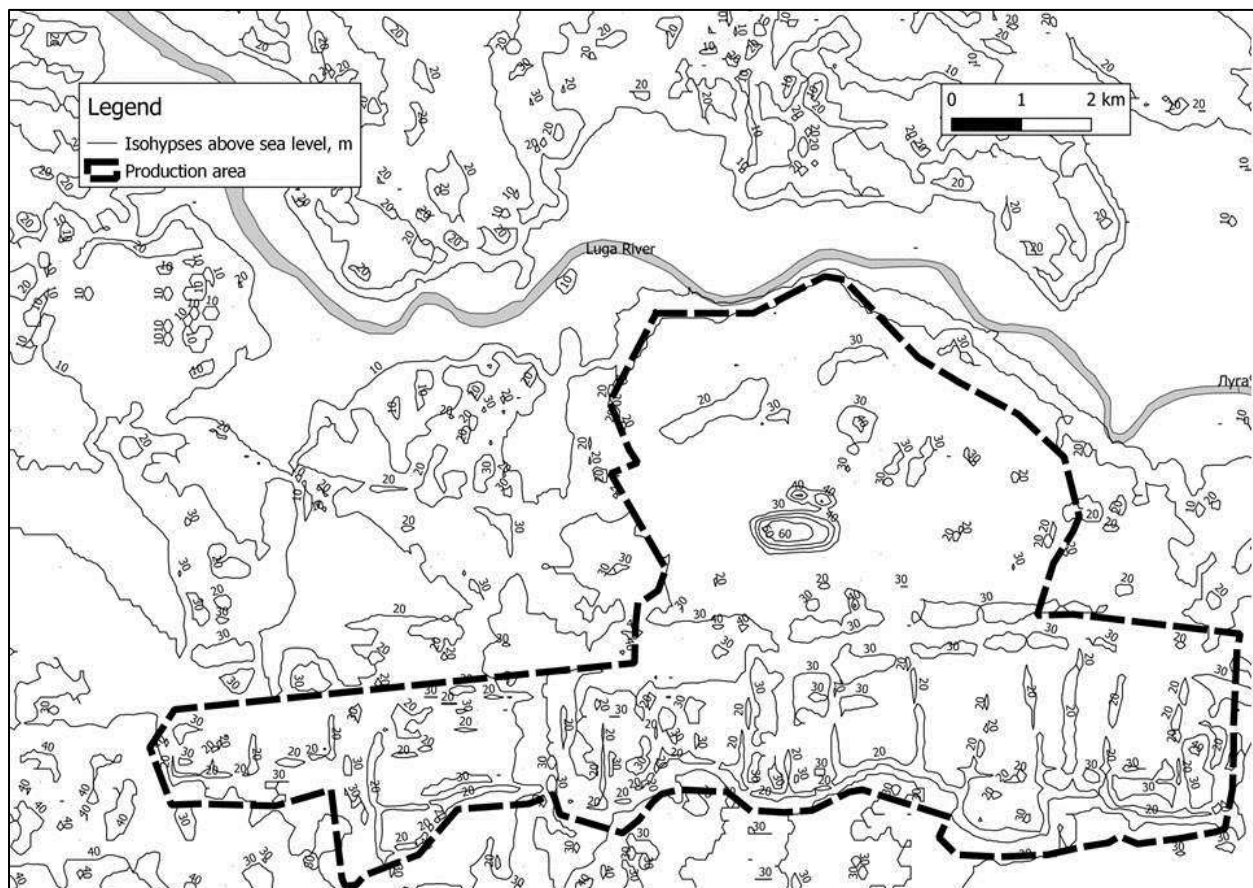


Figure 26. Topography of the study area (derived from the SRTM digital elevation model).

A number of anthropogenic processes are responsible for the changes in the terrain. The first of these is the extraction of overburden to the day surface, as phosphate rock mining requires the movement of significant volumes of "waste" rock, mainly limestone and dolomite, which are stored either on the surface of the river terrace or in excavations from phosphate rock mining. The second process is the formation of quarry openings, which are partly covered by



overburden, but partly remain as anthropogenic channels. The third process is the stockpiling of phosphogypsum, a waste product of the industry.

#### **4.2 Indicators of the impact of soil phosphate fertilizer production**

To find indicators of anthropogenic impacts of phosphate fertilizer production on soils, it was decided to compare soil conditions in a reference-background area and in a combined area of reclaimed overburden dumps, phosphogypsum dumps and tailings to increase the representativeness of the sample based on the sampled soils near anthropogenic facilities. This amalgamated area was decided to be named "production area" or "area of the Kingisepp phosphate deposit". Thus, there will be a comparison of the soil cover that has directly experienced anthropogenic impact ("the deposit area") and the soil cover located at a distance of 4-9 km from the main sources of impact ("the conditionally background area"). The Mann-Whitney U-test was chosen to look for differences because the vast majority of the samples did not follow the normal law of distribution, according to the Kolmogorov-Smirnov criterion, and consequently parametric criteria could not be used. As a consequence, the measure of central tendency was the median rather than the mean, with the 25th and 75th quartiles. The only exceptions are the samples for gross lead and iron content. They for both territories (for both the conditional-background and the field) corresponded to the normal law of distribution. Consequently, for these elements, the samples were compared and differences were found by Student's T-test and the arithmetic mean with confidence interval, minimum and maximum values served as a measure of central tendency.

##### *Changes in soil acidity*

Figure 27 shows the values of actual soil acidity in the study area. The impact of phosphate fertilizer production in the territory of the Kingisepp phosphate deposit compared with the conditionally-background territory results in an increase of pH by 2 units for both water extraction (actual acidity) and salinity (potential acidity). Acidity was measured in 82 samples: 29 samples from the conditionally-background area and 53 samples from the field area. Differences were searched by Mann-Whitney U-criterion, the distribution did not follow the normal law of distribution. The median actual acidity in the conditional-background area was 5.3 pH units (25th-75th quartiles: 4.6-5.6), and in the field area was 7.2 pH units (25th-75th quartiles: 6.9-7.6) (Figure 27).

In a study by A.D. Zhukova (Zhukova et al., 2016), the actual acidity in the conditional-background area was 6.5 pH units and in the impact area 6.5-6.6 units. This study was conducted in the Moscow region. The production of phosphate fertilizers in it did not affect the pH value.

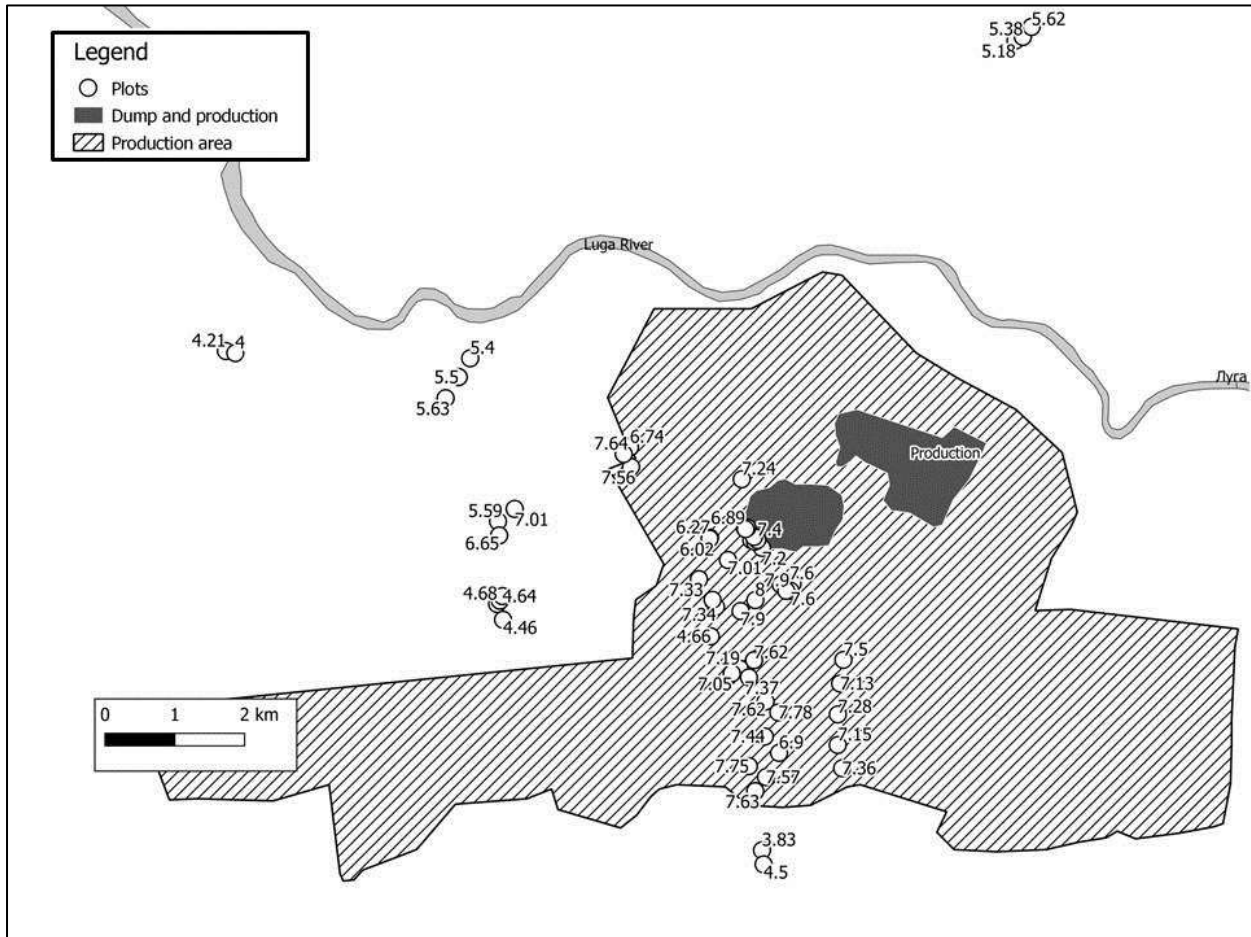


Figure 27. Values of current soil acidity in the study area (in pH units).

In the present study, the difference between the acidity of the conditionally background area and the deposit area was 2 pH units, from which we can conclude that for the taiga zone the impact of phosphate fertilizer production manifests itself on acidity more significantly than in regions of our country located to the south.

Median potential acidity in the conditionally-background area was 4.3 pH units (25th-75th quartiles: 3.9-5.0), and in the field area - 6.6 pH units (25th-75th quartiles: 6.3-6.9). Transition of soils from slightly acidic to neutral means that a number of plants for which a neutral environmental reaction is unacceptable may disappear from the deposit area.

In a similar study (Zhukova et al., 2016), in the impact zone of the phosphate fertilizer production facility, soil pH ranged from 5.6 to 7.3 units. That is, soil acidification did not occur either, which is consistent with the results obtained in the present study. It is most likely that the chemical composition of the overburden - limestone and dolomite - is the reason for the increase in pH.

#### *Changes in water-soluble forms of sodium and ammonium nitrogen*

Median content of water-soluble forms of sodium in the conditional-background area was 7700 ppm (25th-75th quartiles: 2700-13600 ppm), and in the field area - 41300 ppm (25th-75th quartiles: 21400-77000 ppm). Soils of the deposit contain water-soluble sodium in excessive

amounts. The sodium content in phosphogypsum ranges from 600 ppm to 6200 ppm (Tayibiet al., 2009), other data (Saadaoui et al., 2017) to 47000 ppm, in US phosphogypsum can fall below 300 ppm (Arocena et al., 1995). The median water-soluble sodium content in Kingisepp phosphogypsum is 20400 ppm, which is significantly higher than the global figures. From this, it can be assumed that sodium enters the adjacent landscapes from phosphogypsum. However, the median sodium content in the deposit area is over 40000 ppm. Consequently, overburden and industrial emissions could be an additional source of sodium.

Median content of water-soluble forms of ammonium nitrogen in the conditionally-background area is 5 ppm (25th-75th quartiles: 4-7 ppm), in the field area - 13 ppm (25th-75th quartiles: 5-25 ppm). Unfortunately, similar studies of the impact of phosphate fertilizer production did not reveal a pattern of increase in water-soluble ammonium forms of nitrogen in the soil, so there is nothing to compare the results obtained at the moment. The only information that can be referred to is the impact description from the IFC (Guidelines for the Protection of..., 2013), which states that nitrogen compounds can enter adjacent landscapes during the production of superphosphate, the most common phosphate fertiliser.

#### *Changes in the content of mobile forms of manganese and iron*

The impact of phosphate fertilizer production on the territory of Kingisepp phosphate deposit compared with the conditionally-background territory leads to an increase of mobile forms of manganese by 5-6 times and a decrease of mobile forms of iron by 5-6 times. The mobile forms of manganese and iron were measured in 79 samples: 26 samples from conventional background area and 53 from the deposit area. Differences were searched by Mann-Whitney U-criterion, distributions did not correspond to the normal law of distribution.

The median content of mobile forms of manganese in the conditional-background area was 25.5 ppm (25th-75th quartiles: 13.5-42 ppm) and in the field area 120 ppm (25th-75th quartiles: 43.5-208.5 ppm) (Figure 28). These values of mobile manganese are not toxic to vegetation. However, they can be used to identify the impact of phosphate fertilizer production, as there is a pattern of increased levels of mobile forms of manganese in areas affected by the production in question.

Overburden rocks are a likely source of manganese. Carbonell-Barrachina et al. (2002) reported that the content of mobile forms of manganese in phosphogypsum dump is low at 4 ppm. In the present study, the content of mobile forms of manganese is 1.5 ppm.

The median content of mobile forms of iron in the conditional-background area is 170 ppm (25th-75th quartiles: 70-500 ppm), in the deposit area is 20 ppm (25th-75th quartiles: 10-60 ppm).



conditional-background profile in the forest ecosystem. Tellingly, in the same soil sample the content of mobile manganese was 4 ppm (an indirect confirmation of the antagonism of these two elements in the labile state). In bog ecosystems the content of mobile iron reached 605 ppm. At the overburden dump the maximum values are 135 ppm and at the phosphogypsum dump the maximum is 120 ppm.

*Change in gross iron content of manganese, lead and strontium*

Average iron content in the conventional-background area is  $16600 \pm 7800$  ppm (minimum and maximum values: 5900-33900 ppm), in the deposit area is  $23200 \pm 10700$  ppm (minimum and maximum values: 500-49400 ppm). The gross iron content in the deposit area is higher than in the conditionally-background area, in contrast to the content of mobile forms. Neutral environmental conditions promote consolidation of iron in insoluble forms.

The iron content in the phosphogypsum dump, according to the literature (Tayibi et al., 2009), is between 200-6300 ppm, other data (Saadaoui et al., 2017) range from 100 to 1750 ppm, in US phosphogypsum can be as high as 7000 ppm (Arocena et al., 1995). The median content of Kingisepp phosphogypsum is 1400 ppm, which is consistent with data from other researchers. However, an accumulation of gross iron content (23700 ppm) has been observed in the deposit area. Consequently, the phosphogypsum dump cannot be a source of this element. There are also no data on iron emissions from phosphogypsum production.

The gross iron content exceeds the regional background of the southern taiga of the Barents region by a factor of 4 in the conventional background area, and by a factor of 6-7 in the deposit area. These exceedances may be due to a low regional background. But the difference in iron content is not traceable in all similar studies. In China, there was no significant difference between iron content in the conditionally-background area and the industrial phosphate fertilizer production area (Wang et al., 2019). However, this may be due to inaccuracies in the selection of the conditional-background area, as the iron content in the described study was significant (30000-40000 ppm). Alternatively, the reason for the elevated iron content is not due to production impacts but to the composition of the overburden (as in the case of manganese).

The median manganese content in the conditional background area is 180 ppm (25th-75th quartiles: 160-230 ppm) and in the deposit area is 620 ppm (25th-75th quartiles: 470-770 ppm). The increased manganese content is most likely due to the composition of the rocks extracted to the surface during mining, as the highest concentrations of manganese are characteristic of the host rocks (Kabata-Pendias et al., 1989), which are the limestone and dolomite of the Volkhov and Obukhov Formations.

Researchers (Tayibi et al., 2009) note that manganese content in phosphogypsum waste is low, not exceeding 15 ppm (conclusion based on examination of many different phosphogypsum

dumps). However, in the Kingisepp dump, the median manganese content is 45 ppm, which exceeds world levels of manganese content, but at the same time is significantly lower than the content of manganese in the deposit soils. The likely source of manganese may be overburden rocks (dolomites and limestone), which may have impacted adjacent landscapes during surface extraction and movement. In Lebanon, similar production has manganese contents in soils of adjacent landscapes as high as 1200 ppm, with production in Lebanon also located on limestone bedrock (Aoun et al., 2010), but not every phosphate fertilizer production increases soil manganese content (Wang et al., 2019). Manganese content in the deposit area exceeds the zonal background and content in the conditionally-background area, indicating manganese accumulation in the deposit area.

The average lead content in the conditional-background area is  $29 \pm 7$  ppm (minimum and maximum values: 20-48 ppm), in the deposit area is  $19 \pm 5$  ppm (minimum and maximum values: 6-26 ppm). The content of lead characteristic of natural ecosystems is mainly due to the influence of the chemical composition of the underlying rocks. In modern environmental protection practices, lead contamination is extremely common in urban and industrial areas, so a significant part of the soil cover contains lead in amounts exceeding the MAC. This is especially true of the surface horizons in the areas of major highways. In our case, however, there are no signs of lead contamination. Reduction of the gross lead content in the deposit area compared to the content in the conditionally-background area may be caused by the fact that lead is contained in calcareous rocks in extremely small amounts compared to other rocks (Kabata-Pendias et al., 1989). In the Earth's crust, lead accumulates in acidic igneous rock series and in clayey sediments, where typical lead concentrations range from 10-40 ppm. In contrast, in ultramafic rocks and calcareous sediments, lead content is 0.1-10 ppm. Another reason that can lead to different concentrations of lead can be soil type. In more clayey soils (e.g. gleyzemes) the average lead content is 67 ppm, while in sandy soils (e.g. podzols) it is only 10-15 (Kabata-Pendias et al., 1989).

In a study (Zhukova et al., 2016), the conditional background lead content was 4.7 ppm, and in the impact zone of phosphate fertilizer production it was 9.3-23.2 ppm. That is, lead contamination of the area was observed. In the present study the pattern is reversed: the average lead content decreases from 29 ppm in the conditionally background area to 19 ppm in the field area. This may be due to the main source of lead intake into the adjacent landscapes - phosphogypsum dump, as the median lead content in the Kingisepp phosphogypsum dump is 10 ppm. These data are consistent with a study (Tayibi et al., 2009), which provides data on the chemical element content of various phosphogypsum. Phosphogypsum from Idaho (USA) had a lead content of 3-7 ppm and Tunisian phosphogypsum had a lead content of 5 ppm. Another

study (Al-Hwaiti et al., 2015) gave similar data that lead content in soils in the area of phosphogypsum production impact and in phosphogypsum itself did not exceed 7 ppm.

Lead in the landscapes adjacent to phosphate fertilizer production is attributed to process emissions from phosphoric acid production. However, this only occurs during the thermal process (one of the technologies) (Conservation Guidelines..., 2013). At the Kingisepp phosphate deposit, a wet process for phosphoric acid production (extraction phosphoric acid production) is used, so there is no release of lead.

Figure 29 shows the gross strontium content in soils in the study area.

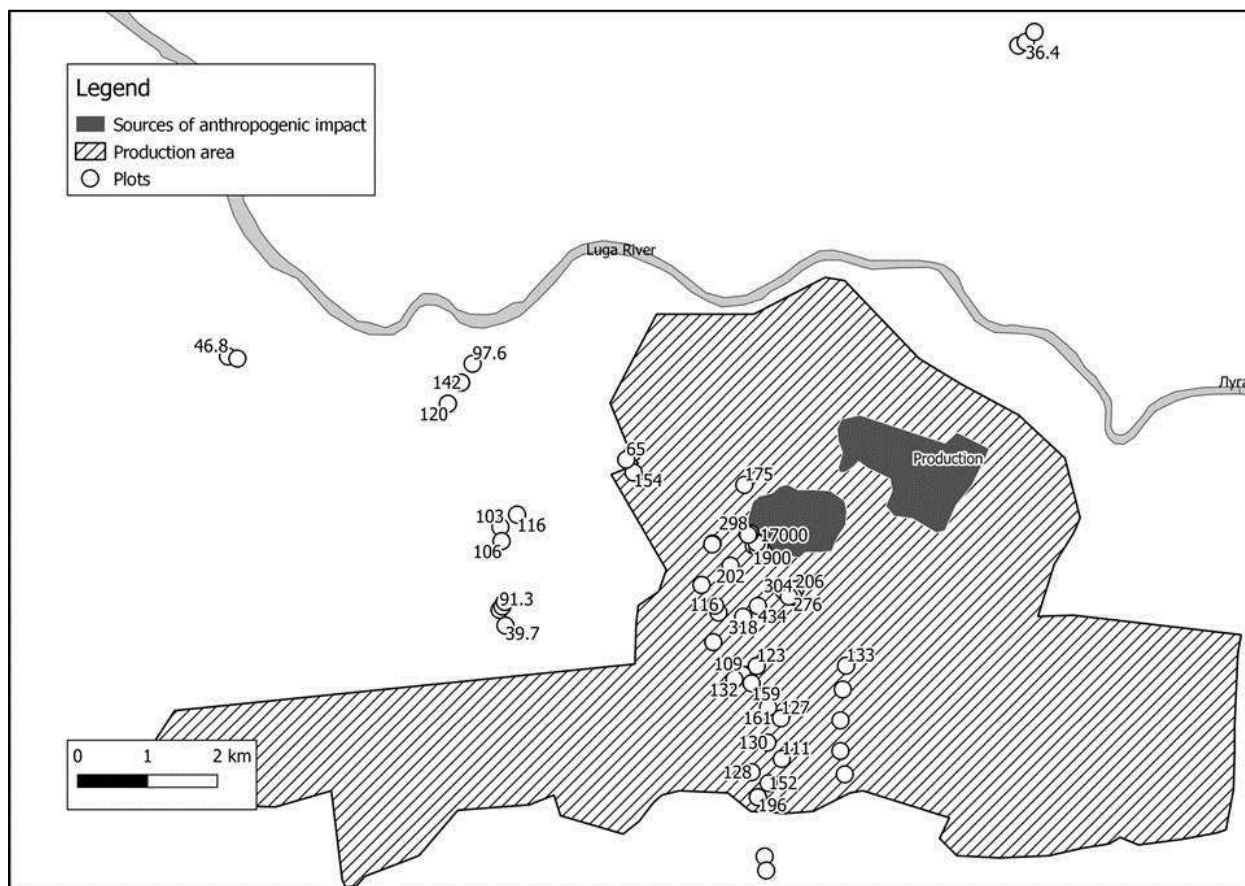


Figure 29. Gross strontium content in soils in the study area (in ppm).

Median of strontium content in conventional background area is 95 ppm (25th-75th quartiles: 85-105 ppm), in deposit area - 155 ppm (25th-75th quartiles: 130-275 ppm). It should be noted that strontium is a fairly common trace element in the Earth's crust, it is concentrated mainly in igneous rocks of medium composition and in carbonate sediments, which are common in the field area (in the form of dolomites and limestones of Volkhov and Obukhov formations). Thus, according to literature data (Kabata-Pendias et al, 1989) the average strontium content in soils of the taiga zone (podzols) is 118 ppm, and in soils of broad-leaved forests (gray forest soils) the average content is 520 ppm. The geochemical and biochemical properties of strontium are similar to those of calcium. Strontium is easily mobilized by weathering, especially in acidic

oxidizing environment. However, in our case, the medium reaction of the deposit soils is close to neutral, and it is reasonable to consider the gross strontium content as an indicator.

Figure 30 shows the distribution of bulk strontium in the study area.

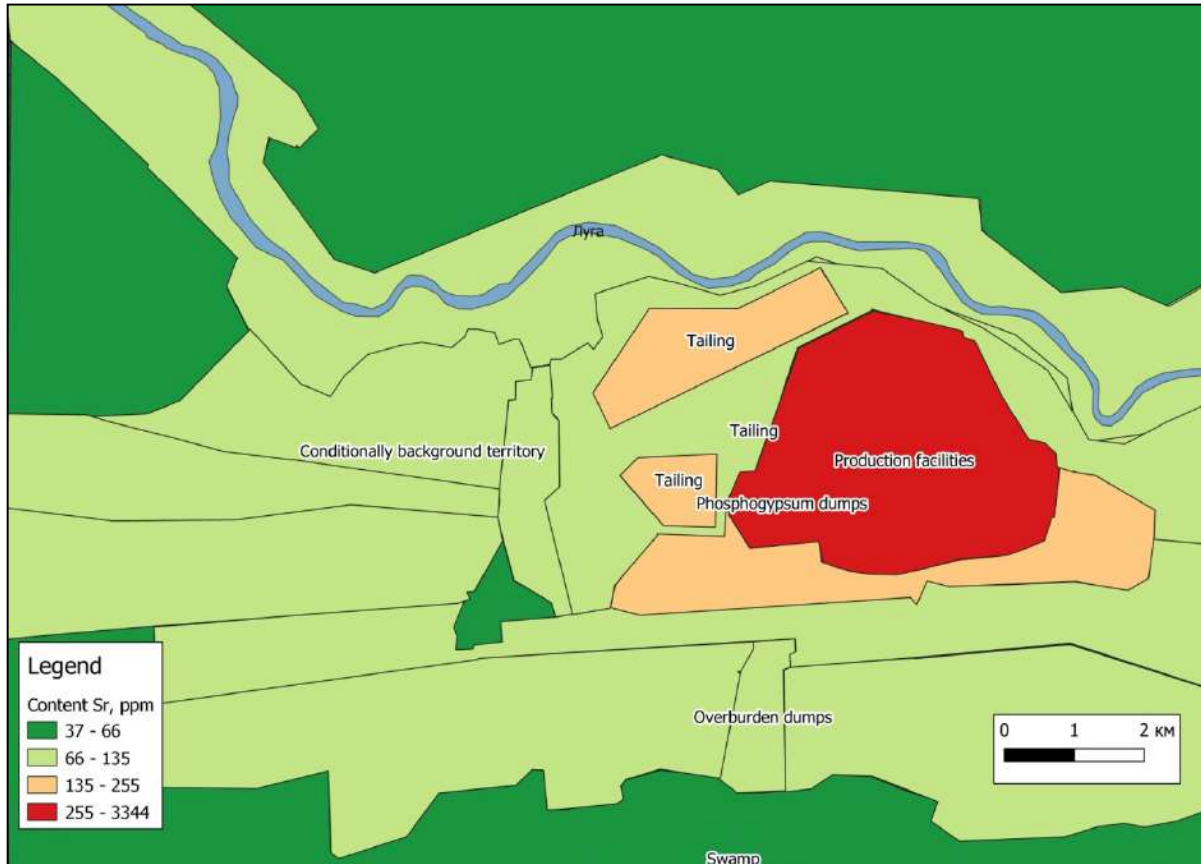


Figure 30. Schematic of strontium distribution in soils in the study area.

Elevated strontium content in the soils of the deposit compared to the content in the conditionally-background area does not result in negative consequences for the vegetation cover, since the neutral reaction of the environment and the abundance of calcium translate strontium into forms inaccessible to plants, but this indicator can be used to identify the impact of phosphate fertilizer production.

Strontium is a constant contributor to phosphate fertilizer production. In particular, strontium is one of the indicators of the impact of phosphogypsum dumps on adjacent landscapes. According to the literature (Petrenko et al., 2012), phosphogypsum contains from 2713 to 6500 ppm. In phosphogypsum at the Kingisepp phosphogypsum deposit the median strontium content is 1970 ppm, which is consistent with the literature data. In the study by Petrenko (Petrenko et al., 2012) the mean bulk strontium content on transects up to 10 km from the phosphogypsum dump was 131 ppm, in the present study the median bulk content on all profiles up to 8 km from the phosphogypsum dump was 132 ppm, which is consistent with data obtained in another region, but with the same type of anthropogenic impact. In the same study the content of mobile forms of strontium was 26 ppm, in this thesis it was 10 ppm. The lower



mobility may be due to an increase in the pH value. Strontium is an element in significant amounts contained in phosphogypsum dumps, and the main studies on strontium contamination of adjacent landscapes are aimed at assessing the impact from dumps (Petrenko et al., 2012), so it would be logical to assume that strontium also enters the study area by aerogenic pathway from phosphogypsum dumps.

The highest strontium content (more than 250 ppm) is observed only in the area of phosphogypsum dump and within several tens of meters from the dump (Nedbaev, Elsukova, Chunyaeva, 2023). Also at the tailings ponds and at the nearest accumulation of overburden rock dumps, 135-255 ppm of strontium is found. At the farthest conditional background areas, the strontium content is less than 70 ppm. It is worth noting that despite the increase in strontium content in the territory of the deposit, the median of its content does not exceed the zonal background (238 ppm).

On the territory of the deposit strontium content is 7 times higher than the regional background values, and on the adjoining territory - 4 times higher. At the same time, in the most remote areas the concentration coefficient decreases to 2 and below. At the same time, it should be noted that the increase in strontium content is not characteristic of every production of phosphate fertilizers. For example, in soils adjacent to similar production landscapes in China, the increase in strontium content was not more than 10% compared with the conditionally background area (Wang et al., 2019).

#### *Change in gross fluorine and phosphorus content*

The median fluoride content in the conditional background area is 240 ppm (25th-75th quartiles: 190-350 ppm), in the field area it is 770 ppm (25th-75th quartiles: 520-1210 ppm). Figure 31 shows the distribution of fluoride content in soils in the study area.

The situation with fluorine is similar to strontium distribution, only even more pronounced: the highest concentrations are confined to the phosphogypsum dump. Within an area 2-3 km from the production site, all areas contain 400-1365 ppm of fluorine, which is significantly higher than in the conditionally-phased area (Nedbaev, Elsukova, 2022). The cleanest, in terms of fluoride content, were the forest ecosystems to the west of the main production facility. There, fluoride content did not exceed 100 ppm.

Limestone and bedrock are not characterised by such high fluoride contents that we find in soils in the field area. High concentrations of phorus in the soil may indicate fluoride contamination of the deposit area, which may subsequently lead to plant fluorosis (Urazaev et al., 2000).

Fluoride can enter adjacent landscapes from both phosphoric acid and superphosphate production emissions and from aerogenic transport of phosphogypsum dump material, as

according to (Tayibi el al., 2009), phosphogypsum contains 150-1200 ppm, according to others (Saadaoui et al., 2017) 1000-1800 ppm. Phosphogypsum from the Kingisepp phosphate deposit contains 1450 ppm of fluorine, which is consistent with the data obtained. However, there are sites where phosphogypsum is formed with significant fluorine content: up to 17670 ppm (Arocena et al., 1995).

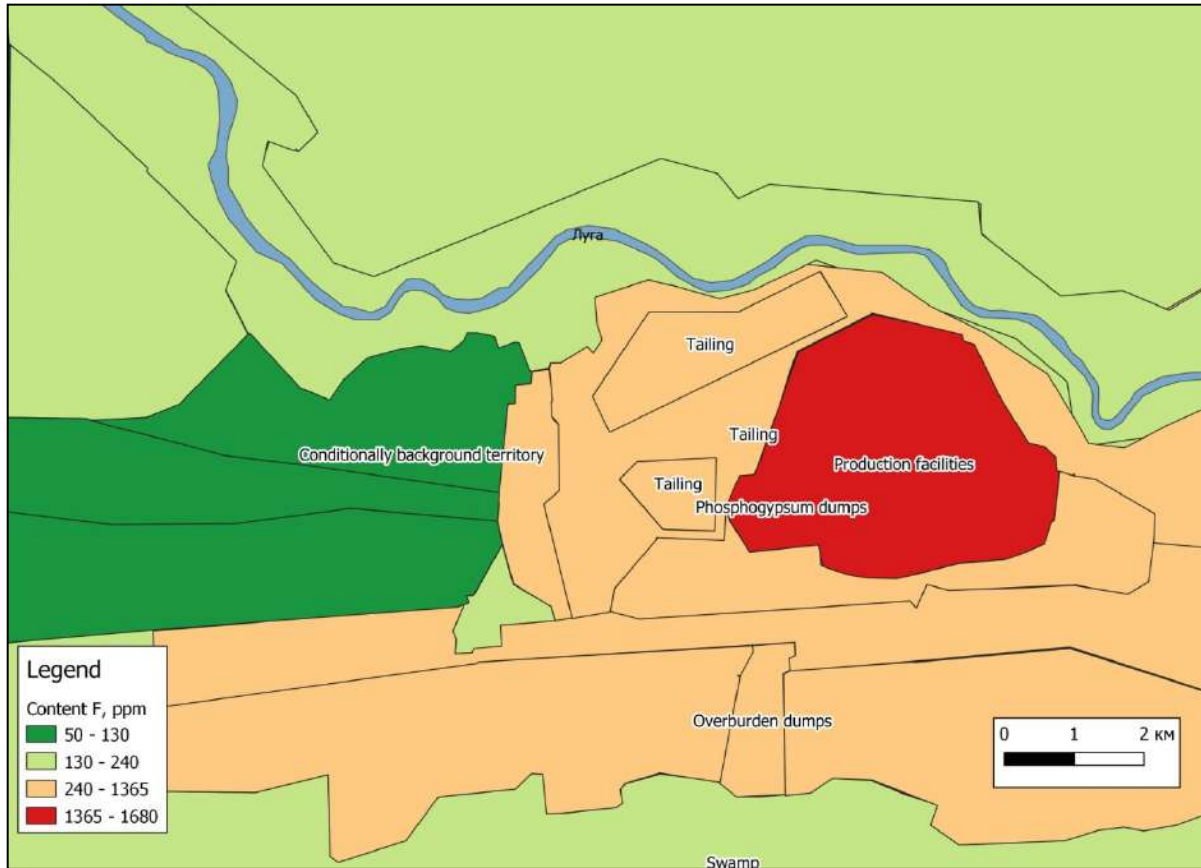


Figure 31. Schematic of the distribution of gross fluoride content in soils in the study area.

The median phosphorus content at the conditional-background site is 1080 ppm (25th-75th quartiles: 690-1290 ppm), and at the field site is 4140 ppm (25th-75th quartiles: 2160-6290 ppm). Figure 32 shows the scheme of phosphorus distribution in soils in the studied area.

The distribution of phosphorus is almost identical to that of fluorine, which may indicate that they come from the same source (presumably anthropogenic). Up to 3 kilometres from the production facility, all soils contain at least 2500 ppm phosphorus, which is significant compared with conventional phosphorus territories, especially with forest ecosystems to the west of the production facility.

The upper limit of phosphorus content in soils has not been established, nor have credible changes in vegetation cover that occur when gross phosphorus is over-abundant been determined. However, a several-fold increase in phosphorus content is an indicator of the anthropogenic impact under consideration. In the whole studied area (both on conditionally-

background and in the field) values greater than MPC (in terms of P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) - more than 200 ppm - were observed.

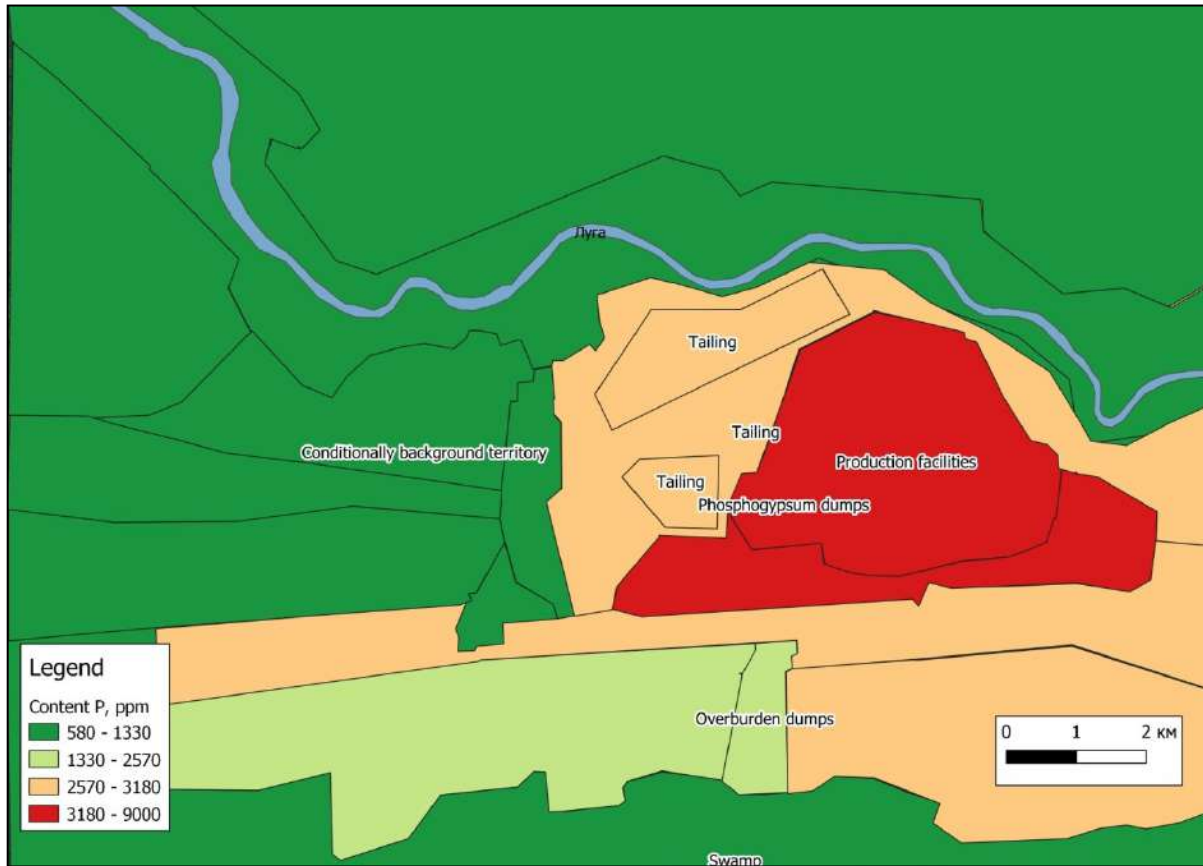


Figure 30. Schematic of the distribution of gross phosphorus content in soils in the study area.

Phosphorus is contained in phosphogypsum in amounts ranging from 2060 ppm to 8000 ppm (Tayibi et al., 2009), Idaho phosphogypsum (USA) contains 2200 ppm of phosphorus (Arocena et al., 1995). In the Kingisepp phosphogypsum deposit, the average phosphorus content is 5000 ppm, which is firstly in agreement with literature data, and secondly, possibly responsible for the elevated phosphorus content in the deposit to the above values (4140 ppm). A review (Saadaoui et al., 2017) states that the phosphorus content of phosphogypsum varies between 200-35200 ppm, so the problem of soil contamination with phosphorus from phosphogypsum is quite common.

The content of phosphorus in the conditionally-background area is close to the regional background (the concentration factor is 1.2), and in the field area it is 4 times higher than the regional background. Phosphorus is not often included in studies of the ecological condition of adjacent landscapes, but, in the author's opinion, it is advisable to consider it when assessing the impact of phosphorus fertilizer production. Exceeding the regional background by several times may indicate the presence of impact.

*Changes in radionuclide specific activity*

In the literature there are data that the impact of phosphorus industry production leads to increase of activity of natural radionuclides. The carried out research has shown that at the Kingisepp phosphate deposit no increase of activity of natural radionuclides is observed, even on the contrary - activity of some radionuclides is less than in the conditionally-background territory.

The influence of phosphate fertilizers production on the territory of Kingisepp phosphate deposit in comparison with the conventional background area leads to decrease of the activity of radionuclide  $^{137}\text{Cs}$  by 75 % and  $^{40}\text{K}$  by 50 %. The specific radioactivity of radionuclides  $^{40}\text{K}$ ,  $^{232}\text{Th}$ ,  $^{226}\text{Ra}$  and  $^{137}\text{Cs}$  was determined for 3 combined samples: the first combined soil sample is the assembled and mixed set of several point samples from the tops and slopes of phosphogypsum dump; the second is the sample from the surface of recultivated overburden rock dumps; the third is the sample from the conventional background territories, situated at 5-9 km from phosphogypsum dump. Differences were found by comparing the results of laboratory analyses with each other.

There is no definite standard of activity of radionuclides in soil in the documents. The nearest analogue we can use is the permissible specific effective radioactivity of building materials (such as sand and crushed stone) used in residential construction. It is 370 Bq/kg. All samples have a value of specific effective activity less than this value (the highest - 124 Bq/kg - at the phosphogypsum dump). In other words, we cannot speak about either phosphogypsum dump or soils located in the zone of its influence in terms of radioactive impact. Moreover, it is worth noting that in the area under consideration the situation is on the contrary - the activity of certain radionuclides in the territory of the deposit is 50-75% lower than in the conditionally-background territory. Activity of  $^{40}\text{K}$  is 320 Bq/kg in the deposit, and 587 Bq/kg in the reference-background area; activity of  $^{137}\text{Cs}$  is 22 Bq/kg in the deposit and 88 Bq/kg in the reference-background area. The higher activity of radionuclides in the conditional-background area may be due to the composition of rocks. The study (Dueñas et al., 2007) confirms that the activity of  $^{40}\text{K}$  in phosphogypsum is low (30-50 Bq/kg). At the same time the activity is highest (170-360 Bq/kg) in the reclaimed waste dumps. This can be explained by addition of soil mass during recultivation (Nedbaev, Elsukova, 2021), which contains higher values of  $^{40}\text{K}$  activity. However, the variation of  $^{40}\text{K}$  activity in phosphogypsum is significant: from 4 to 330 Bq/kg.

*Dependence of chemical element content on the granulometric composition of soils*

Table 10 shows the average content of chemical elements in soils of different granulometric composition in the studied area.

Table 10. Average concentrations of chemical elements in soils of different granulometric composition in the studied area (ppm).

Indicator	Light granulometric composition	Heavy granulometric composition
Ba	433	542
Ca	19249	10668
Co	5	6
Cr	39	30
Cu	15	12
F	1346	543
Fe	24633	22523
Mn	500	593
Ni	24	14
P	6700	3335
Pb	18	23
S	2310	986
Sb	0,5	0,3
Sc	6	7
Sr	412	143
V	53	49
Zn	43	51

The table shows that the most significant differences are in the content of the following chemical elements: nickel (mobile forms), strontium and fluorine. Since soils of heavy granulometric composition (from light loam to clay) prevail in the conditional-background area and light granulometric composition (from sand to sandy loam) in the deposit, the differences found in mobile forms of nickel and gross strontium and fluorine content may have a natural - dependence on granulometric composition rather than anthropogenic explanation.

*Dependence of chemical element content on soil type*

The soil type characterizes a specific set of soil-forming processes that can affect the physico-chemical characteristics of the soil and, consequently, the accumulation of certain chemical elements. Table 11 shows the average content of chemical elements and acidity in different soils in the studied area (alphegumus, texture-differentiated, gleyey, lithozem, agrozem, peat and quasi-zem).

Table 11. Average contents in different soils in the studied area.

Soil Division	Alphegumus	Texture-differentiated	Gleyey	Lithozem	Agrozem	Peat	Quasi-zem
Ba, ppm	174,40	620,00	517,22	<b>654,33</b>	337,00	197,00	503,29
Cd, ppm	0,27	0,17	0,26	0,24	0,08	<b>0,31</b>	0,19
Co, ppm	3,77	4,92	5,20	4,71	0,71	2,60	<b>6,27</b>
Cr, ppm	19,77	27,70	<b>34,97</b>	24,13	6,04	14,20	29,66
Cu, ppm	6,22	12,00	<b>14,31</b>	9,84	1,29	14,20	13,12
F, ppm	620,00	175,00	190,00	163,33	150,00	220,00	<b>946,29</b>
Fe, ppm	8500	16250	19111	15833	4500	7900	<b>24100</b>

Soil Division	Alphegumus	Texture-differentiated	Gleyey	Lithozem	Agrozem	Peat	Quasi-zem
Mn, ppm	167,25	201,75	221,67	269,50	117,00	85,50	<b>692,44</b>
Ni, ppm	7,42	11,60	13,81	9,46	1,53	9,10	<b>16,25</b>
P, ppm	3490,00	1110,00	977,78	813,33	980,00	1160,00	<b>5269,14</b>
Pb, ppm	<b>29,00</b>	23,00	28,67	28,00	15,00	28,00	19,00
S, ppm	309,50	<b>8462,50</b>	163,79	56,25	27,00	319,33	1705,84
Sb, ppm	0,31	0,28	0,35	0,22	0,10	<b>0,41</b>	0,37
Sc, ppm	3,03	6,82	<b>7,41</b>	7,39	2,52	4,28	6,22
Sr, ppm	97,00	118,50	92,11	106,00	65,00	47,00	<b>806,00</b>
V, ppm	43,19	38,40	48,61	33,47	8,60	23,90	<b>49,15</b>
Zn, ppm	19,60	<b>58,10</b>	44,67	46,70	8,24	13,20	48,95
pH active	5,58	5,93	5,54	6,10	<b>7,64</b>	<b>4,34</b>	7,02
pH exchange	4,94	5,00	4,64	5,30	6,36	<b>3,59</b>	<b>6,48</b>

The table shows that practically all studied elements have a strong variability depending on soil type. It is worth noting that quasi-zemesic soils cover a significant area of the deposit and the maximum concentrations of cobalt, fluorine, iron, manganese, nickel, phosphorus and strontium are observed in quasi-zemesic soils, which agrees with the previously revealed assumption about the influence of phosphate fertilizer production on the fluorine, iron, manganese, phosphorus and strontium content. Peat soils have the highest acidity and also accumulate the most antimony. Most of all barium is in lithozem soils. In texturally differentiated soils (meadow soils) most sulphur is accumulated (several times more than in other soils). In gleyey soils accumulation of chromium, copper and scandium is observed. The maximum content of lead is in alphegumus soils.

#### *Correlation analysis*

Figure 34 shows the correlation scheme between the gross content of heavy metals, fluorine, phosphorus and pH. The analysis of the correlation diagram between the content of various chemical elements and pH indicator allows us to distinguish several groups of indicators, which are consistent with the conclusions obtained earlier. Firstly, the group of anthropogenic elements (Sr, F, P), which come to soils from the production of phosphorus fertilizers, was singled out. This group is connected through strontium with nickel and copper, which also tend to accumulate in the soils of the deposit, but not as strongly as strontium, fluorine and phosphorus. A statistically significant difference in concentrations of these elements has been shown to exist between the deposit area and the background area, with maximum (sometimes "storm") concentrations of these elements occurring in the phosphogypsum dump area.

Secondly, a group of chemical elements was identified, apparently representing the association of elements contained in the rocks of the territory: Ba, Co, Cr, Fe, Mn, V, Zn, as zinc, cobalt, iron and manganese are included in the list of elements for which, according to the

geological map, the geochemical anomaly in the area of Kingisepp town is characteristic. The pH value correlates with manganese, confirming the possible association of metal impurities in the carbonate rocks. Also worth noting is the classic taiga zonal Co-Fe-Mn association.

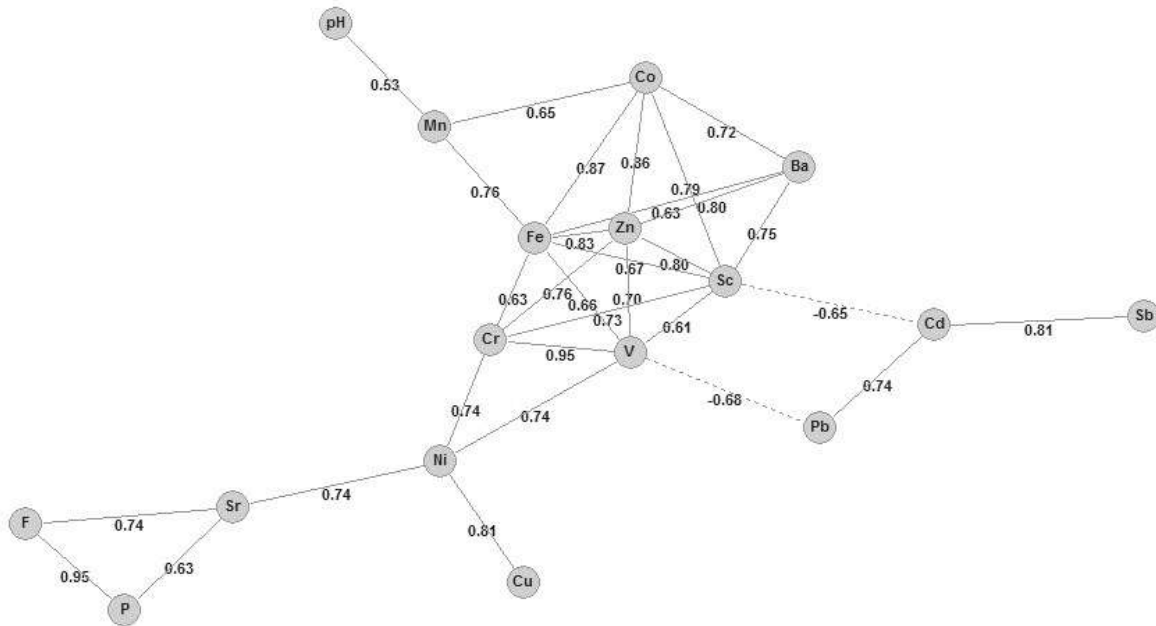


Figure 34. Schematic of correlation relationships of chemical element content in the study area.

Thirdly, an association of three elements was separated from all other elements: Cd, Pb, Sb. As mentioned above, cadmium and lead can accumulate in soils due to the impact of phosphate fertilizer production, but in this case the source of these elements seems to be other anthropogenic activities.

#### *Factor analysis*

Factor analysis of 17 variables (actual and potential acidity, gross content of Ba, Cd, Cu, F, Fe, Mn, Ni, P, Pb, S, Sb, Sc, Sr, V, Zn) on 51 sample areas was conducted. It turned out that 85% of the variance is determined by 4 factors (Table 12).

Table 12. Variance and cumulative variance values by factor.

Factor	Dispersion, %	Cumulative value, %
<b>1</b>	<b>43,82968</b>	<b>43,82968</b>
<b>2</b>	<b>20,22439</b>	<b>64,05407</b>
<b>3</b>	<b>13,7168</b>	<b>77,77087</b>
<b>4</b>	<b>7,630393</b>	<b>85,40126</b>
5	5,69011	91,09137
6	3,803436	94,89481
7	1,914821	96,80963
8	1,516565	98,32619

Factor	Dispersion, %	Cumulative value, %
9	0,723476	99,04967
10	0,436045	99,48571
11	0,207314	99,69303
12	0,184265	99,87729
13	0,10048	99,97777
14	0,021655	100

Table 13 shows a matrix of factors.

Table 13. Factor matrix.

Indicator	Factor			
	1	2	3	4
Ba	0,59	-0,65	-0,03	0,31
Co	0,82	-0,44	-0,11	0,00
Cr	0,80	-0,09	0,47	-0,26
Cu	0,33	0,31	0,73	0,03
F	0,54	0,74	-0,29	0,18
Fe	0,88	-0,25	-0,12	0,06
Mn	0,63	-0,16	-0,52	0,31
Ni	0,71	0,41	0,53	-0,02
P	0,58	0,65	-0,31	0,15
Pb	-0,67	-0,29	0,08	0,20
pH active	0,69	0,08	-0,55	-0,22
pH exchange	0,70	0,21	-0,48	-0,15
S	0,15	-0,09	0,26	0,82
Sc	0,63	-0,68	0,21	-0,23
Sr	0,31	0,85	0,26	0,17
V	0,87	0,08	0,27	-0,26
Zn	0,84	-0,39	0,21	0,22

Highlighted 4 factors that determine the distribution of 85% of the sample:

- 44 %  $\frac{\text{Fe}_{88}\text{V}_{87}\text{Zn}_{84}\text{Co}_{82}\text{Cr}_{80}\text{Ni}_{71}\text{pHact}_{70}\text{pHchan}_{69}\text{Mn}_{63}\text{Sc}_{63}\text{Ba}_{59}\text{P}_{58}\text{F}_{54}}{\text{Pb}_{67}}$
- 20 %  $\frac{\text{Sr}_{85}\text{F}_{74}\text{P}_{65}}{\text{Sc}_{68}\text{Ba}_{65}}$
- 14 %  $\frac{\text{pHact}_{53}\text{Mn}_{52}}{\text{Cu}_{73}\text{Ni}_{53}}$
- 7 %  $\text{S}_{82}$



Significant positive loadings on the first factor (dispersion 44 %) have 13 indicators (actual and potential acidity, gross content of Ba, Cd, F, Fe, Mn, Ni, P, Sb, Sc, V, Zn) out of 17 taken for analysis, negative loadings have lead, and copper, strontium and sulfur have no significant loadings. This is a factor of influence of chemical composition of bedrock on soils.

One fifth of the total dispersion (20 %) is occupied by the second factor which, taking into account all previous findings, can be called the influence of phosphorus fertilizer production on soils, as the content of the three key elements highlighted in this study - strontium, fluorine and phosphorus - increases under the influence of this factor. Barium and scandium have an inverse correlation to this factor. The negative correlation of the anthropogenic factor with scandium is probably related to the fact that a significant part of the deposit is on carbonate rocks and sandstones, and the scandium content in limestones and sandstones is low (Kabata-Pendias et al., 1989).

The weight of the third factor is 14 %, and it is possible that this factor is influenced by the chemical composition of not all rocks, but limestones and dolomites which make up the overburden dumps, because it is the dumps which have the highest pH and the highest manganese concentrations. Moreover, the association of high pH and high manganese content is also typical of other regions where deposits are mined under carbonate rocks.

The fourth factor is represented only by sulphur (other indicators are insignificant) and occupies 7 % of dispersion. Probably, it is a manifestation of aerogenic inflow of phosphogypsum particles to adjacent territories, because, on the one hand, sulphur is a part of phosphogypsum (calcium sulphide), but on the other hand, the whole studied area adjacent to production is rich in sulphur. And, as noted in similar works, the radius of influence of sulphur on soils in phosphate fertilizer production can be more than 9 km, taken for maximum removal and placement of sample contingent background areas there.

#### **Conclusions to the chapter 4**

The soil cover of the Kingisepp phosphate deposit has been significantly altered by human activity. Natural soil types have been replaced by anthropogenic surface formations. The movement of lithogenic material and placement of large tonnage waste has resulted in changes to the relief and the formation of height differences of up to several tens of meters. The overburden dumps are subject to reclamation with soil application followed by a biological phase culminating in the planting of forest crops.

Three processes have been identified as altering the natural geochemical setting of the site: the release of pollutants from phosphoric acid and phosphate fertilizer production, the

aerogenic transport of phosphogypsum particles into adjacent landscapes and the influence of the chemical composition of the overburden underlying much of the deposit.

Emissions from the production of phosphoric acid and phosphate fertilizers result in an increase in the gross fluoride content of the deposit's soil cover. The content of fluoride increases by 3 times in comparison with the conditionally-background area.

From phosphogypsum dump, strontium and phosphorus are supplied to adjacent territories. Strontium content differs from notional background area by 1,6 times and phosphorus content - by 4 times towards increase.

Probably, overburden rocks, which play the role of bedrock on the territory of the mine, lead (as compared with the conventional background area) to the increase of pH index by 2 units, increase of total content of iron (by 40%) and manganese (by 1,5 times) and decrease of total content of lead (by 30%) and labile forms of iron (by 5 times).

One of the most significant indicators of phosphate fertilizer production in the study area is the coefficient of concentration of chemical elements, calculated on the basis of the regional background of the Barents region for the soils of the southern taiga. For example, the coefficient of concentration of gross phosphorus on the territory of the deposit and on the conventional background differs by 6 times, the coefficient of concentration of strontium by 3 times.

The percentage of mobile forms increases with the increase of gross concentrations. Low-mobile (0-1 %) elements are absent, medium mobility (1-10 %) is characteristic for barium, lead, nickel and zinc, high mobility (10-20 %) - for manganese and copper, high mobility (more than 20 %) elements are absent. The issue of developing environmental standards and establishing background concentrations for different regions of the Russian Federation remains open.

Cobalt, fluorine, iron, manganese, phosphorus and strontium accumulate in quasi-soils more than in other soils, antimony in peat soils, barium in lithozems, sulfur in texture-differentiated soils, chromium, copper and scandium in gleyzems, and lead in alphemus soils.

The chemical composition of soils in the studied area is determined by four factors: rock factor (44 %), phosphate fertilizer production (20 %), the influence of overburden (14 %), sulfur intake from phosphogypsum disposal (7 %).

Protected statement. The impact of phosphate fertilizer production on soil and vegetation is expressed in mechanical disturbance of natural environment components, changes in topography, supply of pollutants by emissions to the atmosphere and aerogenic transport of phosphogypsum dump particles. Indicators of the impact are increase of gross strontium content by 1,5 times, fluorine content by 3 times and phosphorus content by 4 times in soils compared with the conditionally-background area.

Protected statement. The soils and substrats of the Kingisepp phosphate deposit are characterized by a neutral reaction of the environment, exceeding the MAC for sulphur, the zonal background for fluorine and phosphorus, the regional background of soils of the southern taiga of the Barents region for barium, cobalt, chromium, copper, iron, manganese, nickel, lead, antimony, strontium and vanadium. There are single exceedances of MPC in soil for manganese, copper, lead, nickel, chromium and zinc. The chemical composition of soils in the studied area is determined by four factors - rock factor (44 %), phosphate fertilizer production (20 %), impact of overburden rocks (14 %), sulfur intake from phosphogypsum dump (7 %).

## Chapter 5. Geocological assessment of the impact of phosphate fertilizer production on vegetation

This chapter contains two sections: the first is devoted to the analysis of the quantitative characteristics of the geobotanical descriptions in order to identify the differences between the field area and the reference-background area; the second section presents the results of the analysis of the geobotanical descriptions using correlation pleids. General description of the vegetation in the study area in terms of different types of anthropogenic and natural objects is given in subsection 2.5. A brief description of the vegetation is given in Table 14.

Table 14. Summary of vegetation characteristics of the study area.

	Type of natural or anthropogenic site	Features	The main dominant species
Conditional background area	Forest ecosystems	Mainly spruce and birch forests on the river terrace of the Luga River with an abundance of water-loving species in the herb and shrub layer.	<i>Alnus incana</i> (L.) Moench <i>Betula pubescens</i> Ehrh. <i>Calamagrostis</i> sp. <i>Equisetum sylvaticum</i> L. <i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim. <i>Oxalis acetosella</i> L. <i>Picea abies</i> (L.) H.Karst. <i>Vaccinium myrtillus</i> L.
	Wetland ecosystems	Both old oligotrophic bogs and transitional bogs can be found.	<i>Betula nana</i> L. <i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud. <i>Pinus sylvestris</i> L. <i>Salix</i> sp. <i>Sphagnum</i> sp.
	Meadow ecosystems	Predominantly farmland dedicated to cattle grazing.	<i>Aegopodium podagraria</i> L. <i>Calamagrostis</i> sp. <i>Dactylis glomerata</i> L. <i>Milium effusum</i> L. <i>Sonchus arvensis</i> L.
Field area	Phosphogypsum dump	The phytocenoses are formed partly by reclamation and partly by self-overgrowth.	<i>Artemisia vulgaris</i> L. <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop. <i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P.Beauv. <i>Populus tremula</i> L.
	Tailings storage area	Phytocenoses formed partly by reclamation, partly by self-overgrowth.	<i>Aegopodium podagraria</i> L. <i>Alnus incana</i> (L.) Moench <i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop. <i>Salix</i> sp. <i>Urtica dioica</i> L.
	Overburden dumps	Phytocenoses formed by reclamation and are still forming.	<i>Aegopodium podagraria</i> L. <i>Betula pubescens</i> Ehrh. <i>Calamagrostis</i> sp. <i>Picea abies</i> (L.) H.Karst. <i>Tussilago farfara</i> L.

### 5.1 Quantitative analysis of geobotanical descriptions

Production activities on the territory of the Kingisepp phosphate deposit lead to the replacement of natural landscapes by anthropogenic-natural ones, formed by reclamation on and near man-made objects (dumps). As a consequence, new post-technogenic ecosystems are

formed. Difference of quantitative characteristics of communities on overburden rock dumps and communities on conditionally-background territories is caused by their different genesis. There are statistically significant differences, in particular, the age of European spruce *Picea abies* (L.) H.Karst, the abundance according to Drude of reedgrass *Calamagrostis* sp., the sub-order of *Veronica chamaedrys* L. and wood horsetail *Equisetum sylvaticum* L. (Table 15). All other quantitative characteristics of the geobotanical descriptions are not statistically significantly different, or do not meet the limitations of using the criteria for finding differences (e.g., too small a sample). Differences were searched using the Mann-Whitney U-criterion.

Table 15. Statistically significant differences in the quantitative indicators of the geobotanical descriptions when comparing the conditional-background and the production area.

Indicator	The numerator is the median in the conditional-background area; Denominator - 25th and 75th quartiles	The numerator is the median in the field; Denominator - 25th and 75th quartiles	Number of descriptions in the conditionally-background area with the indicator in question, pcs.	Number of descriptions in the field with the indicator in question, pcs.
Age of European spruce <i>Picea abies</i> , years	$\frac{60}{30 - 80}$	$\frac{40}{30 - 40}$	9	13
Representation in aspen undergrowth <i>Populus tremula</i> , proportion from 10	$\frac{5}{2 - 5}$	$\frac{2}{1 - 3}$	7	12
Abundance along the Drooda River of reedgrass <i>Calamagrostis</i> sp.	$\frac{\text{cop } 2}{\text{cop } 1 - \text{cop } 2}$	$\frac{\text{cop } 1}{\text{sp} - \text{cop } 1}$	9	22
<i>Veronica chamaedrys</i> sublayer	$\frac{2}{2 - 2}$	$\frac{1}{1 - 1}$	4	6
Sub-annual wood horsetail <i>Equisetum sylvaticum</i>	$\frac{2}{2 - 2}$	$\frac{3}{3 - 3}$	5	4

*Differences in age of European spruce Picea abies*

The age of European spruce *Picea abies* in the stand is statistically significantly different. In the core area, the median age is 60 years (25th quartile - 30 years, 75th quartile - 80 years), and 40 years (25th quartile - 30 years, 75th quartile - 40 years). This is due to the fact that the vegetation cover was formed artificially on the waste dumps by reclamation. The first reclamation works were carried out in the 1980s (Kushnir, et al., 2021). In the conditional-background area, spruce as part of the stand was found in 9 test plots, and in the field area - in 13 test plots. Formation of young ecosystems on waste dumps does not allow full comparison of PTC for search of indicators of chemical impact of phosphorus fertilizer production. However, reclamation in parallel with the formation of the dumps allows researchers to study different-age

ecosystems on the dumps, ranging from areas where only perennial grasses were sown to 40-year-old spruce plantations. The author identified five stages of community formation at the overburden site. The results of this study are summarised in the publication:

Forest recultivation of overburden dumps of the Kingisepp phosphorite field / I. S. Nedbaev, E. Yu. Elsukova, E. A. Kushnir, E. I. Treschevskaya // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, Voronezh, 09-10 September 2021. - Voronezh, 2021. - P. 12029. - DOI 10.1088/1755-1315/875/1/012029. - EDN NVITDD.

Let us describe the stages of vegetation cover formation at the overburden dumps of the Kingisepp phosphate deposit. One overburden rock dump was taken as a model object and five test plots in different-age post-reclamation ecosystems were laid on it (Figure 35).

The first sample plot, with the oldest spruce forests of about 40 years of age, is located on the top of the overburden dump. The tree layer is dominated by European spruce *Picea abies*, with occasional specimens of *Pinus sylvestris*, *Betula pubescens* and *Salix sp.* willow. The density of the tree layer in the area is the highest among the investigated ones at the disposal site and is 0.7. The height of firs is about 15 m, pines are 17 m, birches are 20 m high and willows are 8 m high. The diameter of European spruce on this plot is 25 cm, common pine 22 cm, birch 28 cm and willow 12 cm. Undergrowth on this trial area is not pronounced, almost absent. Projective coverage of the herbaceous-shrub layer is 40%, which is caused by the formation of a "dead" cover under old spruces. We would like to note the presence of *Chamaenerion angustifolium* narrow-leaved willow in the area, which is not found or almost not found in the areas with initial stages or with the absence of reclamation. Also found within the PTC is *Succisa pratensis* meadow knotweed, which is not found in all descriptions on this overburden. *Tussilago farfara*, a representative of the ruderal vegetation, is abundant. This fact indicates that despite reclamation, the TCN of spruce forests will not be close to zonal forests, and it is already a new formed anthropogenic-natural system. Moss-lichen layer: 90% green mosses.

The second sample plot, consisting of spruce stands of approximately 30 years of age, is located on the slope of the overburden. In general, in the whole area of this natural-anthropogenic complex the dominant role in the community, along with European spruce *Picea abies*, is shared by the downy birch *Betula pubescens*. There are also isolated specimens of *Pinus sylvestris* and *Salix sp.* willow. The aesthetic value of the area is 2. The density of the tree layer is insignificant and amounts to 0.2. The height of firs, birches and willows does not exceed 10 m, pines are about 7 m high. The diameter of spruces is insignificant, 7 cm on average, pines and birches approx. 10 cm in diameter and willows have the largest diameter of 15 cm. The undergrowth in this sampling area is pronounced and is represented mainly by European spruce. Aspen and downy birch are also found. Projective coverage of the herb-bush layer is 90%.

*Achillea millefolium*, *Calamagrostis* sp. and *Avenella flexuosa* are the dominant shrub-grasses.  
Moss-lichen layer: 60% green mosses.

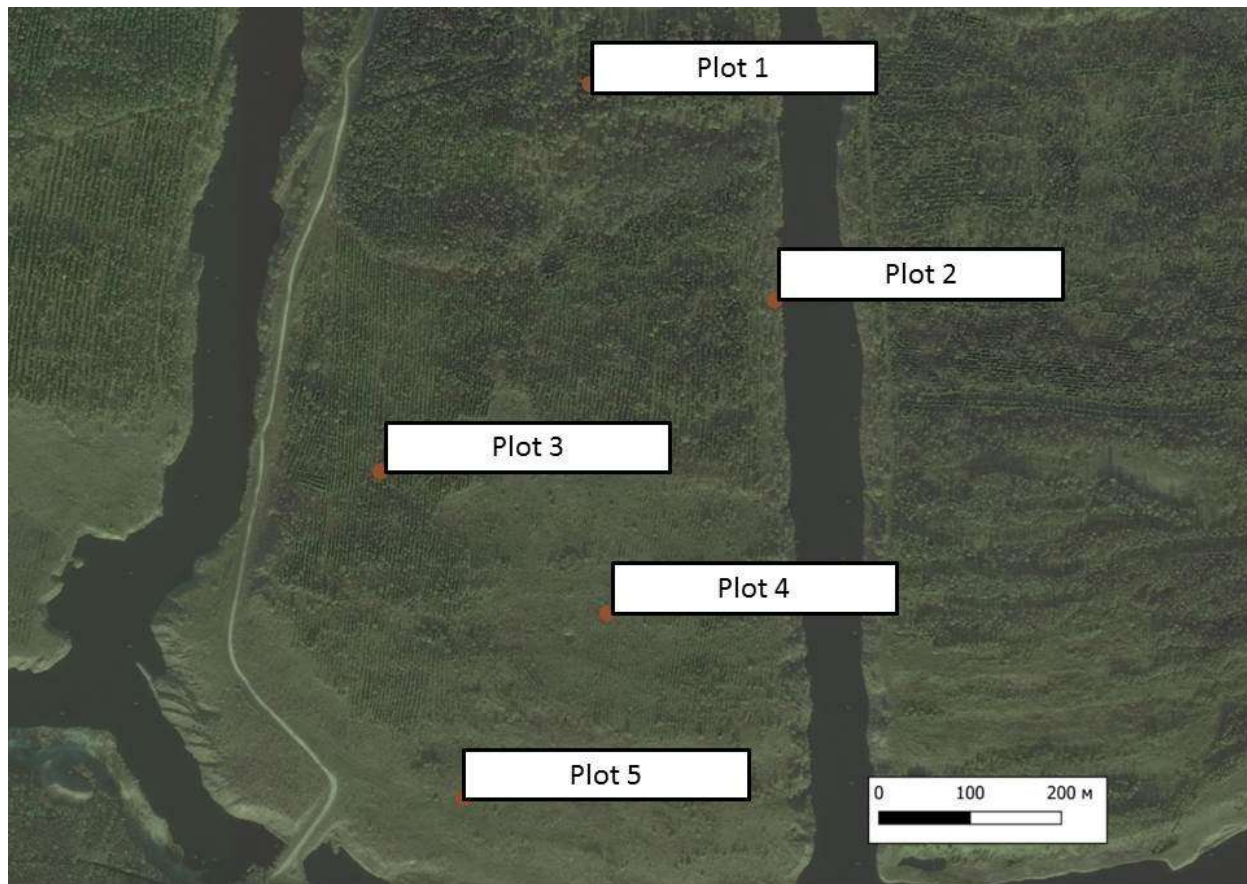


Figure 35. Location of different-aged sample plots at the overburden dump of the Kingisepp phosphate rock deposit.

The third sample plot (approx. 20 years old) is located at the top of the overburden dump. There are only isolated species of European spruce *Picea abies* in the stand. The tree layer is mainly represented by *Betula pubescens* birch. This area has an average value of aesthetic value of 3. Closure of the stand does not exceed 0.1. The largest specimens of spruces reach 7 m, but they are isolated. The birches can reach 10 m in height. The bulk of the reforestation is still at the undergrowth level (around 4 m). The diameter of European spruces is even larger than on the previous slope - about 8 cm. Diameter of birches was the same, 8 cm. Undergrowth on this area is pronounced and represented by stands of European spruce. Also found in the undergrowth are *Populus tremula* aspen, *Betula pubescens*, *Pinus sylvestris* and *Salix* sp. willow. Undergrowth density is higher than the density of the stand - 0.4. Projective cover of herbaceous-shrub layer is half of the area (50%). The area is also covered by the narrow-leaved willow-herb *Chamaenerion angustifolium*. In addition to willow-herb, there is also common yarrow *Achillea millefolium*, meadow grass *Lathyrus pratensis*, meadow clover *Trifolium pratense* in the grass-bush layer.  
Moss-lichen layer: 60% green mosses.

The fourth trial area is an area where reclamation was carried out about 10 years ago; it is the top of an overburden dump. There is no tree layer, only the undergrowth. The aesthetic value of the area is 3. The planting is a little bit bigger than a human height. The height of all tree species in the undergrowth is 2-4 m. Most of them are European spruce *Picea abies*, but also birch *Betula pubescens* and pine *Pinus sylvestris*. The young growth does not exceed 5 cm in diameter. At the same time, the plantings are dense enough and the density of the undergrowth is 0.4. Projective cover of the TCN is the same as at the previous site, 50 %. St. John's wort *Chamaenerion angustifolium* is absent in this area, with meadow grass *Succisa pratensis* (5 cm tall), meadow grass (in the third sublayer of the TCN, about 40 cm tall), and wood horsetail *Equisetum sylvaticum*. Moss coverage in this area is negligible, not more than 5%. It is worth noting that the abundance of *Druida* meadow-grass *Lathyrus pratensis* is cop 1, which means that meadow-grass is the dominant species in the TCN in this area. It is likely that during the reclamation works, chinna was sown into the overlaying soil as a strengthening perennial herb, contributing to the accumulation of nutrients (nitrogen in particular) in the soil.

The fifth trial area is located on top of the overburden and was not reforested, only sown with perennial grasses. Therefore, no European spruce is planted there. The aesthetic value of this meadow community is high - 4. The undergrowth includes isolated specimens of *Pinus sylvestris*, *Betula pubescens*, birch, and *Salix* sp. willow. The young growth does not exceed 3 m in height. Diameter does not exceed 5 cm. Willows play the dominant role in the community in the undergrowth (over 70% of all tree species). Due to the focal nature of distribution of the undergrowth its density is less than 0.1. Projective cover of the TCN is high, at around 80%. In the SCC occur: mouse pea *Vicia cracca* (in the 3rd sub-tier, height about 40 cm), common yarrow *Achillea millefolium* (in the 3rd sub-tier, height about 30 cm), meadow grass *Lathyrus pratensis* (in the 3rd sub-tier, height about 60 cm), stone grass *Bromus inermis*, porcupine bog *Milium effusum*, hairy oleaster *Luzula pilosa*. The moss-lichen layer is absent. The dominant species in the TCJA is again the meadow-grass, the abundance of which in *Druida* is cop 1.

As part of this study of the vegetation communities at the overburden dump of the Kingisepp phosphate rock deposit, we can identify four conditional stages of spruce community formation at the overburden dump by forestry reclamation. The first stage is soil application and seeding with perennial grasses to form a stable soil cover. The second stage is the planting of forest crops (in this case European spruce *Picea abies*). The end of the second stage is marked by the emergence of the tallest individuals into the tree layer (over 6 m). The third stage of community formation is the growth of all stands to stand level and the creation of a birch-spruce or spruce-birch forest, as at approximately 30 years of age, European spruce in the reclaimed



areas can occupy up to 50% of the stand. At the fourth stage, spruces displace birches from the community, remaining almost the only representative of the tree layer, starting to form the fifth stage, which is not yet represented in the studied area - dead spruce forests. In the Kingisepp area on overburden dumps, the spruces reach the fourth stage approximately by the age of 40 years. In terms of the use of disturbed areas (such as overburden dumps), forest reclamation is the best option.

*Abundance of reedgrass Calamagrostis sp*

*Calamagrostis sp.* is the most common species of the grass-bush layer in the study area. *Tussilago farfara*, *Aegopodium podagraria*, *Solidago virgaurea*, *Chamaenerion angustifolium*, *Trifolium pratense*, *Fragaria vesca*, *Achillea millefolium*, *Dryopteris carthusiana*, and *Picea abies* are also found in the stand (Table 16).

Table 16. Most common species of vegetation in the study area.

The name of the species in Latin	Number of descriptions in which the species occurs (a total of 46 geobotanical descriptions were made), pcs.
<i>Calamagrostis sp.</i>	31
<i>Tussilago farfara</i>	18
<i>Aegopodium podagraria</i>	17
<i>Solidago virgaurea</i>	16
<i>Chamaenerion angustifolium</i>	16
<i>Picea abies</i>	16
<i>Trifolium pratense</i>	15
<i>Fragaria vesca</i>	13
<i>Achillea millefolium</i>	13
<i>Dryopteris carthusiana</i>	12

*Calamagrostis sp.* reedgrass is found on 9 test plots and on 22 test plots on the field territory. At the same time, in 7 of 9 sample plots in the conditionally-background area, reedgrass is the dominant species and enters the name of the community. On the territory of the deposit, reedgrass is a dominant species and is included in the name of the community in 15 descriptions out of 22.

In the conditionally-background area, the median abundance according to Drude of *Calamagrostis sp.* is cop 2 (25th quartile - cop 1, 75th quartile - cop 2), and in the field area it is cop 1 (25th quartile - sp, 75th quartile - cop 1). It should be noted that on agricultural lands currently used for cattle grazing, belonging to the conditional-background area, the abundance of reedgrass reaches grade 3. The average height of reedgrass on the studied area is 30 cm, but on some sample plots, reedgrass with inflorescences reaching 60-70 cm is found.

To find both causes and consequences of the lower abundance of reedgrass in the area of the deposit, we will use the concept of environmental factors. In the middle of the XX century, phytocenology was actively developed in our country (Zalenskii et al., 1959), and one of the results of this activity is the fundamental work by L.G. Ramenskii et al. "Ecological evaluation of forage lands according to vegetation cover" (Ramensky, et al., 1956). This work showed the scientific idea of scaling the influence of ecological factors on different species and their characteristics. The change in the abundance of *Calamagrostis* sp. reedgrass, according to the ecological scales of L.G. Ramensky (Table 18), may indicate that the deposit area is richer in nutrient content because the production of fertilizers is located in the production area. This conclusion follows from the fact that the Drude cop 1 abundance is characteristic of mineral-rich soils, while an increase in Drude abundance values for reedgrass to cop 2 is already a characteristic of poor soils. In general, according to the Landolt ecological scales (another type of ecological scale), reedgrass *Calamagrostis* sp. is a semi-shady plant growing in soils with the following characteristics: medium dry to wet, slightly acidic to neutral, medium poor to medium rich in mineral nutrition, with a small humus horizon, on sandy, well-aerated soils.

Table 17. Ecological scales of L.G. Ramenskii for *Calamagrostis* sp.

Name of the plant and some information	Scale	Abundance by Drood			
		cop 2 and above	cop 1	sp	sol
<i>Calamagrostis</i> sp. A reedgrass, a cereal of low fodder value.	Humidification	Wet meadow	Wet meadow	From dry-meadow to raw-meadow	From dry-meadow to raw-meadow
	Soil richness and salinity	Poor	From the poor to the quite rich	From the poor to the rich	From particularly poor to mildly saline
	Grassland degradation		There is little or no impact of grazing	From a moderate impact of grazing to no impact at all	From the strong influence of grazing to no grazing
	Alluviality				High and medium moisture supply

There are statistically significant differences in the value of the sub-order of *Veronica chamaedrys* L. In the conventional-background area *Veronica chamaedrys* L. was found in 4 sample plots, and in the field area - in 6 sample plots. In the conditionally-background area, *Veronica chamaedrys* occurs only in the second tier, while in the deposit area it occurs mainly in the first sub-tier (only the 75th quartile and above belong to the second sub-tier). An interpretable and unambiguous reason for this circumstance could not be identified.

There are also statistically significant differences in the significance of the forest horsetail sub-order *Equisetum sylvaticum* L. In the conditional-background area it is ubiquitously found in the second tier (5 descriptions), and in the field - in the third (4 descriptions). There is no definite

reason for the difference found due to too large a spectrum of factors affecting plant growth. Average heights and sub-elevations of the main species of grass and shrub tier are shown in Table 18.

Table 18. Average heights and sub-elevations of some species of herbaceous-shrub layer in the study area.

Name of the plant	Height on the conditional-background area, cm	A sub-tier in a conditional-background area	Height in the field, cm	A sub-layer in the field
<i>Calamagrostis epigejos</i>	40	3	40	3
<i>Tussilago farfara</i>	no	no	20	2
<i>Aegopodium podagraria</i>	25	2	25	2
<i>Solidago virgaurea</i>	60	3	10	1
<i>Chamaenerion angustifolium</i>	no	no	60	3
<i>Trifolium pratense</i>	7	1	7	1
<i>Fragaria vesca</i>	10	1	10	1
<i>Achillea millefolium</i>	7	1	12	1
<i>Veronica chamaedrys</i>	25	2	12	1
<i>Equisetum sylvaticum</i>	20	2	30	3
<i>Deschampsia cespitosa</i>	no	no	40	3
<i>Artemisia vulgaris</i>	40	3	30	3

## 5.2 Assessing the transformation of phytocenoses by the correlation pleiad method

Using the method of correlation pleids (Opekunova and Muratova, 2005), it was possible to divide the species occurring in the study area into 15 groups called pleids (Figure 36). The conjugacy coefficients are shown in the figure in decimal format above the linkage line. The generic (species) name (or ecological group name for the moss-lichen cover) is located in the nodes. The analysis results in 3 large groups (each comprising more than 15 species) and 12 small groups (2 to 6 species in each). Large groups include an agricultural meadow (abandoned arable land) in the conditional-background area, a forest community with excessive moisture in the conditional-background area and a community adjacent to the tailings pond in the industrial area. Small groups can include conditionally-background forest community, bog community, grass green-moss spruce community, grass-bush layer under excessive moisture, ruderal vegetation of technogenic objects, ruderal vegetation of overburden dumps, overburden bank

vegetation, species from grass-bush layer of reclaimed forests, grass-bush layer on waste dumps under small-leaved species, grass-bush layer on waste dumps under conifers and grass-bush layer on waste dumps in old reclamation areas (40-year-old spruce forest).

For an agricultural meadow (abandoned arable land), the key species are *Stellaria holostea* L., *Tanacetum vulgare* L., *Sonchus arvensis* L., *Geranium pratense* L., and *Ranunculus acris* L. For a forest community with excessive moisture in a conditional background area, the key species are *Menyanthes trifoliata* L., *Cicuta virosa* L., *Ranunculus repens* L., and *Empetrum nigrum* L. In humidified areas the following groups can be seen: *Oxalis acetosella* L., horsetail *Equisetum sylvaticum* L., and meadowsweet *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim. A group that appears in forest ecosystems under moderate moisture conditions is distinguished in the pleiads: horsetail *Equisetum arvense* L. and bramble *Rubus saxatilis* L. The key species for bog ecosystems are common pine *Pinus sylvestris* L. and sphagnum *Sphagnum* sp., the remaining bog species fall into the pleiad of alder or pine community with excessive moisture in the conditionally-background area.

Grass green-moss spruce forests (a zonal forest type for southern taiga) are common in the studied area, which probably led to their separation into a separate group consisting of European spruce *Picea abies* (L.) H.Karst. and Schreber's pleurozium *Pleurozium schreberi* (Willd. ex Brid.) Mitt. Moreover, the herbaceous green-moss spruce forest occurs both in the conditionally-background area and in the deposit area (already reclaimed). The next group of species, characteristic of birch forests, is also found throughout the study area (Nedbaev et al., 2020). In this category, the key species are birch downy *Betula pubescens* Ehrh., common goldenseal *Solidago virgaurea* L., marjoram *Melampyrum nemorosum* L. and *Cetraria islandica* (L.) Ach.

A pair of two species of wild strawberry *Fragaria vesca* L. and dandelion *Taraxacum officinale* (L.) Webb ex F.H.Wigg. The overburden dumps are characterized by a group of ruderal species, the key ones being the narrow-leaved willow-herb *Chamaenerion angustifolium* (L.) Scop., mother-oil *Tussilago farfara* L. and meadow sheep *Succisa pratensis* Moench. The overburden dumps are located next to the quarries where the overburden was actually mined. At present, the pits are filled with water. And on the border of the overburden dumps and the water level of the quarry, a coastal strip is formed with a community characterized by hawkbill *Hieracium* sp. and creeping clover *Trifolium repens* L. It has already been mentioned that a significant part of the overburden dumps area has been reclaimed and forest cultures have been planted there. Typical beneath the recultivated forests are field clover *Trifolium campestre* Schreb., meadow grass *Lathyrus pratensis* L., common daisy *Leucanthemum vulgare* Lam. and common holly *Luzula pilosa* (L.) Willd. which remained under the forest canopy after the area

was initially seeded with perennial grasses. Under small-leaved species in the dumps, we find mainly common yarrow *Achillea millefolium* L. and mouse pea *Vicia cracca* L. Under conifers, there is a typical group of three plants: European sycamore *Lycopus europaeus* L., *Juncus effusus* L. and *Angelica sylvestris* L. Under the oldest spruce stands (approx. 40-year-old stands) in the herb and shrub layer are *Lactuca muralis* (L.) Gaertn., *Veronica chamaedrys* L. and *Hepatica nobilis* Mill.

A separate large group of species occurs in areas adjacent to the tailings management facility: common mountain ash *Sorbus aucuparia* L., yellow cornflower *Thalictrum flavum* L., chamomile *Matricaria chamomilla* L., fragrant spikelet *Alopecurus pratensis* L., common succession *Bidens tripartita* L., white hemp *Chenopodium album* L. and river gravel-grass *Geum rivale* L.

The analysis on the basis of the moulds has shown that the greatest difference from the baseline areas in terms of vegetation cover is observed in the areas adjacent to the tailings management facility (on the tailings management facility itself, vegetation at the tailings management facility edge, depressions in front of the tailings management facility as well as meadow communities within 200 m of the tailings management facility). Only in these communities *Thalictrum flavum*, *Matricaria chamomilla*, *Alopecurus pratensis*, *Bidens tripartita* and *Chenopodium album* can be found. Note that the diversity of soils, moisture regime and degree of anthropogenic transformation leads to a heterogeneity of species found near tailings sites.

Communities on waste dumps differ not so clearly from conditionally-background territories. Analysis of the pleiades has allowed to distinguish small groups of 2-7 species, which are typical for different conditions - in general, for all technogenic objects, specifically for overburden dumps, and for certain species (small-leaved or coniferous), up to the group occurring in 40-year old reclaimed spruce forests.

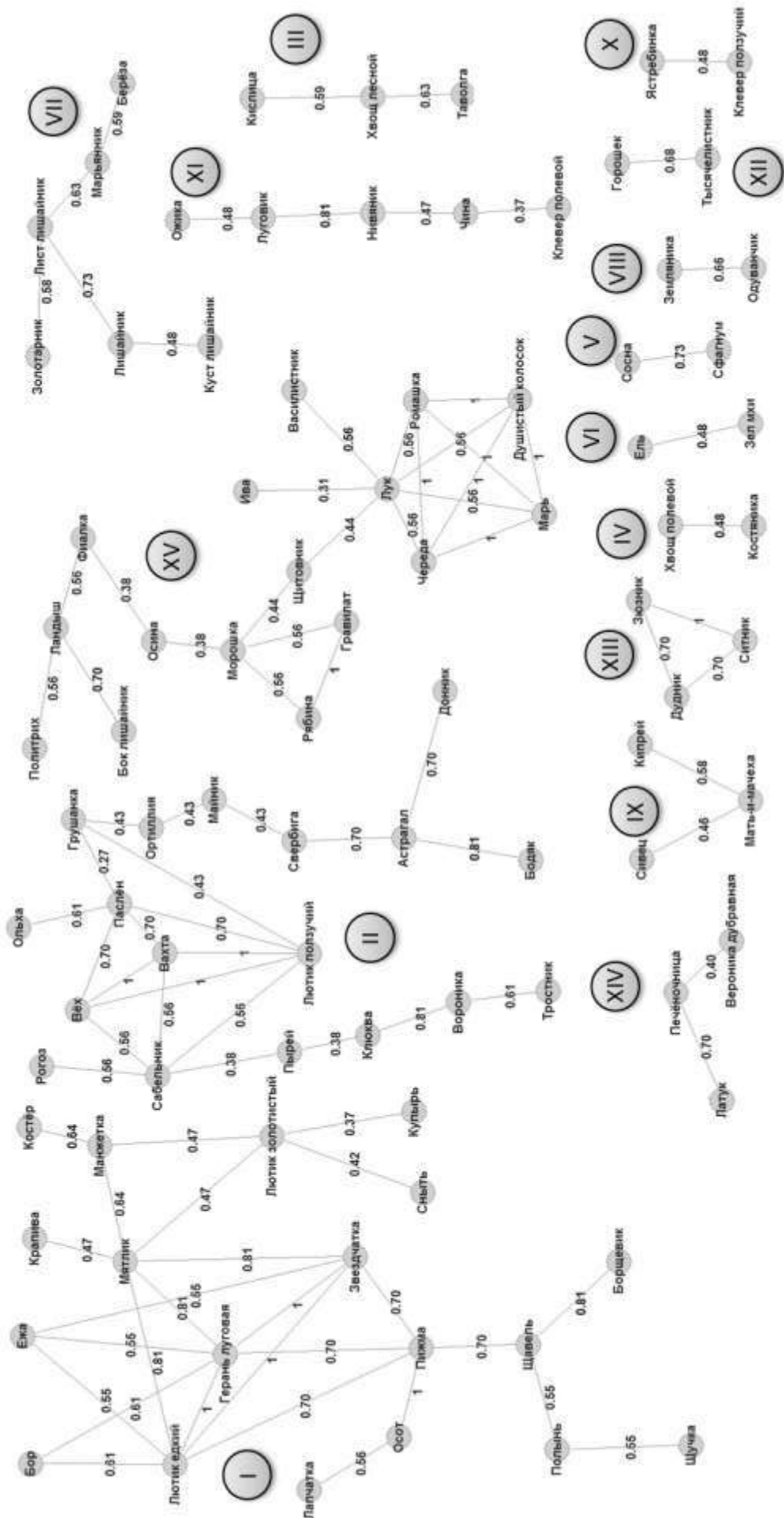


Figure 36. Identified tribes of ecosystems in the study area. The characteristics of the identified groups are contained in Table 20.

Table 20. Characteristics of the identified vegetation groups in the study area.

№	Latin name	Russian name	Ecological characteristics and habitat of the species
I. Agricultural meadow (abandoned arable land) on a conditional background area			
2	<i>Stellaria holostea</i> L.	Звездчатка лесная	Widespread in broad-leaved and mixed forests.
3	<i>Tanacetum vulgare</i> L.	Пижма обыкновенная	It grows on roads, fields, meadows, in shrubberies, on edges, in meadow steppes, birch forests, in dry meadows, in the mountains and in valleys. It does not form large thickets but is found everywhere.
46	<i>Dactylis glomerata</i> L.	Ежа сборная	Belongs among the best forage grasses.
51	<i>Deschampsia cespitosa</i> (L.) P.Beauv.	Щучка дернистая	Widespread throughout the northern hemisphere. Wet and marshy meadows, banks of marshes, water bodies, thin forests, glades, roadsides in tundra, forest, forest-steppe and steppe zones.
57	<i>Artemisia vulgaris</i> L.	Полынь обыкновенная	It grows in abandoned fields, pastures and heaths, along roads and along the banks of bodies of water. A ruderal plant.
58	<i>Milium effusum</i> L.	Бор развесистый	Occurs in the moist coniferous and deciduous forests of the northern hemisphere.
59	<i>Bromus inermis</i> Leyss.	Костёр безостый	A good plant for grazing.
62	<i>Urtica dioica</i> L.	Крапива двудомная	Prevalent in the forest and forest-steppe zones. A ruderal plant.
64	<i>Anthriscus sylvestris</i> (L.) Hoffm.	Купырь лесной	Mostly grows in soils that are not sodded or weakly sodded, where the nitrification process is intense. Good shade tolerance, but can also grow in open areas.
65	<i>Aegopodium podagraria</i> L.	Сныть обыкновенная	Grows on rich soils in deciduous and mixed forests, in clearings, among shrubs, often as a weed in gardens and parks. It is a shade-tolerant plant.
68	<i>Potentilla anserina</i> L.	Лапчатка гусиная	Most commonly found on sandy or stony, clay soils, roadsides, meadows and wastelands, ravines and ditches, where it can multiply rapidly by abundantly rooting stolons.
70	<i>Heracleum sosnowskyi</i> Manden.	Борщевик Сосновского	The natural habitat of Sosnovy hogweed is the Central and Eastern Caucasus, Transcaucasia and the Middle East, where it grows in mountain forests and sub-alpine meadows. Due to the cultivation of Sosnovy hogweed as a silage crop, it has spread in Eastern and Northern Europe, gradually moving into the wild, sowing on the banks of water bodies, wasteland, road right-of-way, uncultivated areas of fields, forest glades and edges, mountain slopes and river valleys.
71	<i>Sonchus arvensis</i> L.	Осот полевой	A troublesome weed, one of the most troublesome field weeds. The species infests all types of crops and is also found in fallows, orchards and vegetable gardens.
72	<i>Poa pratensis</i> L.	Мятлик луговой	Prefers loose, moderately moist, fertile soils. It responds positively to liming and the application of mineral fertilizers (especially nitrogen fertilizers). Grows in slightly acidic soils, does not tolerate salinization
73	<i>Geranium pratense</i> L.	Герань луговая	Grows in moderately humid dry and steppe meadows, damp forest glades, forest edges, deciduous and coniferous forests, among shrubs and near fences.
76	<i>Alchemilla vulgaris</i> L.	Манжетка обыкновенная	Grows in forests, meadows, forest edges, road edges, arable land, sparse pine and mixed forests.
80	<i>Rumex confertus</i> Willd.	Щавель конский	It grows in the forest and forest-steppe zones and enters the steppe zone along river valleys. It predominantly settles on moderately moist and wet soils.
81	<i>Ranunculus acris</i> L.	Лютик едкий	Prefers moist soils. Tolerates moderate flooding and slight siltation.
82	<i>Ranunculus auricomus</i> L.	Лютик золотистый	It grows in dry, lowland and floodplain meadows as well as in thin deciduous forests.
II. A forest community with excessive moisture in a conditional-background area			
6	<i>Typha latifolia</i> L.	Рогоз широколистный	It grows along the banks of bogs and reservoirs, forming extensive but self-eroding thickets, in ditches, quarries and along roadsides.
11	<i>Melilotus altissimus</i> Thuill.	Донник рослый	In damp meadows, on the banks of bodies of water, at river sediments (alluvium), on forest edges, saline areas, pastures, road embankments and ditches and in fallow lands.

№	Latin name	Russian name	Ecological characteristics and habitat of the species
13	<i>Menyanthes trifoliata</i> L.	Вахта трёхлистная	It is found on peaty and mineral soils, in sphagnum bogs, on the banks of standing and slow-flowing bodies of water, on the swampy edges of overgrown lakes and oxbow lakes. It may be a component of the herb-shrub layer of bogs, damp forests and meadows.
14	<i>Orthilia secunda</i> (L.) House	Ортилия однобокая	Grows in coniferous, mixed and small-leaved forests, clearings, glades and forest ravines. Mycotroph.
15	<i>Vaccinium oxycoccos</i> L.	Клюква обыкновенная	In nature, all types of cranberry grow in damp places: in transition and raised bogs, in sphagnum coniferous forests, sometimes on the swampy shores of lakes.
19	<i>Solanum dulcamara</i> L.	Паслён сладко-горький	It grows in damp shrub thickets and in flood meadows, willow forests, on the banks of rivers and ponds, near lakes and bogs, damp rubbish places in all regions of central Russia. It is a shade-tolerant plant.
22	<i>Astragalus glycyphyllos</i> L.	Астрагал солодколистный	Prefers fresh, moist, slightly acidic, humus-rich loamy and sandy loam soils. Semi-forested, sun-loving plant. Grows in glades, forest edges, oak and pine forests, shrubs, meadows and river floodplains.
24	<i>Bunias erucago</i> L.	Свербига полевая	It grows in Europe, the Mediterranean and Asia.
26	<i>Cicuta virosa</i> L.	Вёх ядовитый	It grows in low marshy meadows, on the banks of rivers, streams and ponds and in ditches, wherever there is sufficient water.
27	<i>Comarum palustre</i> L.	Сабельник болотный	Grows in damp and swampy areas.
28	<i>Elytrigia repens</i> (L.) Desv. ex Nevski	Пырей ползучий	Occurs in flood meadows in a community with other grasses, as a weed on arable land. In floodplain meadows and fallow lands it sometimes dominates the grass stand.
38	<i>Alnus incana</i> (L.) Moench	Ольха серая	It grows on the plains in the forest and, less frequently, in the forest-steppe and forest-tundra zones. It forms so-called sierozolshatniki - shrub and small-forest thickets on waterlogged edges, bogs, riverbanks, forest clearings, fireplaces and abandoned arable fields.
61	<i>Phragmites australis</i> (Cav.) Trin. ex Steud.	Тростник обыкновенный	A water-loving plant. Widespread on soils with close groundwater. Reeds are common in bogs, overgrown lakes, floodplains and flood meadows.
67	<i>Pyrola rotundifolia</i> L.	Грушанка круглолистная	Произрастает в лесах.
83	<i>Ranunculus repens</i> L.	Люттик ползучий	It grows in forests.
92	<i>Maianthemum bifolium</i> (L.) F.W.Schmidt	Майник двулистный	Common in mixed forests, but prefers spruce forests with moderately moist soil.
97	<i>Cirsium heterophyllum</i> (L.) Hill	Бодяк разнолистный	It grows in damp meadows, forest clearings and glades, in ravines and among shrubs.
101	<i>Empetrum nigrum</i> L.	Водяника чёрная	Occurs in sphagnum bogs, stony areas, forests (light coniferous and tundra sparse forests), rubbly tundras and dunes.
III.			Grass-shrub layer under increased moisture
88	<i>Equisetum sylvaticum</i> L.	Хвощ лесной	It grows in forests, shrubbery, tundra, forest edges, pond banks and bogs.
84	<i>Filipendula ulmaria</i> (L.) Maxim.	Таволга вязолистная	It grows in damp lowland and post-forest meadows and lowland grassy bogs, on the edges of waterlogged forests, in floodplain and damp shady forests, on the banks of reservoirs and ditches.
85	<i>Oxalis acetosella</i> L.	Кислица обыкновенная	Growing successfully in dark coniferous, especially spruce forests in considerable shade, it is, along with mayberry and sedum, a characteristic representative of the plant communities of such forests; it usually disappears quickly when the forest is destroyed.
IV.			Forest species in moderate moisture
89	<i>Equisetum arvense</i> L.	Хвощ полевой	It grows in forests, dry, floodplain meadows, margins of bogs, gravels, sandy shoals, fields, pastures, riverbanks, streams and ditches; it often weeds.



№	Latin name	Russian name	Ecological characteristics and habitat of the species
93	<i>Rubus saxatilis</i> L.	Костяника	In Central Russia it is known in all regions, confined to humid forests, mainly coniferous forests.
V. The wetland ecosystem			
36	<i>Pinus sylvestris</i> L.	Сосна обыкновенная	It forms pure stands as well as grows together with spruce, birch, aspen and oak; it requires little attention to soil and ground conditions, often occupies unsuitable areas for other species: sands, bogs.
45	<i>Sphagnum</i> sp.	Сфагнум	It is found in damp areas and promotes rapid waterlogging as it is able to actively absorb and retain moisture.
VI. Grass spruce green forest			
33	<i>Picea abies</i> (L.) H.Karst.	Ель европейская	It grows on soils of various textures, from sands to heavy loams, but is quite demanding of soil fertility. It prefers to be moistened by running water and avoids waterlogged soils with stagnant moisture. It is drought-resistant and frost-resistant, but suffers from spring frosts.
39	<i>Pleurozium schreberi</i> (Willd. ex Brid.) Mitt.	Плеуразиум Шребера	A common moss in various types of forest, occasionally occurring in bogs.
VII. Birch forest (both background and overburden)			
34	<i>Betula pubescens</i> Ehrh.	Берёза пушистая	Occurs as an adjunct to various forest-forming species in coniferous and deciduous forests or forms forests. This birch, unlike the lodgepole birch, tolerates waterlogging and grows in damp forests, forest edges, fringes of bogs, bogs and lake shores.
41	<i>Cetraria islandica</i> (L.) Ach.	Цетрария исландская	<i>Cetraria Islandica</i> is a characteristic representative of the lichens of pine forests, heathlands, bogs, tundras and forest tundras. It grows directly on the soil or on the bark of old stumps. Prefers sandy, unshaded areas where it sometimes forms almost clear thickets. Only grows in clean air.
43	<i>Cladonia</i> sp.	Кладония	Occurs in the forest tundra and tundra, in sparse forests of the North, in peat bogs on soil, on stumps, less often on bare wood. Grows in places with moderate snow cover.
50	<i>Solidago virgaurea</i> L.	Золотарник обыкновенный	It grows in light forests, occurs on forest edges, glades, clearings, among shrubs, in meadows and roadside plantations. It mainly inhabits permeable sandy soils.
69	<i>Melampyrum nemorosum</i> L.	Марьянник дубравный	It grows in deciduous forests (sometimes in large masses), margins, glades, shrub thickets; in damp, marshy and peat meadows and on chalky slopes.
VIII. Ruderal vegetation of man-made sites			
48	<i>Fragaria vesca</i> L.	Земляника лесная	It grows on glades, in light forests, in clearings and among shrubs.
60	<i>Taraxacum officinale</i> (L.) Webb ex F.H.Wigg.	Одуванчик лекарственный	It grows in meadows, glades, roadsides, pastures and housing, often as a weed in fields, orchards, vegetable gardens and parks.
IX. Ruderal vegetation of overburden dumps			
47	<i>Chamaenerion angustifolium</i> (L.) Scop.	Иван-чай узколистный	It grows on soils of different textures, from sands to heavy loams. It tolerates varying moisture content in the soil, with the exception of very dry and wet soils. It reacts negatively to close groundwater and prolonged flooding by hollow water.
52	<i>Tussilago farfara</i> L.	Мать-и-мачеха	Usually found on turf-free areas, such as the banks of water bodies, slopes of ravines and landslides, and often in areas affected by human activity, such as fields, wasteland and landfill sites.
96	<i>Succisa pratensis</i> Moench	Сивец луговой	The meadow shrike is widely distributed in meadow-marsh cenoses in Eurasia. The plant is found in meadows, forest clearings, clearings, roadsides, light deciduous forests, always on moist soil; in steppe areas, on salt-affected areas.
X. Overburden rock dump bank			
30	<i>Hieracium</i> sp.	Ястребинка	The range is predominantly temperate zone of the northern hemisphere and mountainous areas of the tropics.

№	Latin name	Russian name	Ecological characteristics and habitat of the species
53	<i>Trifolium repens</i> L.	Клевер ползучий	Occurs in flood and dry meadows, grows along riverbanks, in light forests, on forest edges and in mountain meadows.
XI. Grass-bush layer of reclaimed forests			
18	<i>Avenella flexuosa</i> (L.) Drejer	Луговик извилистый	Coniferous, mostly pine forests, glades, clearings. Grows well after forest clearing or fallow. After the latter it grows especially luxuriantly due to the destruction of lichen and moss cover
55	<i>Trifolium campestre</i> Schreb.	Клевер полевой	Grows in fields and meadows, on slopes and river loads, on light sandy soils and sands.
63	<i>Lathyrus pratensis</i> L.	Чина луговая	Grows in sparse mixed and birch forests and their edges, among shrubs, steppe meadows and forest slopes.
79	<i>Leucanthemum vulgare</i> Lam.	Нивяник обыкновенный	In the temperate zone of Eurasia it is found in meadows, forest clearings, shrublands, fallow land, sometimes as a weed in fields and vegetable gardens.
100	<i>Luzula pilosa</i> (L.) Willd.	Ожика волосистая	It grows in shady forests.
XII. Grass-shrub layer on waste dumps under small-leaved species			
49	<i>Vicia cracca</i> L.	Мышиный горошек	A plant with wide biological plasticity. It grows in meadows, slopes, shrubs, forest edges and less frequently in light forests. As a weed it can be found in fields and along roadsides.
56	<i>Achillea millefolium</i> L.	Тысячелистник обыкновенный	Yarrow grows in forest, forest-steppe and steppe zones, in dry forest meadows, meadow steppes, among bushes, in thin forests, on margins, roads, along ravines, in waste grounds, waste grounds, dumps, in townships, along pond banks and at the edges of fields.
XIII. Grass-shrub layer on waste dumps under conifers			
9	<i>Lycopus europaeus</i> L.	Зюзник европейский	Often grows in reed and sedge thickets along river banks and in ditches, usually on temporarily flooded soils with a low acid and alkali content. Azotophilus.
31	<i>Juncus effusus</i> L.	Ситник развесистый	Occurs in damp meadows and marshy areas, along the banks of bodies of water.
86	<i>Angelica sylvestris</i> L.	Дудник лесной	It grows in damp meadows, among shrubs, in forests, on the banks of rivers and ponds.
XIV. Grass-bush layer on waste dumps under 40-year-old spruce forests			
32	<i>Lactuca muralis</i> (L.) Gaertn.	Латук стенной	Widely distributed in the forest zone of Europe.
77	<i>Veronica chamaedrys</i> L.	Вероника дубравная	It grows in light forests, edges, shrubs, forest clearings, orchards and fields and sub-alpine meadows.
102	<i>Hepatica nobilis</i> Mill.	Печёночница благородная	It grows in deciduous forests, shrubs and, less frequently, open grassland.
XV. Communities adjacent to the tailings management facility			
1	<i>Sorbus aucuparia</i> L.	Рябина обыкновенная	Grows in isolated specimens, without forming thickets, in the undergrowth or second tier of coniferous, mixed and sometimes deciduous forests, in forest clearings and glades, between shrubs.
4	<i>Thalictrum flavum</i> L.	Василистник жёлтый	It grows in damp meadows, riverbanks, bushes and forest edges.
5	<i>Trientalis europaea</i> L.	Седмичник европейский	Grows in forests, as far north as the tundra, mainly in spruce forests.
7	<i>Viola palustris</i> L.	Фиалка болотная	Main habitats of the species: wet and waterlogged meadows and forests, forest marshes, margins, banks of bodies of water.
10	<i>Matricaria chamomilla</i> L.	Ромашка аптечная	Because of its strong photophilic nature, chamomile cannot compete with fast-growing herbs and therefore grows only in unformed phytocenoses: in fallow land, wasteland, roadsides and roadsides, in populated areas, orchards, vineyards, grain crops, row crops and so on.
20	<i>Alopecurus pratensis</i> L.	Душистый колосок	Occurs in dry and floodplain meadows, along the banks of reservoirs, on glades and glades, and among shrubs.
23	<i>Bidens tripartita</i> L.	Черёда трёхраздельная	It grows on the wet banks of rivers, along reclamation canals, near ponds and lakes, in bogs and ditches, where it often forms thickets. Occurs sporadically in meadows, as a weed in kitchen gardens and

№	Latin name	Russian name	Ecological characteristics and habitat of the species
			fields.
25	<i>Chenopodium album</i> L.	Марь белая	In Russia and neighbouring countries it is a common weed in crops, vegetable gardens and rubbish areas.
29	<i>Geum rivale</i> L.	Гравилат речной	Grows in moist and damp, fertile, weakly acidic soils, in deciduous forests, along river banks and the edges of bogs, in meadows and in thickets of bushes.
35	<i>Salix sp.</i>	Ива	Grows in damp forests of various composition (less often coniferous, mostly on rich soils, clearings, glades, along roads, often near dwellings).
37	<i>Populus tremula</i> L.	Осина	Occurs on the border between forest and tundra; grows in forest and forest-steppe zones. It can be found along the banks of water bodies, in forests, along glades, occasionally on dry sands and clearings, in ravines, bogs and in the mountains; it rises up to the upper edge of the forest.
44	<i>Polytrichum commune</i> Hedw.	Кукушкин лён обыкновенный	Grows in damp, waterlogged taiga forests, wet meadows and bogs.
94	<i>Rubus chamaemorus</i> L.	Морошка	Occurs in peat bogs, swamp forests, moss and bush tundras in the Arctic and northern forest belt of the northern hemisphere, in the middle belt of European Russia, in Belorussia, Siberia and the Far East.
98	<i>Convallaria majalis</i> L.	Ландыш майский	Lily of the valley grows in deciduous and pine forests as well as in mixed forests, glades and glades. It grows particularly well in floodplain oak groves, on rich soil with good moisture and neutral reaction.
103	<i>Dryopteris carthusiana</i> (Vill.) H.P.Fuchs	Щитовник игольчатый	A shade-tolerant or even shade-loving plant. It grows on damp stony screes and placers in the subalpine belt, in shrub thickets, in a variety of forests, mostly dark coniferous, on edges and glades, often near spruce trunks, between root paws and decaying stumps, and can survive in clearings.

The results show that the main reasons influencing the species composition of phytocenoses are moisture regime, soil cover and underlying rocks, genesis and the presence of anthropogenic impact on the area. For conditional background territories the abundance of moisture-loving species is characteristic, which is proved by the presence in the dominant species of meadowsweet *Filipendula ulmaria* (L.) Maxim. and different species of horsetails, etc. Zonal forest ecosystems are spruce sagebrush green-moss spruce, grass green-moss spruce and birch or alder forest with moisture-loving species in the grass-bush layer. In addition to zonal plant species, ruderal species such as *Taraxacum officinale*, *Chamaenerion angustifolium* and *Tussilago farfara* are included in the community within the field.

### Conclusions to chapter 5

The method of geobotanical descriptions was used to study 46 sample plots, including both the conventional background area and the deposit area. The main cause of vegetation change in the study area is anthropogenic activity associated with phosphorite mining, the formation of waste dumps and the reclamation of man-made objects.

On the overburden dumps of the Kingisepp phosphate rock deposit five stages of community formation following reclamation have been identified: from sowing perennial grasses

to dead fir forests, since *Picea abies* has been and is the main tree species undergoing reclamation.

Undergrowth of small-leaved species actively develops during the first 20-30 years of reclamation, then it is displaced from undergrowth of European spruce *Picea abies* (provided that reclamation was carried out by spruce). At the same time, in conditionally-background areas, both birch downy *Betula pubescens* and grey alder *Alnus incana* occur in natural forests with excessive moisture.

The most common species of grass and shrub layer is reedgrass *Calamagrostis* sp. There is a statistically significant decrease in the abundance of reedgrass in the field area, which may indicate that soils and technogenic surface formations of the field are rich in nutrients (in particular, nitrogen and phosphorus compounds), as reedgrass prefers soil with poor mineral nutrition.

The method of correlation pleids was used in this work, which identified 15 vegetation groups based on the occurrence of vegetation species in the geobotanical descriptions: of these 3 large groups comprising more than 15 species and 12 small groups comprising from 2 to 6 species. Analysis of these groups showed that the communities at the overburden and phosphogypsum dumps differ from the conventional background areas only in the presence of a number of ruderal species. However, the communities adjacent to the tailings pond differed the most from the reference areas (e.g. by the presence of species that are only found near the tailings pond).

Anthropogenic impact - phosphate fertilizer production - alters the natural ecosystems previously located in the deposit area and, instead, returns new communities to nature through reclamation, which have a different structure, which is most evident in the species composition of the herb and shrub layer. The restored areas can be used for recreational purposes or forestry.

**Protected provision.** Spruce communities on overburden dumps of phosphate fertilizer production undergo five stages of formation. At the same time, the herb and shrub layer, even 40 years after reclamation, is represented mainly by ruderal species. The species composition of vegetation changes most significantly in the territory of the deposit adjacent to the tailings ponds.

## Conclusion

As a result of the processing of the factual material obtained by the author, as well as the study of available literature sources, the following conclusions can be made:

1. The landscape-destructive impact of phosphate fertilizer production consists in withdrawal of phosphate ore from the subsoil, formation of quarries, displacement of overburden rocks, formation of overburden rock dumps and phosphogypsum dumps, creation of tailings pits. These processes lead to almost complete destruction of the deposit's soil and vegetation cover. Therefore, measures are taken to re-cultivate the disturbed lands.

LandSAT images show that some ecosystems created in the place of former overburden rock dumps are several decades old. Disturbed land peaked in the 1980s. By 2022 there are practically no uncultivated overburden dumps left.

Landscape-destructive impacts in the study area have decreased significantly over the past two decades. Moreover, new technologies are being developed for the application of phosphogypsum dump material.

2. The emission impact of phosphate fertilizer production can manifest itself as an impact on the natural environment through atmospheric emissions, wastewater discharges and by depositing hazardous wastes. Process emissions from phosphoric acid production include fluorides, phosphates, dust, cadmium, lead, zinc and radionuclides (generated during the thermal production process). In superphosphate production, fluorides, chlorides, nitrogen compounds and dust may enter the atmosphere and subsequently be deposited. In NPK production, nitrogen compounds, fluorides and chlorides are emitted as pollutants.

A separate source of pollutants is phosphogypsum dump. According to literature data strontium, fluorine, phosphorus and sulphur as well as natural radionuclides are the main pollutants of exposure of adjacent territories to phosphogypsum dumps.

3. The soil cover of the Kingisepp phosphate deposit has been significantly altered by human activity. Natural soil types have been replaced by anthropogenic surface formations. On 3 sample plots of the deposit natural soil cover remained with zonal soil types (sod-podzolic and podbur), in all other post-technogenic ecosystems there were replantozem (consequence of reclamation). RAT and TCH horizons are distinguished as replantozem horizons.

The movement of lithogenic material and the dumping of large tonnage waste has altered the topography and created elevation differences of up to several tens of metres. Three processes have been identified as altering the natural geochemical setting of the deposit: the release of pollutants through emissions from phosphoric acid and phosphate fertilizer production, the aerogenic transport of phosphogypsum particles into adjacent landscapes and the influence of the chemical composition of overburden underlying much of the deposit.

4. The present ecological state of the soil cover of the Kingisepp phosphate deposit has been studied with a wide group of chemical elements. According to the degree of anthropogenic impact three types of territories have been singled out - conditionally background (forest and bog ecosystems), recultivated overburden rock dumps, and also large technogenic objects - phosphogypsum dumps and tailing pits. It was found that, in general, no exceedances of MPC in the conditional background area were detected for all elements, only single exceedances for copper, manganese, nickel and zinc. The reclaimed overburden dumps have exceeded MPCs for manganese, copper, zinc and lead. In the soils at the phosphogypsum dump and the tailings dump, exceedances of MPCs for manganese, copper, lead, nickel, chromium and zinc were recorded.

Low variation (coefficient of variation less than 30 %) is characterized by barium and lead; medium variation (coefficient of variation 30-60 %) by cobalt, chromium, iron, manganese, scandium, zinc; high variation (coefficient of variation 60-100 %) by copper, nickel, antimony, vanadium; abnormally high (coefficient of variation more than 100 %) by cadmium and strontium. It has been established that the maximum content of bulk forms of barium, cadmium, copper, nickel, antimony, strontium, vanadium, zinc is characteristic of the soils selected at the phosphogypsum dump and tailings pond. In soils of technogenic objects decrease of organic matter quantity is also observed. Cobalt, manganese, lead, scandium are evenly distributed over the study area.

The maximum permissible concentration values of chemical elements in the soils of large technogenic objects calculated according to the maximum permissible concentration limit (MPC) showed that hygienic norms were exceeded for vanadium 1,5 times; for copper and zinc - 2 times; for cadmium - 3 times; for nickel - 5 times; for sulfur - 7 times; for labile fluorine - 3 times. The average values of the content of elements in the soils of technogenic objects exceed the hygienic norms only for sulfur.

Coefficients of concentration of average and especially maximum contents of elements in soils of large technogenic objects show that values of zonal background for the majority of elements are considerably exceeded. On conditionally backgrounded territory zinc 1,2 times, phosphorus 1,3 times, fluorine 1,5 times, lead 2,2 times, barium 12 times excess. MPC in the conditional background area was exceeded by 7 times for sulphur.

In general, when compared, the concentration ratios calculated for zonal background (mean) and southern taiga soils in the Barents region (median) are the same for the list of elements. Coefficients exceeding unity calculated both for zonal background (average) and for southern taiga soils of the Barents region (median) are observed for barium, calcium, phosphorus, fluorine, strontium. The percentage of mobile forms increases with the increase of

the gross content. Low mobility (0-1 %) elements are absent, medium mobility (1-10 %) is characteristic for barium, lead, nickel and zinc, high mobility (10-20 %) for manganese and copper, high mobility (more than 20 %) elements are absent. The issue of developing environmental standards and establishing background concentrations for different regions of the Russian Federation remains open.

Strontium and fluorine and mobile forms of nickel accumulate in soils of light granulometric composition, and mobile forms of barium accumulate in soils of heavy granulometric composition. In quasi-soils cobalt, fluorine, iron, manganese, phosphorus and strontium are accumulated more than in other soils, in peaty soils - antimony, in lithozem - barium, in texturally differentiated soils - sulfur, in gleyzem - chrome, copper and scandium, and in alphasol - lead.

The chemical composition of soils in the studied area is determined by four factors: rock factor (44 %), production of phosphorus fertilizers (20 %), influence of overburden rocks (14 %), input of sulfur from phosphogypsum disposal (7 %).

The carried out research has shown that at Kingisepp phosphate deposit there is no increase of activity of natural radionuclides, even on the contrary - activity of some radionuclides is less than in the conditionally-background territory. All samples have a value of specific effective activity less than 370 Bq/kg (permissible specific effective radioactivity of building materials (such as sand and crushed stone) used in residential building), the highest - 124 Bq/kg - at the phosphogypsum dump. That is, the study showed that both the phosphogypsum dump and the soils located in the zone of its influence are safe in terms of radioactive impact. Moreover, it is worth noting that in the area under consideration the situation is the opposite - the activity of certain radionuclides in the territory of the deposit is lower by 50-75%.

The impact of phosphate fertiliser production changes the acidity of soils. However, there are different trends worldwide: at plants in Spain and Turkey, phosphogypsum significantly acidifies soils adjacent to production facilities; in Lebanon, on the contrary, soil pH increases. In the territory of Kingisepp phosphate deposit, the average pH increases by 2 units in comparison with the conditionally background area: both at aqueous extraction (actual acidity) and at saline (potential acidity). It is worth noting that in those regions of the World where phosphate rock is deposited next to limestone, the same situation was observed - the soil pH value increased. pH water in the conditionally-background area was 5.3 pH units and in the phosphate deposit area it was 7.2 pH units. pHCI in the conditionally-background area was 4,3 pH units, and in the deposit area - 6,6 pH units. Change in reaction of environment, in its turn, influences vegetation, creating favourable conditions for development of species, preferring near-neutral reaction of environment.

5. Indicator elements in assessing the impact of production of phosphorus fertilizers on soils can be: the gross content of strontium, fluorine and phosphorus. Content of fluorine increases in 3 times in comparison with conditionally-phonon area, and water-soluble forms of ammonium nitrogen - in 4 times. From phosphogypsum dumps strontium and phosphorus enter adjacent areas. Strontium content differs from conventional background area by 1,6 times, and phosphorus content - by 4 times towards increase.

One of the most important indicators of phosphorus production in the studied area is the coefficient of concentration of chemical elements, calculated on the basis of the regional background of the Barents region for soils of southern taiga.

6. It is possible to distinguish five stages of spruce community formation on overburden rock dumps of the Kingisepp phosphate deposit by forest reclamation. The first stage is the application of soil and seeding with perennial grasses to form a stable ground cover. The second stage represents planting of forest crops (mainly European spruce *Picea abies* is used in the field). The end of the second stage is determined by the emergence of the tallest individuals into the tree layer (over 6 m). The third stage of community formation is the growth of all stands to stand level and the creation of birch-spruce or spruce-birch forest, as at approximately 30 years of age, European spruce in the areas reclaimed by it can occupy up to 50% of the stand. At the fourth stage, spruces displace birches from the community, remaining almost the only representative of the tree layer, starting to form the fifth stage, which is not yet represented in the studied area - dead spruce forests. In the Kingisepp area on overburden dumps, the spruces reach the fourth stage approximately by the age of 40 years. In terms of the use of disturbed areas (such as overburden dumps), forest reclamation is the best option.

7. The method of correlation pleids identified 15 vegetation groups based on the occurrence of species in the geobotanical descriptions: of these 3 large groups comprising more than 15 species and 12 small groups comprising from 2 to 6 species. Analysis of these groups showed that the communities at the overburden and phosphogypsum dumps differ from the conventional background areas only in the presence of a number of ruderal species. However, the communities adjacent to the tailings pond differed the most from the notional background (e.g. by the presence of species that are only found near the tailings pond). Only in these communities *Thalictrum flavum*, *Matricaria chamomilla*, *Alopecurus pratensis*, *Bidens tripartita* and *Chenopodium album* could be found. Note that the diversity of soils, moisture regime and degree of anthropogenic transformation leads to a heterogeneity of species found near tailings sites.

Communities on waste dumps differ from conditionally-background territories not so evidently. Small groups characteristic of different conditions have been singled out - in general,



for all technogenic objects, specifically for overburden dumps, and for certain species (small-leaved or coniferous), up to the group occurring in 40-year old reclaimed spruce forests.

8. As a conclusion, it can be concluded that the area affected by the production of phosphate fertilizers is characterized by the change of natural soil types to anthropogenic surface formations containing increased amounts of strontium, fluorine and phosphorus. Under condition of occurrence of raw materials under carbonate rocks there is an additional influence expressed in the form of alkalization and increase of gross iron, manganese and sodium in soil. The natural-anthropogenic ecosystems forming the land cover of the phosphorite deposit after reclamation have significant differences from the zonal conditionally-phonous ones due to the abundance of species resistant to the chemical composition and properties of the replantozem.

### **Acknowledgements**

The research was supported by the Russian Foundation for Basic Research within the framework of scientific project No. 20-35-90099 "Geoecological assessment of the environmental impact of phosphogypsum dumps and development of optimal ways of their reclamation".

The research was supported by the Matter Analysis Methods Resource Centre of SPbU Science Park.

## References

1. Abakumov E.V. Regeneration soil formation in post-technogenic ecosystems of quarry-dump complexes of North-West Russia: Ph. : speciality 03.00.27 - Saint-Petersburg: SPbSU, 2004. - 16 c.
2. Abakumov, E. V. Humus condition of soils of the abandoned quarry-disposal complexes of Leningrad region / E. V. Abakumov, E. I. Gagarina // Soil Science. - 2008. - № 3. - C. 287-298.
3. Abramov A.M., Galiev R.S., Sobol Yu.B. Organization of REM production during complex processing of phosphogypsum // Topical issues of mining, production and use of rare earth elements in Russia: materials of the All-Russian Conference on REMs-2013, 19-21 November 2013: Abstracts of Reports / edited by Kerbel B.M. - Seversk : Publishing house of St. Petersburg National Research Nuclear University MEPhI, 2013. - C.60-64.
4. Belobrov V.P. Features of biological reclamation of phosphogypsum dump of Balakovsky branch of JSC "Apatit" / V.P. Belobrov, A.M. Grebennikov, A.Y. Kulenkamp, A.I. Ryashko, E.L. Torochkov // Environmental Newsletter of the North Caucasus. - 2015. - №1. - C.20-25.
5. Berezhnaya N.P., Berezhnaya V.P. Effect of sewage sludge and phosphogypsum on soil properties and productivity of winter wheat // Environmental Bulletin of the North Caucasus. - 2012. - №2. - C.27-29.
6. Berenstein F.Y. On the effect of strontium salts on carbohydrate metabolism in animals // Reports of the National Academy of Sciences of Belarus. - 1961. - №7. - C.462.
7. Vekshin A.K. Impact of the mining works termination on the hydro- and hydro-geological conditions in the territory of "Phosphorite" Ltd : graduate qualification work (bachelor's work) / RGGMU. - SPb : RGGMU, 2019. - 70 c.
8. Water of Russia // Popular Science Encyclopedia. - URL: <https://www.water-ru.ru> (date of reference: 25.09.2021).
9. Voropaeva Z.I., Trotsenko I.A., Parfenov A.I. Changes in properties of sod saline cortex during one-time and repeated reclamation with phosphogypsum // Soil Science. - 2011. - №3. - C.346-357.
10. Vykhandu L.K. About Research of Multi-Significant Biological Systems // Application of Mathematical Methods in Biology / Ed. by Terent'ev P.V. - 1964. - №3.
11. Georgievsky A.F., Bugina V.M. Modern state and prospects of development of phosphate-raw material base of Russia // Bulletin of PFUR. Engineering Research. - 2020. - №3. - C.197-207. - DOI 10.22363/2312-8143-2020-21-3-197-207 .

12. Gorlov A.A., Krechetov P.P., Rogova O.B. Changes in the chemical composition of soils under the influence of phosphogypsum // XXIII International Scientific Conference of Students, Postgraduate Students and Young Scientists "Lomonosov-2016". - 2016. - C.106-107.
13. GOST 17.4.3.01-2017. Interstate standard. Nature protection. Soils. General requirements for sampling.
14. GOST 26427-85. Soils. Method for determination of sodium and potassium in aqueous extract.
15. GOST 26428-85. Soils. Methods of determination of calcium and magnesium in aqueous extract.
16. GOST P 53219-2008. Determination of nitrate nitrogen, ammonium nitrogen and total nitrogen in air-dry soils using calcium chloride as an extractant.
17. GOST R 54650-2011. Soils. Determination of mobile compounds of phosphorus and potassium by Kirsanov's method modified by CINAO.
18. National Geological Map of Russia. GGK-200. Sheet O-35-V. Scale 1:200 000. Geological map. - URL: [www.geolkart.ru/](http://www.geolkart.ru/) (accessed 25.11.2020).
19. State Geological Map of Russia. GGK-200. Sheet O-35-V. The scale of 1:200 000. Map of Quaternary deposits // VSEGEI. - URL: [www.geolkart.ru/](http://www.geolkart.ru/) (accessed 25.11.2020).
20. Gribova S.A., Isachenko T.I., Lavrenko E.M. Vegetation of European Russia. - SPb : Nauka, 1980. - 236 c.
21. Dadali V.A., Judge D.A., Ivanova L.V. Biochemical disorders in chronic intoxication with salts of stable strontium // Preventive and Clinical Medicine. - 2014. - №4. - C.124-131.
22. Dmitrakova Y.A., Abakumov E.V. Restoration of soil and vegetation cover in the reclamation areas of Kingisepp phosphorite deposit // Soil Science. - 2018. - №5. - C.630-640.
23. Dmitriev V.V., Fedorova I.V., Biryukova A.S. Approaches to integral assessment and GIS-mapping of sustainability and ecological well-being of geosystems. Part IV. Integral assessment of the ecological well-being of terrestrial and aquatic ecosystems. Series 7. Geology. Geography. - 2016. - №2. - C.37-53. - DOI: 10.21638/11701/spbu07.2016.204.
24. Dokuchaev V.V. Towards a Study of the Zones of Nature: Horizontal and Vertical Soil Zones. - SPb : type. SPb. gradostanstvo, 1899. -28 c.
25. Elsukova E.Yu. Pollution of soils in the impact zone of phosphate fertilizers production / Elsukova E.Y., Nedbaev I.S., Kuzmina D.S. // Bulletin of St. Petersburg State University. Earth Sciences. - 2022. - №4. - P. 652-674 - doi: <https://doi.org/10.21638/spbu07.2022.406>

26. Elsukova E. Yu, Nedbaev I. S. and Tsyvkunova N. V. The impact of phosphate mining on acid-base properties of soils // Ecological activities and environmental education: regional aspect : proceedings of All-Russia Scientific Conference, St Petersburg, 16 December 2020. - SPb. : Leningrad State University named after A.S. Pushkin, 2020. - C.55-59.
27. Elsukova E.Yu. Pollution of soils by mobile forms of chemical elements in the zone of phosphate fertilizer production / Elsukova E.Y., Nedbaev I.S., Kuzmina D.S., Vydrenkova A.S. // Proceedings of VII International Symposium "Biocosmic interactions in natural and anthropogenic systems". - Saint-Petersburg. : SPbSU, 2022. - C.78-79.
28. Elsukova E.Y., Nedbaev I.S. Integrated and component-by-component assessment of natural environments affected by phosphate mining and processing // Current issues of sustainable nature management: scientific and methodological support and practical solutions: Proceedings of the International Scientific-Practical Conference dedicated to the 60th anniversary of the Research Laboratory of Landscape Ecology of Geography and Geoinformatics Faculty of Belarusian State University / edited by D. Vorobyov. - Minsk : Belarusian State University, 2022. - C.80-83.
29. Zhukova A.D., Khomyakov D.M. Ecological assessment of soil cover condition on the site of industrial area of Moscow-Oka ecological-economic zone // Bulletin of Moscow University. Series 17: Soil Science. - 2016. - №1. - C.18-25.
30. Zalensky O.V., Korchagin A.A., Lavrenko E.M. Field geobotany. - Moscow - Leningrad : Publishing House of the Academy of Sciences of the USSR, 1959. - Vol. 1 of 4. - 444 c.
31. Ivanova V.V. Influence of phosphogypsum on some properties of Kuban River water // Ecological Vestnik of Northern Caucasus. - 2011. - № 7. - C.77-78.
32. Kabata-Pendias A., Pendias H. Micronutrients in Soils and Plants . - Moscow: Mir, 1989. - C.439.
33. Kasimov A.M., Reshta E.E. Integrated processing of phosphogypsum from dumps and waste of current production of mineral fertilizers of JSC "Rovnoazot" // Metallurgical and Mining Industry. - 2013. - №3. - C.213-217.
34. Kizinek S.V., Sheudzhen A.Kh., Akanova A.N. Ecological and agro-economic aspects of phosphogypsum application in agriculture // XXI century: results of the past and problems of the present plus. - 2013. - №9. - C.206-216.
35. Climatic zoning of Russia // National Atlas of Russia. - 2004. - Vol. 2. - URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/146-150.html> (date of reference: 25.12.2020).
36. Korobanova T.N. Russian and foreign experience of phosphogypsum utilization // Science yesterday, today, tomorrow. - 2016. - №11. - C.63-71.

37. Kushnir E.A., Nedbaev I.S., Treschevskaya E.I. Assessment of forest plantations and soil cover in the reclamation areas of Kingisepp phosphate deposit // Proceedings of St. Petersburg Research Institute of Forestry. - 2021. - №3. - C.68-80. - doi: 10.21178/2079-6080.2021.1.68.
38. Luga // Big Russian encyclopedia. - URL: <https://bigenc.ru/geography/text/5728357> (date of reference: 25.01.2021).
39. Materials of environmental impact assessment of new technology "Production and application of Recultivant on the basis of phosphogypsum neutralized" by LLC "PG Phosphorit". - Moscow: Ecopesticide Research Center EPI-Center, 2021. - 324 c.
40. Mezeva A.A. To the issue of safety of using industrial waste in road construction // Proceedings of the International Environmental Forum "Natural Resources of Siberia and the Far East - a look into the future" (Russia, Kemerovo, 19 - 21 November 2013) in 2 vol. T. 2 / edited by Galanina T.V. and Baumgarten M.I. - Kemerovo: KuzSTU, 2013. - C.63-66.
41. Melnikova A.D., Khomyakov D.M. Pollution of soil cover in the impact zone of enterprises producing complex mineral fertilizers // Collection of scientific papers of international seminars held as part of the Russian-Finnish project "Clean Rivers - to Healthy Baltic Sea" SE 717 in 2013-2015 / edited by V.B. Minin. - St. Petersburg: Non-State Educational Institution "Institute of Agribusiness, Economics and Law", 2016. - C.73-75.
42. M-MVI-80-2008 Methodology for measurement of element mass fraction in soil, soil and sediment samples by atomic emission and atomic absorption spectrometry.
43. All-Russian Geophysical Institute MPEI N 10/2010 "Determination of macro and trace elements (including rare-earth elements) by inductively coupled plasma mass spectrometry in rocks, soils and loose sediments.
44. Naymanbayev M.A. Extraction of REE from phosphogypsum from Karatau phosphorite processing / M.A. Naymanbayev, N.G. Lohova, Z.A. Baltabekova, A.J. Dukembayeva // Actual issues of mining, production and use of rare earth elements in Russia: materials of All-Russian Conference on Rare Earth Materials "REM-2013", 19-21 November 2013: Abstracts / edited by B.M. Kerbel. - Seversk: Publishing house of STI MEPhI, 2013. - C.60-64.
45. Nasledov A.D. Mathematical Methods in Psychological Research. Analysis and interpretation of data. Textbook. - SPb.: Rech, 2007. - 392 c.
46. Nevedrov N.P., Protsenko E.P., Glebova I.V. Ratio of content of gross and mobile forms of heavy metals in Kursk soils // Soil Science. - 2018. - №1. - C.111-117.
47. Nedbaev I.S. Study of reclamation consequences: characteristics of birch communities at man-made sites of Kingisepp phosphorite deposit / I.S. Nedbaev, E.A. Kushnir,

E.Yu. Elsukova, E.I. Treschevskaya // Proceedings of IV All-Russian Scientific Conference with international participation "Scientific basis for sustainable forest management". - MOSCOW: COPERNICUS SCIENCE CENTRE, 2020. - C.205-208.

48. Nedbaev I.S., Elsukova E.Y. Study of global and Russian experience in developing optimal ways of reclamation of disturbed lands // Bulletin of Eurasian Science. - 2021. - №6. - EDN AIICKP.

49. Nedbaev I.S., Tsyvkunova N.V., Elsukova E.Yu. Review of Russian and international experience in solving environmental problems of production, storage, processing and use of phosphogypsum // Bulletin of Eurasian Science. - 2022. - №4. - C.10.

50. Nedbaev I.S., Tsyvkunova N.V., Kuzmina D.S. Geochemical features of formation of low-pitched soils in the area of impact Kingisepp phosphorite deposit // Proceedings of the International Scientific Conference Lyceum Reading "Step into the future: modern students as creative, scientific and professional potential of Russia". - St. Petersburg: Leningrad State University named after A.S. Pushkin, 2021. - C.52-53.

51. Neshataev Y.N. Methods of analysis of geobotanical materials. - L.: Publishing house of Leningrad State University, 1987. - 192 c.

52. Neshataev Y.N. Experience of using punch cards to analyze communities of forest-steppe oak forests // Botanical journal. - 1968. - №4.

53. Neshataev Y.N. The simplest algorithms for calculation of interspecific conjugacy coefficient Bravae for classification of vegetation // Botanical journal. - 1976. - №5.

54. On the state and use of mineral resources in the Russian Federation in 2019 : State report / Ministry of Natural Resources and Environment of the Russian Federation. - Moscow: Ministry of Natural Resources, 2020. - URL: [https://www.mnr.gov.ru/docs/o\\_sostoyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/gosudarstvennyy\\_doklad\\_o\\_sostyanii\\_i\\_ispolzovanii\\_mineralno\\_syrevykh\\_resursov\\_rossiyskoy\\_federatsii/](https://www.mnr.gov.ru/docs/o_sostoyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/gosudarstvennyy_doklad_o_sostyanii_i_ispolzovanii_mineralno_syrevykh_resursov_rossiyskoy_federatsii/) (date of reference: 25.02.2021).

55. On Approval of Priority Areas of Development of Science, Technologies and Technologies in the Russian Federation and the List of Critical Technologies of the Russian Federation: Presidential Decree of July 7, 2011 N 899 // information and legal portal Garant. - URL: <https://base.garant.ru/55171684/> (date of reference: 17.05.2023).

56. Opekunova M.G. Methods of physical-chemical analysis of soils and plants: Methodological guidelines / M.G. Opekunova, I.Yu. Arestova, E.Yu. Elsukova, N.A. Sheynerman - St. Petersburg: Publishing house of S.-Peter. - 70 c.

57. Opekunova M.G., Muratova E.E. Application of correlation pleiades method to assess the transformation of natural complexes in the impact zone of the Bashkir copper-sulfur plant // Vestnik of St. Petersburg State University. Earth Sciences. - 2005. - №2. - C.51-66.
58. Passport of VAK scientific specialty 25.00.36 "Geoecology" // VAK. - URL: <http://arhvak.minobrnauki.gov.ru/316> (circulation date: 25.03.2021).
59. Petrenko D.V., Belyuchenko I.S. Impact of wastes of Belorechensk chemical plant on strontium content in the surrounding landscapes // Environmental Bulletin of the North Caucasus. - 2012. - №1. - C.4-79.
60. Plekhanova V.A. Problem of rationing cadmium content in soil // Bulletin of Kazan State Energy University. - 2010. - №2. - C.55-59.
61. Weather forecast // World Weather. - URL: <https://worldweather.ru/archive/russia/kingisepp/> (date of access: 25.04.2021).
62. QGIS project // Official website. - URL: <https://qgis.org/ru/site/> (accessed 22.09.2021).
63. Development of a Programme for the creation and maintenance of the IMTMP and its coordination with the territorial body of state water supervision. Monitoring of the territory of the waste pits of OOO PG Phosphorit / CNEE SPb RAS. - SPb : CSCE SPb RAS, 2009.
64. Ramensky L.G., Tsatsenkin I.A., Chizhikov O.N., Antipin N.A. - M.: State Publishers of Agricultural Literature, 1956. - 240 c.
65. Rastvorova O.G. Chemical analysis of soils: Textbook / Rastvorova O.G., Andreev D.P., Gagarina E.I., Kasatkina G.A., Fedorova N.N. - St. Petersburg, Publishing house of S.-Peterburg University, 1995. - 264 c.
66. Vegetation of Russia // National Atlas of Russia. - 2004. - Volume 2. - URL: <https://nationalatlas.ru/tom2/328-330.html> (accessed 25.04.2021).
67. Environmental, Health and Safety Guidelines for Phosphate Fertilizer Production // IFC. International Finance Corporation. - 2013. - URL: <https://www.ifc.org/wps/wcm/connect/edef4856-b62f-4005-936519c581a3e072/Phosphate%2BFertilizer%2BPlants%2B-%2BRussian%2B%2BFinal.pdf?MOD=AJPERES&CVID=jkD2EM1&ContentCache=NONE&CACHE=NONE> (accessed 22.03.2021).
68. Saet Yu.E., Revich B.A., Yanin E.P. Geochemistry of environment. - Moscow: Nedra, 1990. - 335 c.
69. Samonov A.E., Melentiev. V. Ecological impact of phosphogypsum and pyrite cinders storages on the environment and prospects for their integrated processing with obtaining highly marketable products // Ecology of industrial production. - 2008. - №2. - C.65-76.

70. SanPiN 1.2.3685-21. Hygienic Norms and Requirements for Safety and (or) Harmlessness to Man of Environmental Factors.
71. Senkin O. Landscape-ecological mapping and ecological assessment of disturbed territories using bioindication methods : tutorial / O. V. Senkin, M. G. Opekunova, V. M. Scherbakov. - Saint-Petersburg : Saint-Petersburg State University Publisher, 2000. - 68 c.
72. Serdyukova A.F., Barabanshchikov D.A. Consequences of soil pollution by heavy metals // *Young Scientist*. - 2017. - T.51. - C.131-135.
73. Judge D.A., Lastkov D.O. The problem of toxic effects of stable strontium salts on the organism // *Ukrainian Journal of Modern Toxicology Problems*. - 2013. - №3. - C.55-60.
74. Sukhacheva E., Aparin B.F. Typology of anthropogenic-altered SPP / E. Sukhacheva, B. F. Aparin // *Soils in biosphere : Collection of materials of All-Russian scientific conference with international participation, dedicated to the 50th anniversary of the Institute of Soil Science and Agrochemistry SB RAS, Novosibirsk / Editor in Chief A.I. Syso. Volume 2*. - Novosibirsk: National Research Tomsk State University, 2018. - C. 434-438.
75. Tarchigina N.F., Karabaev. G.V., Kapranova M.P. Environmental problems in phosphoric acid production // *Bulletin of Moscow State Open University. Moscow. series: technique and technology*. - 2011. - №3. - C.60-63.
76. Terent'ev V.P. Method of correlation pleiades // *Bulletin of Leningrad University*. - 1959. - №9.
77. Urazaev N.A., Bakulin A.A., Nikitin A.V. *Agricultural Ecology*. - Moscow: Kolos Publisher, 2000. - 304 c.
78. FR. 1.38.2011.10712. Methods for Measurement of Specific Activity of Natural Radionuclides, Cesium-137, and Strontium-90 in Environmental Objects and Industrial Products with Gamma and Beta Radiometer and Gamma Spectrometer.
79. F.R.1.39.2007.03222. Biological methods of control. Method for Determination of Toxicity of Water and Aqueous Extracts from Soil, Sewage Sludge and Waste by *Daphnia* Mortality and Fertility Variation.
80. Chernysh E.Y., Platsuk L.D. Study of effectiveness of biosulphide treatment of urban wastewater sludge // *Visnik of Sumy State University. Series of Engineering Sciences*. - 2012. - №4. - C.168-179.
81. Chugunov A.A., Makarov V.D. Method of obtaining complex nitrogen-phosphate-sulphate fertilizer from phosphogypsum (variants) : patent : RU 2478599 C1. - Russia, 10.04.2013.
82. Shershnev O.V. Assessing the impact of phosphogypsum waste on environmental components // *Ecological Bulletin*. - 2016. - №2. - C.97-103.



83. Yakovlev A.S., Kaniskin M.A., Terekhova V.A. Ecological assessment of soils exposed to phosphogypsum // *Soil Science*. - 2013. - №6. - C.737. - DOI 10.7868/S0032180X13060130.
84. Yanin E.P. Scandium in the environment (prevalence, anthropogenic sources, secondary resources) // *Problems of the Environment and Natural Resources*. - 2007. - №8. - C.70-90.
85. Yashin S.O. Technology and properties of bituminous-mineral compositions modified with phosphogypsum : Abstract of doctoral thesis / North Caucasian Federal University: North Caucasian Federal University, 2013.
86. Al-Hwaiti M., Al-Khashman O. Health risk assessment of heavy metals contamination in tomato and green pepper plants grown in soils amended with phosphogypsum waste materials // *Environmental Geochemistry Health*. – 2015. – Vol.37. – P.287–304. – DOI 10.1007/s10653–014–9646–z.
87. Andersson M. Bacteria, molds, and toxins in water-damaged building materials / Andersson M., Nikulin M., Kõljalg U., Andersson M., Rainey F., Reijul K., Hintikka E., Salkinoja-Salonen M. // *Applied and Environmental Microbiology*. – 1997. – T.63. – C.387–393.
88. Aoun M. Releases of phosphate fertilizer industry in the surrounding environment: investigation on heavy metals and polonium-210 in soil / Aoun M., El Samrani A.G., Lartiges B.S., Kazpard V., Saad Z. // *Journal of environmental sciences*. – 2010. – T.22.– P.1387–1397. – doi: 10.1016/S1001-0742(09)60247-3.
89. Arocena J.M., Rutherford P.M., Dudas M.J. Heterogeneous distribution of trace elements and fluorine in phosphogypsum by-product // *The Science of the Total Environment*. – 1995. – T.162. – P.149–160.
90. Azouazi M. Natural radioactivity in phosphates, phosphogypsum and natural waters in Morocco / Azouazi M., Ouahidi Y., Said F., Andres Y. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2001. – №2. – P.231–42. – DOI:10.1016/S0265-931X(00)00153-3.
91. Betti M. Results of the European Commission Marina II Study Part II – Effects of discharges of naturally occurring radioactive material / Betti M., Aldave De Las Heras L., Janssens A., Henrich E., Hunter G., Gerchikov M., Dutton M., Van Weers A.W., Nielsen S., Simmonds J., Bexon A., Sazykina T. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2004. – T.74. – P.255–277.
92. Binnemans K. Towards zero-waste valorisation of rare-earth-containing industrial process residues: A critical review / Binnemans K., Jones P. T., Blanpain B., Van Gerven T., Pontikes Y. // *Journal of Cleaner Production*. – 2015. – T.99. – P.17–38.

93. Bolívar J., García-Tenorio R., Más J. Radioactivity of Phosphogypsum in South-West of Spain // *Radiation Protection Dosimetry*. – 1998. – T.76. – P.185–189. – DOI:10.1093/OXFORDJOURNALS.RPD.A032263.
94. Carbonell-Barrachina A., DeLauneb R. D., Jugsujindab A. Phosphogypsum chemistry under highly anoxic conditions // *Phosphogypsum chemistry under highly anoxic conditions*. – 2002. – T.22. – P.657–665.
95. Dartan G., Taşpınar F., Toroz I. Analysis of fluoride pollution from fertilizer industry and phosphogypsum piles in agricultural area // *Journal of Industrial Pollution Control*. – 2017. – №1. – P.662–669.
96. Degirmenci N., Okucu A., Turabi A. Application of phosphogypsum in soil stabilization // *Building and Environment*. – 2007. – T.42. – P.3393–3398.
97. Dueñas C. Exhalation of (222)Rn from phosphogypsum piles located at the Southwest of Spain / Dueñas C., Liger E., Cañete S., Pérez M., Bolívar J. P. // *Journal of Environmental Radioactivity*. – 2007. – T.95. – P.63–74. – doi: 10.1016/j.jenvrad.2007.01.012.
98. Elbaz-Poulichet F. Metal biogeochemistry in the Tinto–Odiel rivers (Southern Spain) and in the Gulf of Cadiz: A synthesis of the results of TOROS project / Elbaz-Poulichet F., Braungardt C., Achterberg E., Morley N., Cossa D., Beckers J.-M., Nomérange P., Cruzado A., Leblanc M. // *Continental Shelf Research*. – 2001. – T.21. – P.1961–1973.
99. Gaudry A. Heavy Metals Pollution of the Atlantic Marine Environment by the Moroccan Phosphate Industry, as Observed through their Bioaccumulation in *Ulva Lactuca* / Gaudry A., Zeroual S., Gaie-Levrel F., Moskura M. // *Water Air and Soil Pollution*. – 2007. – №1. – P.267–285. – DOI:10.1007/s11270-006-9196-9.
100. Gezer F. Natural radionuclide content of disposed phosphogypsum as TENORM produced from phosphorus fertilizer industry in Turkey / Gezer F., Turhan S., Uğur F., Gören E. // *Annals of Nuclear Energy*. – 2012. – T.50. – C.33–37. – DOI:10.1016/j.anucene.2012.07.018.
101. Mousa S., Hanna A. Synthesis of nano-crystalline hydroxyapatite and ammonium sulfate from phosphogypsum waste // *Materials Research Bulletin*. – 2015. – T.48. – C.823–828.
102. Nedbaev I.S. Forest recultivation of overburden dumps of the Kingisepp phosphorite field / Nedbaev I.S., Elsukova E.Yu., Kushnir E.A., Treschevskaya E.I. // *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. – 2021. – T.875. – C.012029. – doi: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/875/1/012029>.
103. Nedbaev I.S., Elsukova E.Yu. Geochemical features of the accumulation of phosphorus and fluorine in soils in the zone of influence of the phosphogypsum dump // *Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Геохимия*

окружающей среды». – М.: Всероссийский научно-исследовательский институт минерального сырья им. Н. М. Федоровского, 2022. – С.74.

104. Nedbaev I.S., Elsukova E.Yu., Chunyaeva E.O. Geocological assessment of the impact of phosphate fertilizer production on taiga soils // IOP Conference Series Earth and Environmental Science. – 2023.

105. Nielsen K. Production of mycotoxins on artificially inoculated building materials / Nielsen K., Thrane U., Larsen T. O., Nielsen P., Gravesen S. // Chemistry. – 1998.

106. Nortcliff S. Standardisation of soil quality attributes // Agriculture, Ecosystems and Environment. – 2002. – Т.88. – P.161–168.

107. Papaslioti E.-M. Stable isotope insights into the weathering processes of a phosphogypsum disposal area / Papaslioti E.-M., Pérez-López R., Parviainen A., Macías F., Delgado Huertas A., Garrido C. J., Marchesi C., Nieto J. // Water Research. – 2018. – Т.140. – P.344–353. – doi: 10.1016/j.watres.2018.04.060.

108. Production of phosphoric acid worldwide // Statista. – URL: <https://www.statista.com/statistics/1289301/global-phosphoric-acid-production-by-region/> (дата обращения: 21.09.2021).

109. Rutherford P.M., Dudas M., Samek R. Environmental impacts of phosphogypsum // Science of The Total Environment. – 1994. – Т.149. – P.1–38. – DOI:10.1016/0048-9697(94)90002-7.

110. Saadaoui E. Phosphogypsum: potential uses and problems – a review / Saadaoui E., Ghazel N., Romdhane C., Massoudi N. // International Journal of Environmental Studies. – 2017. – doi: 10.1080/00207233.2017.1330582.

111. Salminen R., Chekushin V., Bogatyrev I. Geochemicals atlas of eastern Barents region // Journal of Geochemical Exploration. – 2004. – Т.83.

112. Saueia C.H.R., Mazzilli B.P. Distribution of natural radionuclides in the production and use of phosphate fertilizers in Brazil // Journal of Environmental Radioactivity. – 2006. – Т.89. – P.229–239.

113. Shen W. Investigation on the application of steel slag–fly ash–phosphogypsum solidified material as road base material / Shen W., Zhou M., Ma W., Hu J., Cai Z. // Journal of Hazardous Materials. – 2009. – Т.164. – P.99–104.

114. Shen W., Zhou M., Zhao Q. Study on lime–fly ash–phosphogypsum binder // Construction and Building Materials. – 2007. – Т.21. – P.1480–1485.

115. Shirakawa M. A. Susceptibility of phosphogypsum to fungal growth and the effect of various biocides / Shirakawa M. A., Selmo S., Cincotto M. A., Gaylarde G., Brazolin

S., Gambale W. // *International Biodeterioration & Biodégradation*. – 2002. – Vol.49. – P.293–298.

116. Silva L. A review on the environmental impact of phosphogypsum and potential health impacts through the release of nanoparticles / Silva L., Oliveira M., Crissien T., Santosh M. // *Chemosphere*. – 2022. – DOI:10.1016/j.chemosphere.2021.131513.

117. Sousa A. Validation of avoidance assays for the screening assessment of soils under different anthropogenic disturbances / Sousa A., Pereira R., Antunes S. C., Cachada A., Pereira E., Duarte A. C., Gonçalves F. // *Ecotoxicol Environ Safety*. – 2008. – №3. – P.661–70. – DOI: 10.1016/j.ecoenv.2008.02.004.

118. Tayibi H. Environmental impact and management of phosphogypsum / Tayibi H., Mohamed C., López F., Alguacil F., López-Delgado A. // *Journal of environmental management*. – 2009. – T.90. – P.2377–2386. – doi: 10.1016/j.jenvman.2009.03.007.

119. Wang M. Distribution, health risk assessment, and anthropogenic sources of fluoride in farmland soils in phosphate industrial area, southwest China / Wang M., Li X., He W., Li J., Zhu Y., Liao Y., Yang J., Yang X. // *Environmental Pollution*. – 2019. – T.249. – doi: 10.1016/j.envpol.2019.03.044.

**APPENDIX**

## Appendix 1. Location of soil sampling.

Name of soil sample	Latitude	Longitude
Swamp 1	59,3518	28,4393
Swamp 2	59,35	28,4397
Swamp 3	59,415833	28,304272
Swamp 4	59,415567	28,306625
Forest 1-1	59,4149	28,3658
Forest 1-2	59,4125	28,3629
Forest 1-3	59,4098	28,3596
Forest 2-1	59,3956	28,377
Forest 2-2	59,394	28,3728
Forest 2-3	59,3922	28,3731
Forest 3-1	59,383406	28,372594
Forest 3-2	59,383831	28,373281
Forest 3-3	59,384414	28,373919
Forest 4-1	59,4556	28,503153
Forest 4-2	59,456061	28,504994
Forest 4-3	59,457339	28,507186
Forest by the road	59,381386	28,374075
Dumpster 1-1	59,3859	28,444
Dumpster 1-2	59,386	28,447
Dumpster 1-3	59,3851	28,4465
Dumpster 1-4	59,3825	28,4339
Dumpster 1-5	59,3851	28,4454
Dumpster 1-6	59,3839	28,4376
Dumpster 2-1	59,3751	28,4337
Dumpster 2-2	59,3745	28,4317
Dumpster 3-1	59,3762	28,4373
Dumpster 3-2	59,374	28,436
Dumpster 4-1	59,3709	28,4402
Dumpster 4-2	59,3695	28,4434
Dumpster 4-3	59,3664	28,44
Dumpster 4-4	59,3643	28,4436
Dumpster 4-5	59,3626	28,436
Dumpster 4-6	59,3612	28,4403
Dumpster 4-7	59,3594	28,4376
Dumpster 5-1	59,389047	28,430717
Dumpster 5-2	59,386592	28,423419
Dumpster 5-3	59,379261	28,426392
Dumpster 5-4	59,383939	28,426844
Dumpster 5-5	59,383048	28,427709
Dumpster 6-1	59,376239	28,459803
Dumpster 6-2	59,3732	28,458961
Dumpster 6-3	59,369242	28,458392
Dumpster 6-4	59,365314	28,458369

Name of soil sample	Latitude	Longitude
Dumpster 6-5	59,362331	28,459469
The farm	59,4125	28,3629
Phosphogypsum 1	59,3906	28,4393
Phosphogypsum 2	59,3914	28,4375
Phosphogypsum 3	59,3916	28,4381
Phosphogypsum 3-1	59,393197	28,435608
Phosphogypsum 3-2	59,393006	28,435164
Phosphogypsum 4	59,3931	28,435
Phosphogypsum 5	59,392	28,4373
Phosphogypsum 6	59,3916	28,4366
The tail 1	59,3994	28,4342
The tail 2	59,3919	28,4262
The tail 3	59,391783	28,426108
The tail 4	59,400986	28,406318
The tail 5	59,402623	28,404475
The tail 6	59,403514	28,406053

Annex 2: Soil types and plant communities in the sample plots.

Name of point	Soil	The plant community
Swamp 1	Oligotrophic peat soil	Pine-herb-rush-reedy sphagnum
Swamp 2	Oligotrophic peat soil	Pine-herb-rush-reedy sphagnum
Swamp 3	Ephthrophic peat soil	Pine wheatgrass-sphagnum
Swamp 4	Oligotrophic peat soil	Aspen-pine lingonberry-sphagnum
Forest 1-1	Gleysem greyhumus	Birch-grass-birch-ledum-taiga green-moss forest
Forest 1-2	Gleysem greyhumus	Birch-reedy-cottonwood
Forest 1-3	Gleysem greyhumus	Birch reedgrass
Forest 2-1	Gleysem greyhumus	A reedgrass meadow
Forest 2-2	Greyhumus lithozem	Alderwort
Forest 2-3	Greyhumus lithozem	Spruce sagebrush-grass
Forest 3-1	Gleysem greyhumus	Aspen, birch and spruce, sagebrush and meadow-aspen forest
Forest 3-2	Dernovo podbur	Spruce sagebrush-grass
Forest 3-3	Turfy illuvial glandular sub-burr	Spruce reedgrass
Forest 4-1	Oligotrophic peat soil	Willow-weed-sphagnum
Forest 4-2	Manganese-gley soil	Alder-aspen-willow-grassland
Forest 4-3	Dernovo podbur	Alder-aspen reedgrass-roadwort-greengrass
Forest by the road	Turf humus illuvial coarse soil	Spruce pine-berry-blackberry-green moss
Dumpster 1-1	Replantozem	Spruce
Dumpster 1-2	Replantozem	Mixed forest
Dumpster 1-3	Replantozem	Pine
Dumpster 1-4	Replantozem	Mixed forest
Dumpster 1-5	Replantozem	Leafy
Dumpster 1-6	Replantozem	Birch
Dumpster 2-1	Replantozem	Birch-spruce ash-grass-birch-vein-grass greengrass
Dumpster 2-2	Replantozem	Aspen woodland reedgrass
Dumpster 3-1	Replantozem	Birch birch-reedy-sphagnum-sphagnum green-moss
Dumpster 3-2	Replantozem	Aspen and birch and willow mixed herb-grass-grassland
Dumpster 4-1	Replantozem	Spruce reedgrass
Dumpster 4-2	Replantozem	Willow strawberry and strawberry moss
Dumpster 4-3	Replantozem	Spruce mother-beam greengrass
Dumpster 4-4	Replantozem	Spruce-birch-meadow-vein-vein-reedy greengrass
Dumpster 4-5	Replantozem	Birch birch chinewood greengrass
Dumpster 4-6	Replantozem	Spruce reedgrass-chinch
Dumpster 4-7	Replantozem	Willow chinensis
Dumpster 5-1	Replantozem	Willow-quiperea
Dumpster 5-2	Replantozem	Aspen wheatgrass
Dumpster 5-3	Replantozem	Pine-spruce corkscrew-vein-

Name of point	Soil	The plant community
		sphagnum
Dumpster 5-4	Replantozem	Spruce gum forest
Dumpster 5-5	Replantozem	Spruce grosbeak-willow-grassland
Dumpster 6-1	Replantozem	Pine grosbeak-green-moss pine
Dumpster 6-2	Replantozem	Spruce liverwort
Dumpster 6-3	Replantozem	Pine-spruce reedgrass-grass-birchgrass
Dumpster 6-4	Replantozem	Willow-birch-spruce-mother-beam-grass-peach-grass
Dumpster 6-5	Replantozem	Willow and birch and aspen, strawberry and green moss
The farm	Sod-podzolic	Grain-grass
Phosphogypsum 1	Replantozem	Aspen
Phosphogypsum 2	Replantozem	Pine
Phosphogypsum 3	Replantozem	Not available
Phosphogypsum 3-1	Replantozem	Not available
Phosphogypsum 3-2	Replantozem	Not available
Phosphogypsum 4	Replantozem	Aspen pike
Phosphogypsum 5	Replantozem	Not available
Phosphogypsum 6	Replantozem	Wormwood and quinoa
The tail 1	Replantozem	Willow nettle-grass
The tail 2	Replantozem	Birch pear and willow
The tail 3	Illuvial-humus gleyey sub-soil	Alder-willow -hemp
The tail 4	Replantozem	Birch pear and willow
The tail 5	Dernovo podbur	Willow-quiprene
The tail 6	Agrosoil alphegumus gley	Alderwort



## Annex 3. Description of soil transects according to GOST 17.4.4.02-2017.

1 Soil profile No. 1

2 Address: Leningrad Oblast, Kingisepp District, Bolshelutskoye rural settlement, reclaimed overburden rock pits.

3 General relief: top of overburden dump.

4 Micro-relief: rock debris.

5 Vegetation cover: birch-spruce ash-grass-birch-vein-grass green-moss community.

6 Site and its cultural condition: forest reserve lands, road protective strips.

7 Signs of waterlogging, salinity and other characteristic features are absent.

8 Soil and groundwater level uncovered.

9 Bedrock and bedrock: dolomites and limestone.

10 Soil name: Repantozem on the overburden.

Horizon and thickness, cm	Description of the section: mechanical composition, humidity, colouring, structure, density, new formations, inclusions, nature of the horizon transition and other features	Depth taken of samples, cm
W (0 – 8 cm)	light loam, moist, brownish grey, unstructured, loose, inclusion of organic residues	0 – 8 cm
R	dense rock: overburden rocks (limestone and dolomite of the Volkhov and Obukhov Formations)	-

1 Soil profile No. 2

2 Address: Leningrad Oblast, Kingisepp district, Bolshelutskoye rural settlement, farm.

3 General relief: river terrace.

4 Micro-relief: mounds.

5 Vegetation: grass-grass meadow.

6 Site and its cultural status: agricultural land, farming area.

7 No signs of waterlogging, salinity or other features.

8 Soil and groundwater level uncovered.

9 Bedrock and bedrock: Fluvioglacial deposits.

10 Soil name: sod-podzol soil, medium-powered, shallow-podzol light loam with poorly developed profile on fluviglacial sediments.

Horizon and thickness, cm	Description of the section: mechanical composition, humidity, colouring, structure, density, new formations, inclusions, nature of the horizon transition and other features	Depth taken of samples, cm
AY (0 – 12 cm)	light grey, light loamy, fine clay, fresh, with earthworm tracks, light mineral grains, inclusions of large roots and pebbles, clear transition	0 – 12 cm
EL (12 – 15 cm)	white, light loamy, flaky, fresh, light mineral grains, inclusions of roots and pebbles, gradual transition	-
BEL (15 – 17 cm)	light brown, light loamy, flaky, fresh, light mineral grains, inclusions of roots and pebbles, gradual transition	-
BT (17 – 28 cm)	brown, heavy loam, walnut-prismatic, fresh, with light mineral grains, inclusions of roots and pebbles, visible transition	17 – 28 cm
BC (over 28 cm)	grey, heavy loam, unstructured, fresh, with light mineral grains, inclusions of roots and pebbles	-

1 Soil profile No. 3

2 Address: Leningrad Region, Kingisepp District, Bolshelutskoye rural settlement, Pyatnitskiy Mokh bog.

3 General relief: depression on the river terrace.

4 Micro-relief: hummocks.

5 Vegetation: pine-herb-grass-sphagnum community.

6 Site and its cultural condition: forest lands, prohibited forest strips along water bodies.

7 Signs of waterlogging, salinity and other features: waterlogged.

8 Groundwater table: 9 cm.

9 Maternal and bedrock: peat.

10 Soil name: sphagnum oligotrophic peat soil.

Horizon and thickness, cm	Description of the section: mechanical composition, humidity, colouring, structure, density, new formations, inclusions, nature of the horizon transition and other features	Depth taken of samples, cm
TO (0 – 50 cm)	light brown, damp, consisting predominantly of sphagnum moss remains of varying degrees of decomposition, not exceeding 50%, gradual transition	0 – 50 cm
TT (over 50 cm)	brown, damp (underwater), consisting predominantly of sphagnum moss residues of varying degrees of decomposition, not exceeding 50%	-

1 Soil profile No. 4

2 Address: Leningrad Region, Kingisepp District, Bolshelutskoye rural settlement, forest area near the village of Pervomayskoye.

3 General relief: river terrace.

4 Microrelief: mounds.

5 Vegetation: alder-alder and meadow-alder community.

6 Site and its cultural condition: forest lands, exploitable forests.

7 Signs of waterlogging, salinity and other features: Initial signs of waterlogging.

8 Soil and groundwater level is undiscovered.

9 Bedrock and bedrock: Eluvial-deluvium limestone.

10 Soil name: Grey-humus medium-powered light loamy lithozem with undeveloped profile on limestone eluvium-deluvium

Horizon and thickness, cm	Description of the section: mechanical composition, humidity, colouring, structure, density, new formations, inclusions, nature of the horizon transition and other features	Depth taken of samples, cm
AY (0 – 18 cm)	brownish grey, light loamy, fine-cloddy, moist, light mineral grains, inclusions of roots, pebbles, boulders, rock debris, clear transition	0 – 18 cm
R (over 18 cm)	dense rock: sandstones of the Sablinsky Formation or limestones and dolomites of the Volkhov and Obukhov Formations	

1 Soil profile No. 5

2 Address: Leningrad Region, Kingisepp District, Bolshelutskoye rural settlement, forest area near the village of Pervomayskoye

3 General relief: river terrace.

4 Microrelief: mounds.

5 Vegetation: Alder-alder grass green-moss community.

6 Site and its cultural condition: forest lands, exploitable forests.

7 No signs of waterlogging, salinity and other features.

8 Soil and groundwater level is unexplored.

9 Bedrock and bedrock: Fluvioglacial deposits.

10 Soil name: soddy podbur typical thick sandy loam with medium-developed profile on fluvioglacial sediments

Horizon and thickness, cm	Description of the section: mechanical composition, humidity, colouring, structure, density, new formations, inclusions, nature of the horizon transition and other features	Depth taken of samples, cm
AY (0 – 27 cm)	dark grey, lightly loamy, fine clayey, moist, with earthworm tracks, light mineral grains, inclusions of large roots and pebbles, clear transition	0 – 20 cm
BHF (27 – 61 cm)	dark brown, fresh, sandy loam, unstructured, loose, inclusions of roots, stones, gradual transition	30 – 50 cm
BC (over 61 cm)	brown, fresh, sandy loam, unstructured, dense, inclusions of roots, stones	-

1 Soil profile No. 6

2 Address: Leningrad region, Kingisepp district, Bolshelutskoye rural settlement, production area of OOO Phosphorit.

3 General relief: river terrace.

4 Micro-relief: bumps, ruts from passage of large-size machinery.

5 Vegetation: willow willow-maple birch community.

6 Site and its cultural condition: industrial land, hazard class I enterprise location zone.

7 Signs of waterlogging, salinity and other features: Gleying spots in the profile indicate the presence of a gleying process.

8 Soil and groundwater level is uncovered.

9 Bedrock and bedrock: Fluvioglacial deposits.

10 Soil name: Agrozem alphegumus gleyey medium-podded deep gleyey light loamy with medium-developed profile on fluvioglacial sediments

Horizon and thickness, cm	Description of the section: mechanical composition, humidity, colouring, structure, density, new formations, inclusions, nature of the horizon transition and other features	Depth taken of samples, cm
P (0 – 34 cm)	black, loose, lumpy, moist, lightly loamy, visible transition	0 – 20 cm
BHF (34 – 57 cm)	brown-ochre, moist, sandy loam, unstructured, loose, inclusions of roots, stones, eclipses of dark spots, visible transition	35 – 55 cm
G (57 – 65 cm)	bluish colour when the horizon is detected, turns brown when exposed to air, heavy loam, damp, structureless, weakly porous	57 – 65 cm

1 Soil profile No. 7

2 Address: Leningrad Oblast, Kingisepp district, Bolshelutskoye rural settlement, forest fund lands.

3 General relief: river terrace.

4 Micro-relief: mounds.

5 Vegetation: alder-alderwort-vein-grassland.

6 Site and its cultural condition: forest reserve lands, forbidden strips of forests located along water bodies.

7 Signs of waterlogging, salinity and other features: Signs of gleying.

8 Soil and groundwater level uncovered.

9 Bedrock and bedrock: Fluvioglacial deposits.

10 Soil name: humus-gleyey soil, surface gleyey medium-loam with medium-developed profile on fluvioglacial sediments.

Horizon and thickness, cm	Description of the section: mechanical composition, humidity, colouring, structure, density, new formations, inclusions, nature of the horizon transition and other features	Depth taken of samples, cm
H (0 – 43 cm)	dark brown, medium loamy, damp, unstructured, weakly porous, visible transition	0 – 20 cm
G (43 – 60 cm)	blue when the horizon is detected, turns brown when exposed to air, clay, damp, structureless, weakly porous, gradual transition	45 – 60 cm
CG (over 60 cm)	grey, clayey, damp, unstructured, dense, stains of gleying	-