

САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

**Шайтанов Антон Владимирович**

**Интегральная оценка и динамика загрязнения ландшафта в зоне воздействия  
железорудного предприятия**

Магистерская диссертация

«К ЗАЩИТЕ»

Научный руководитель:  
к.г.н., доц. О. В. Сенькин

\_\_\_\_\_2016  
«\_\_\_»\_\_\_\_\_

Заведующий кафедрой:  
д-р биол. наук,  
проф. В. Н. Мовчан

\_\_\_\_\_2016  
«\_\_\_»\_\_\_\_\_

Санкт-Петербург  
2016

## Оглавление

Введение .....	3
<b>1. Обзор литературного материала .....</b>	<b>6</b>
<b>2. Краткая природная характеристика объекта исследования .....</b>	<b>9</b>
2.1. Физико-географический очерк .....	9
2.1.1. Климат .....	9
2.1.2. Рельеф .....	9
2.1.3. Поверхностные воды .....	10
2.1.4. Промышленно-экономическая характеристика района .....	10
2.1.5. Растительность .....	11
2.1.6. Животный мир .....	11
2.1.7. Экологические проблемы в железорудном горном производстве .....	11
2.2. Геологическое описание района .....	14
2.2.1. Геологическое строение .....	14
2.2.2. Минералогическое описание руд .....	14
2.2.3. Геохимическое описание руд .....	15
2.2.4. Подземные воды .....	16
2.3. Почвы .....	18
<b>3. Методики исследования объекта .....</b>	<b>20</b>
3.1. Методики отбора и анализа проб в лаборатории .....	20
3.1.1. Методика отбора и анализа проб минерального (нижнего) горизонта почв .....	23
3.1.2. Методика отбора и анализа проб органогенного (верхнего) слоя горизонта почв .....	24
3.1.3. Методика отбора и анализа проб мхов .....	25
3.1.4. Методика отбора и анализа поверхностных вод .....	26
3.1.5. Методика отбора и анализа донных отложений водотоков .....	26
3.2. Методика математической обработки и картографического представления данных .....	27
3.2.1. Методика определения фоновых и аномальных значений концентраций .....	27
3.2.2. Расчёт коэффициента концентрации, коэффициента ПДК и мультипликативного коэффициента .....	29
3.2.3. Методика интегральной оценка загрязнения .....	31
3.2.4. Методика оценки пространственно-временной динамики уровня загрязнения органогенного горизонта почв .....	35
<b>4. Результаты исследования .....</b>	<b>39</b>
4.1. Результаты оценки загрязнения территории по коэффициенту концентрации .....	39

4.2. Результаты расчёт коэффициента радиальной миграции .....	46
4.3. Результаты факторного анализа .....	46
4.4. Результаты интегральной оценки загрязнения ландшафта .....	49
4.3. Результаты пространственно-временной динамики загрязнения в органогенном горизонте почв (O).....	55
<b>5. Обсуждение результатов исследования .....</b>	<b>59</b>
5.1. Источники поступления поллютантов в аномальные зоны.....	59
5.2. Мероприятия по снижению экологических рисков для населения, рекомендованные предприятию.....	60
<b>Заключение .....</b>	<b>62</b>
Литература .....	63
Приложения .....	65

## Введение

Накопление на территории РФ значительного по массе и объёму количества отходов требует исследования и научного обоснования влияния отходов на окружающую среду.

По данным департамента пресс-службы и информации Счётной палаты РФ общий объём отходов в России составляет порядка 90 млрд. тонн. Из них 91% или 81 млрд. тонн образован при добычи полезных ископаемых и ежегодно увеличивается на 4,5 млрд. тонн (<http://www.interfax.ru/russia/357470>). По оценкам автора на исследуемом предприятии за всё время его функционирования размещено около 500 млн. т. отходов. Расчет массы складированных предприятием отходов произведен по общей формуле:

$$m = \rho * V = \rho * S * H, \quad (1)$$

где

$\rho$  – ориентировочная плотность горных пород, вмещающих руду;

$S$  – площадь, занимаемая отходами;

$H$  – высота отвалов или средняя глубина озера-хвостохранилища (в зависимости от вида отхода).

Настоящие исследования проводились в районе техногенного воздействия железорудного предприятия на площади 230 км<sup>2</sup>, включая территории, примыкающие к карьерам, хвостохранилищу и горно-обогатительному комбинату (ГОК). Отходы железорудного производства содержат в себе экологически опасные для биоты и человека вещества (тяжёлые металлы и макроэлементы в повышенных концентрациях), через воздушную и водную среду распространяются по прилегающей к производству территории. Для контроля загрязнения территории требуется комплексная оценка параметров загрязнения.

Обычно комплексной оценкой служат индексы (показатели) загрязнения отдельных компонентов ландшафта (суммарный показатель загрязнения почв, индекс загрязнения атмосферы и другие) (Опекунов, Опекунова, 2014).

Основной целью работы является определение (тестирование) интегрального показателя загрязнения ландшафта и расчёт пространственно-временных тенденций изменения уровня загрязнения.

Для достижения поставленной цели были определены следующие задачи:

- обзор литературных и фондовых источников;
- отбор и анализ в лаборатории проб с исследуемой нарушенной и фоновой территории;

- математическая обработка данных пробоотбора;
- эколого-геохимическая оценка состояния мхов, органического и минерального горизонта, поверхностных вод, донных осадков;
- создание картографических материалов;

Интегральный показатель загрязнения разработан на основе оптимизации процедуры сравнения содержания химических веществ в разных компонентах природно-территориальных комплексов (ПТК). Таким образом, он суммирует в себе информацию о загрязнении во всех компонентах ПТК. Показатель создан из-за необходимости унификации способов обработки результатов локального мониторинга, который в настоящее время, в определенной мере, интегрируется в сеть государственного мониторинга состояния окружающей среды (Опекунов, Опекунова, 2014).

Метод интегральной оценки на основе функции желательности Харрингтона, опробованный в настоящих исследованиях, является инновационным. Функция Харрингтона обладает свойствами непрерывности, монотонности и гладкости. Эти свойства необходимы для свертки разнородной информации. Проведя сравнительный анализ существующих методик комплексной оценки загрязнения, нужно отметить, что интегральная оценка на основе функции желательности отличается простотой: свёртка данных происходит в три этапа. В методике не применяется балльная система оценки, поэтому для расчёта интегрального показателя исследователи могут использовать то количество природных сред, которое позволяют ресурсы. При этом им не нужно волноваться об адаптации балльной шкалы к характеристике состояния ландшафта при изменении числа природных сред. Количество компонентов среды не является фиксированным.

Автор работы принимал непосредственное участие в отборе в соответствии с методиками проб наземных мхов, органического горизонта почв (О), минерального почвенного горизонта (ВНФ / ВФ / С). Отбор проб проводился в рамках работ по мониторингу окружающей среды в соответствии с «Программа мониторинга...». В качестве фоновой территории была выбрана особо охраняемая природная территория (заповедник), потому что она соответствует требованиям, предъявляемым к условно-фоновой территории для эколого-геохимических исследований:

1. Находится в региональной близости (на расстоянии 25-30 км) от исследуемого источника антропогенного воздействия, и при этом не попадает в зону прямого воздействия.

2. Имеет сходное геологическое строение. Дочетвертичные отложения представлены породами верхнеархейского возраста. Горные породы четвертичного возраста представлены валунно-галечной мореной и ледниково-озерными отложениями.
3. Имеет сходное геоморфологическое строение – всхолмленная равнина.
4. Характеризуется отсутствием геохимических аномалий в исследуемых природных средах, что подтверждается геохимическими и биоиндикационными исследованиями (Отчет по научно-исследовательской практике..., 2015).

Отбор проб проводился в рамках научно-исследовательской практики СПбГУ на станции интегрированного мониторинга Государственного заповедника. Химический анализ всех проб проводился в сертифицированных лабораториях.

На основании договора между автором и сотрудниками ГГУП «Минерал», данные о количественном составе проб, представляющие коммерческую тайну предприятия, и координаты местоположения объектов не подлежат публичной огласке. Географические названия объектов в тексте работы намеренно не упомянуты или заменены на «\*\*\*».

В приложении 1 и 2 научным руководителем и рецензентом предоставлена экспертная оценка работы.

Если Вы заметили ошибку в работе, у Вас есть предложения, пожелания по улучшению, Вы хотите обсудить работу или проблематику исследования, пожалуйста, напишите автору на электронный адрес: [napetre@mail.ru](mailto:napetre@mail.ru) (Шайтанов Антон Владимирович).

# 1. Обзор литературного материала

Анализ литературных данных выявил источники попадания веществ в окружающую среду в технологическом цикле производства (Программа мониторинга, 2012).

В состав железорудного предприятия входит добыча железной руды открытым способом (карьеры) и обогащение железной руды (обоганительная фабрика).

Рассмотрим подробнее следующие стадии производства.

## 1). **Карьерная отработка месторождения.**

Горнорудная разработка месторождений железистых кварцитов осуществляется открытым способом с помощью буровзрывных работ. При производстве массовых взрывов в атмосферу выделяется пыль, содержащая тяжёлые металлы, оксид углерода, оксид азота. Взрывные работы относятся к залповым выбросам.

Кроме собственно карьера, источниками воздействия на приземный слой атмосферы, а также ландшафт являются горно-транспортное оборудование и перегрузочный пункт со складом руды. При работе автомобильного транспорта и карьерной техники, использующих дизельное топливо, в атмосферу выбрасываются выхлопные газы, содержащие более 200 веществ, в том числе в значительном количестве оксид углерода, оксиды азота, диоксид серы, углеводороды (пары керосина и сажа), соединения тяжёлых металлов.

В течение всего периода отработки карьера его карьерные (рудничные) воды сбрасываются в хвостохранилище без использования очистных сооружений через искусственный канал, прорытый вдоль юго-западного берега хвостохранилища. Через этот же канал также частично отводятся подотвальные воды (Рис. 1). Суммарное поступление сточных вод, сбрасываемых в хвостохранилище, достигает 20 млн. м<sup>3</sup>/год. При отработке карьера и развитии его инфраструктур происходит изменение уровня режима и химического состава подземных вод.

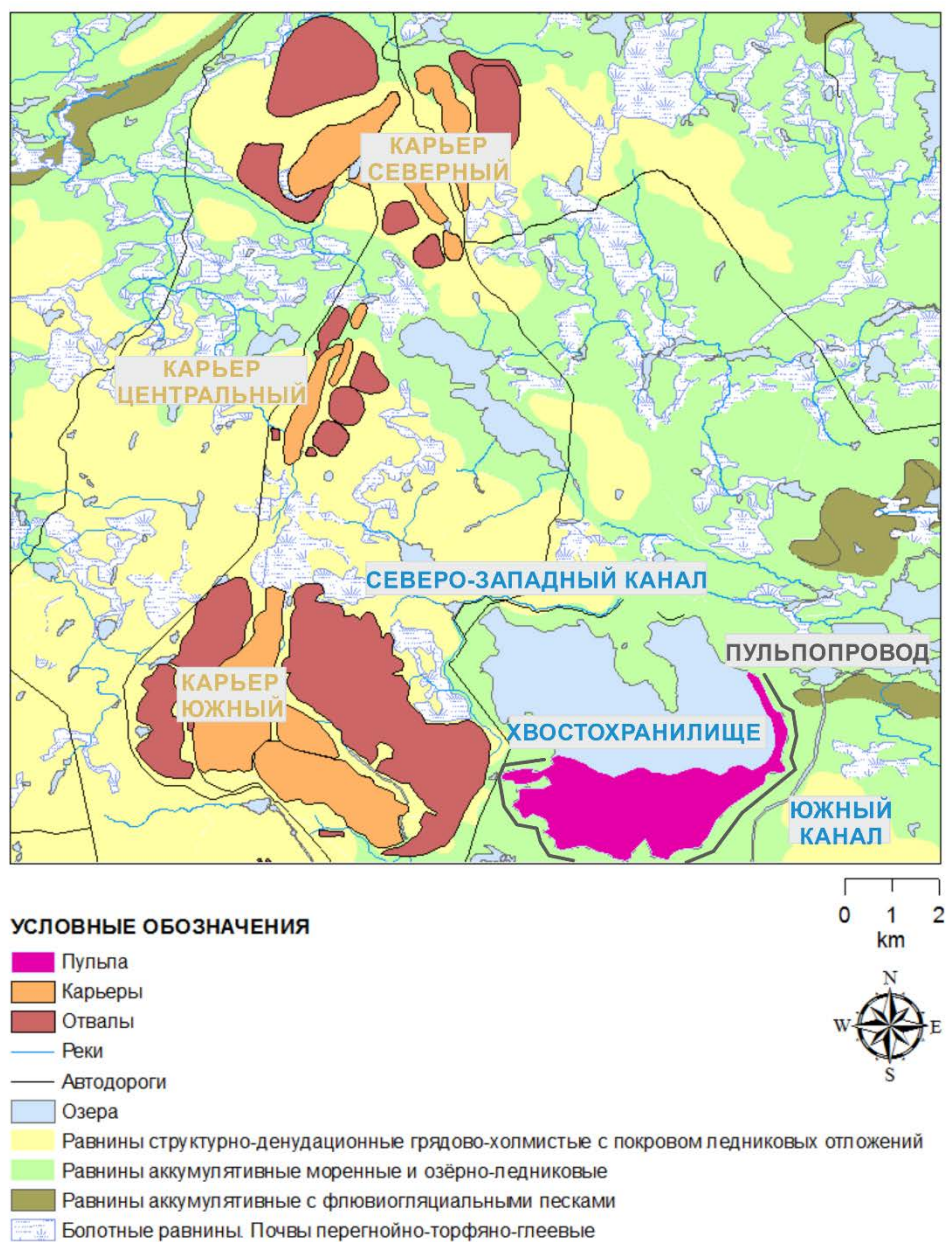


Рис. 1. Расположение объектов производства и генетическая классификация рельефа.

## 2). Отвалы промышленного производства.

Кроме сравнительно чистых по примесям железистых кварцитов, основными рудными минералами, накапливающимися в производственных отвалах, являются сульфиды железа: пирротин и пирит. В них также постоянно присутствует халькопирит и продукты его окисления, а в изоморфных замещениях и минералах-примесях присутствует повышенное содержание никеля, цинка, меди, кобальта, мышьяка, сурьмы, таллия и ряда других токсичных элементов (Табл. 1).



Табл. 1. Минеральный и химический состав отходов производства. Жирным шрифтом выделены основные поллютанты.

Минералы, содержащиеся в руде	Минералы вмещающих пород
<ul style="list-style-type: none"> <li>• магнетит (<b>Fe</b>3O4)</li> <li>• кварц (SiO2)</li> <li>• амфиболы ((Ca, Mg, <b>Fe</b>)7(Si4O11)2(OH)2)</li> <li>• гематит (Fe2O3)</li> <li>• сульфиды (<b>S</b>2-)</li> <li>• сидерит (<b>Fe</b>CO3)</li> <li>• примеси: сотые доли % <b>Mn, Ni, Ti</b>, тысячные - V, Co, <b>Cd, Cu, Zn, Pb</b>, а также <b>As</b></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• биотит (K(Mg, <b>Fe</b>)3[Si3AlO10][OH,F]2)</li> <li>• серицит (KAl2(Si3Al)O10(OH)2)</li> <li>• кальцит (CaCO3)</li> <li>• графит (C)</li> <li>• тальк (Mg3Si4O10(OH)2)</li> <li>• <b>примеси различного состава</b></li> </ul>

Химический состав распространённых на территории горных пород, накапливаемых в отходах производства, подтверждает происхождение поллютантов.

Окисление серы резко усиливает химическую активность среды в производственных отвалах. Из пылящих отвалов вскрышных пород элементы попадают в атмосферу. Из атмосферы с разложившейся растительностью, дождевой водой, путем осаждения пыли под действием гравитации поллютанты накапливаются в почве.

### 3). Хвосты промышленного производства и хвостохранилище.

На стадии обогащения руды образуются хвосты магнитной сепарации (15 млн. тонн в год), которые направляются в хвостохранилище. Хвосты представляют собой твердые отходы обогащения железных руд (измельченную породу). В их гранулометрическом составе преобладает пылеватая фракция (0.05 мм- 27%; <0.05 мм – 46,2%). Хвостохранилище спроектировано с полным оборотом воды на дробильно-обогатительную фабрику (далее - ДОФ). Пульпа (вода, насыщенная частицами дробленой породы в отношении 26:1), поступает в водоем в объеме 375 млн.м3/год. Пульпопровод проходит вдоль южного и восточного берега хвостохранилища. После отстаивания в течение 3-8 дней осветленная вода закачивается в бак оборотной воды, откуда направляется на различные участки ДОФ для повторного использования в технологическом процессе. Обратная система является замкнутой. В балансе фабрики количество забираемой из хвостохранилища оборотной воды равно количеству сброшенной воды с хвостами.

В настоящее время уровень воды в хвостохранилище достиг критической отметки, в связи с чем Институтом водных проблем Севера КНЦ РАН разработан «Режим регулируемого сброса вод хвостохранилища в систему озёр \*\*\* с обеспечением

минимального экологического ущерба водной системе, для исключения переполнения хвостохранилища и прорыва плотины». Для снижения критической отметки уровня воды в хвостохранилище с 1994 года в период весеннего паводка начат регулируемый сброс воды в обводный канал и озеро \*\*\* (Цветкова, 1994).

В водах хвостохранилища особенно высокой является концентрация калия - до 150 мг/л, который содержится в биотите. Содержание сульфидов (в основном пирита) в хвостах увеличивает агрессивность вод.

## **2. Краткая природная характеристика объекта исследования**

### **2.1. Физико-географический очерк**

Объект исследования расположен в таежной зоне.

#### **2.1.1. Климат**

Район расположен в секторе умеренно-континентального климатического пояса, характеризующемся умеренно теплым летом, холодной зимой и большим количеством осадков. Температура воздуха зимой (ноябрь-март) – -4-18°C (минимальная до -45°C), летом (июнь-август) – +16-18°C (редко до 32°C). Лето прохладное, преимущественно с дождливой и пасмурной погодой (до 54 пасмурных и дождливых дней за сезон), в любой летний месяц возможны заморозки до -6°C. Осень (сентябрь-октябрь) умеренно-холодная, дождливая с туманами. По данным многолетних наблюдений на трех ближайших к объекту метеостанциях среднегодовое количество осадков составляет 500 мм, а с учетом ветровой поправки 650 мм, максимум приходится на летние и осенние месяцы. Устойчивый снежный покров формируется в конце октября – начале ноября, разрушается в мае, распутица длится до начала июня. Число дней со снежным покровом около 175. Мощность снежного покрова составляет 70-80 см. Реки и озера замерзают в конце октября, вскрываются в конце апреля – середине мая. Болота к концу зимы промерзают до 30 см (Программа мониторинга..., 2016).

#### **2.1.2. Рельеф**

Территория железорудного района находится на возвышенности, на водоразделе четырех озерно-речных систем. Это холмистая равнина, рельеф которой характеризуется чередованием грядовых возвышенностей денудационно-тектонического генезиса и разделяющих их удлиненных пологих депрессий. Возвышенности представляют собой пенемены (возвышенность, сформированная на месте древних гор) ледникового типа, а депрессии – моренные и флювиогляциальные аккумулятивные равнины (Рис.1).

Возвышенности ориентированы преимущественно в северо-западном и северном направлениях. Вершины холмов слабовыпуклые или плоские, но в ряде случаев высота грядовых холмов достигает почти 280 м. Наиболее низкие отметки (150-175м) приурочены к урезам воды в руслах рек и ручьев. Относительное повышение водоразделов над тальвегами долин достигает 120 м (Программа мониторинга..., 2012).

### **2.1.3. Поверхностные воды**

Район характеризуется густой озерно-речной сетью. Наиболее крупным на исследуемой территории является озеро, занятое под хвостохранилище и до 1978 г. находившееся в естественном состоянии. Его водосборная площадь составляла 151 км<sup>2</sup>, площадь акватории – 5,4 км<sup>2</sup>, объем – 17 млн. м<sup>3</sup>. В водоем впадало ряд рек и ручьев. В 1979 г. впадающие в озеро ручьи и реки были перекрыты дамбами и плотинами. По системе каналов (южный и северо-западный каналы) их сток был отведен в озера. За счет отсечения бассейнов основных притоков водосборная площадь хвостохранилища уменьшилась до 63,2 км<sup>2</sup>.

В результате строительства на водосборе озера ограждающих дамб и насыпных плотин образовался накопитель хвостов замкнутого контура, который является специальным гидротехническим сооружением II класса (ГТС). На площади развито также большое количество мелких озер (ламбин). Реки и ручьи преимущественно мелкие с топкими, болотистыми, кочковатыми берегами. Короткие протоки соединяют многочисленные озера. Ширина рек 3-10 м, глубина на плесах 1.5-3 м, на перекатах 0.3-1.0 м, дно каменистое или песчаное, на заболоченных участках – илистое.

Берега озер низкие песчано-галечниковые или заболоченные. Значительные площади заняты болотами. Болота травянисто-моховые с кочками высотой до 0.4 м, преобладающая мощность торфа - 0.5-1.5 м (до 10 м).

### **2.1.4. Промышленно-экономическая характеристика района**

Основным направлением деятельности предприятия являются добыча и переработка железистых кварцитов в высококачественное сырье для металлургической промышленности – железорудные окатыши. В состав хозяйственных объектов предприятия входят три карьера (Северный, Центральный, Южный), промышленная площадка (далее - промплощадка) горно-обогачительного комбината (далее - ГОК), хвостохранилище. ГОК находится за пределами территории исследования, в 2 километрах на юг от Южного карьера. В 12 км от ГОКа располагается третий по величине в регионе город с населением 30 тыс. человек, железнодорожная станция и аэропорт для местных перевозок. Автомобильным шоссе город связан с региональным центром. Грунтовой дорогой с

автобусным сообщением город связан с поселками и районным центром. Кроме шоссейных и грунтовых дорог имеются лесовозные дороги (Программа мониторинга..., 2016).

### **2.1.5. Растительность**

Около 60% территории покрыто лесами. Основными лесобразующими породами являются сосна и ель.

Лишайниковые типы леса формируются в наиболее сухих местообитаниях. Зеленомошные леса занимают наибольшую площадь. Это сосняки воронично-черничные и воронично-брусничные. Для них характерно присутствие субарктических кустарничков - голубики, вороники и багульника.

В связи с бедностью почв в заповеднике преобладают разреженные сосняки (*Pinus sylvestris* L.), составляющие около 80% лесов, значительно менее распространены ельники (*Picea abies* L., *Picea fennica* Regel, *Picea obovata* Ledeb) – около 10%, и совсем немного березняков (*Betula pubescens* Ehrh) и осинников (*Populus tremula* L.).

Из мхов обычны зеленые мхи из родов *Pleurozium* и *Hylacomium*.

В целом леса заповедника невысокие, характеризуются низкой полнотой, узкой и редкой кроной, слабо развитым подростом и подлеском, высокой пожарной опасностью. Здесь можно встретить как молодые, так и старые леса возрастом от 300 до 320 лет (Отчет по научно-исследовательской практике..., 2015).

### **2.1.6. Животный мир**

На территории объекта встречаются хищники: лесная куница, горноста́й, ласка, американская норка, выдра, волк, лисица, бурый медведь, рысь, россомаха; грызуны: белка, летяга, ондатра, полевки (водяная, рыжая, темная) и канадский бобр.

Лось малочислен. Особый интерес среди прочих животных представляет дикий северный лесной олень.

В фауне кровососущих членистоногих выявлено 22 вида гамазовых клещей, 6 видов мокрецов, 8 видов комаров, 9 видов мошек и 9 видов слепней (Отчет по научно-исследовательской практике..., 2016).

### **2.1.7. Экологические проблемы в железорудном горном производстве**

Наиболее мощным источником воздействия на все природные системы являются разрабатываемый Южный карьер и его отвалы, и хвостохранилище емкостью 410 млн. м<sup>3</sup>, введенное в эксплуатацию в 1982 году.

#### **Загрязнение воздуха.**

В пределах земельного отвода предприятия сосредоточено большое количество стационарных источников выбросов в атмосферу. Валовой объем выбросов за последние

годы составляет несколько более 40 тыс. тонн/год, из которых порядка 30 тыс. тонн приходится на сернистый ангидрид.

Единичные кратковременные превышения содержания  $\text{SO}_4^{2-}$  и пыли регистрируются регулярно в районе промплощадки. Годовые выбросы пыли с 1987 г. по 2010 г., полученные расчетным путем, свидетельствуют о постепенной тенденции к снижению с 30-70 тыс.т (1987-1997 г.г.) до 30-40 тыс.т (1998-2010 г.г.). В составе пыли преобладает  $\text{SO}_2$  с постепенным уменьшением с 50-60 тыс.т (1987-1996 г.г.) до 32-40 тыс.т (2002-2010 г.г.). Проведенными в 2012 году измерениями загрязняющих веществ в воздухе отмечено повышенное, по сравнению с фоновым для территории, содержание  $\text{SO}_2$  в 15 км к северу от промплощадки, не превышающее, однако значения максимально- разовой ПДК. Тогда же было зафиксировано содержание пыли в районе карьера, превышающее среднесуточную ПДК в 1.6 раза.

#### **Загрязнение снегового покрова.**

По материалам мониторинга 1999-2002 г.г. установлено, что на исследованной территории увеличилась минерализация снеговой воды. Это связано с возрастанием по сравнению с 1985 г. содержания Са, нитратов и гидрокарбонат-иона и обусловило заметное понижение кислотности снежного покрова. Близкие к фоновым значения рН (4-5) сохранились лишь на небольшом участке к северу от хвостохранилища. Основная часть территории характеризуется значениями рН 5.5-6.5, что выше фоновых показателей. Зона умеренного загрязнения серой (2-4 мг/л) наблюдалась в радиусе 1-2 км от промплощадки. На этой территории установлено увеличение растворимых форм Zn, Mn, Ni в 1.5-4 раза.

Нерастворимые формы тяжелых металлов (Fe, Zn, Mn, Cu) выпадают в непосредственной близости от фабрики. По мере удаления от источника загрязнения происходит изменение соотношения форм нахождения: увеличивается доля растворимых форм элементов (особенно это заметно для Zn и Ni) в общем загрязнении снежного покрова.

#### **Загрязнение поверхностных вод.**

Все техногенные воды имеют высокую минерализацию и относятся к сульфатному классу. В воде хвостохранилища преобладает К (50 %-экв.), в фильтрационной – Са (41 %-экв.) и К (36 %-экв.), в рудничной – Са (48 %-экв.). Фильтрационная вода из-под отвалов относится к Mg классу с кислой реакцией (рН=4.66). Это обусловлено активным окислением сульфидов в отвалах до  $\text{H}_2\text{SO}_4$ . Вода северо-западного канала близка по соотношению ионов к водам с отвалов, а южного канала – к фильтрационным водам из хвостохранилища. За счёт разбавления абсолютные концентрации веществ в каналах в 6-15 раз ниже, чем в их источниках формирования. Одной из главных особенностей техногенных вод является очень высокое содержание азотистых веществ (от 10 до 66 мг Нобщ./л ).

Меньше всего азотистых веществ, Li, Mn и K отмечается в фильтрационной воде из хвостохранилища. В воде из-под отвалов выявлена очень высокая минерализация (до 4г/л), а содержание Ni достигает 2.9 мг/л. Вода здесь имеет кислый характер и относится к сульфатно-магниевому типу.

Основное влияние на систему рек оказывают попуски воды из хвостохранилища. Загрязнение воды озёр по общероссийским ПДК оценивается как «условно чистые», а по региональному фоновому уровню – верхние озера системы (в южной части района исследования) относятся к «грязным», а нижние (северная часть района исследования) - к «умеренно грязным» и «условно чистым».

Гидрохимическое опробование водных объектов вблизи Центрального карьера показало, что состав вод рек соответствует природным фоновым величинам. Наибольшее загрязнение обусловлено влиянием стока с отвалов вскрышных пород Центрального карьера.

#### **Загрязнение почвенного покрова.**

По результатам мониторинга 1999-2002 годов (Отчет по мониторингу, 2009) содержание серы в лесной подстилке значительно превышает фоновое, особенно вокруг промплощадки и к югу от нее. Превышение фоновых значений железа в почвах отмечено в большинстве точек наблюдений (в 1.5- 59 раз). Максимальное повышение содержания железа относительно фона наблюдалось к югу и вокруг промплощадки, а также на севере хвостохранилища.

По данным мониторинга 1999 - 2002 г.г. превышение предельно допустимых концентраций свинца в почвах до 44 мг/кг были локализованы вокруг хвостохранилища, автодорог, на берегу озёр. Отмечено проникновение этого элемента в глубокие горизонты почвы сквозь нарушенную лесную подстилку. Концентрации Co, Ni, Cr, хотя и не достигали ПДК, но повсюду превышали фоновые концентрации территории. Информация по опробованию в 2008 г. органического горизонта почв ограничена только статистическими параметрами (Пантелеева, 2009). Этими данными подтверждается интенсивное загрязнение почв железом, марганцем, никелем, медью, свинцом, но первичные материалы опробования не сохранились.

## **2.2. Геологическое описание района**

### **2.2.1. Геологическое строение**

На территории представлены коренные породы верхнеархейского возраста, обнажающиеся на вершинах холмов.

Четвертичные отложения характеризуются изменчивой мощностью (0-30 м, в среднем - 8 м) и представлены преимущественно валунными песками и супесями на положительных формах рельефа, а в депрессиях - песками и глинами озерно-ледникового происхождения. В основании разреза четвертичных отложений нередко залегает валунно-галечная морена (Программа мониторинга..., 2012).

В Главе 2.3 дается подробное описание верхней части разреза четвертичных отложений (0 – 1 м).

Железородное месторождение находится в центральной части рудного поля и приурочено к западному и южному крыльям асимметричной синформы IV порядка. (Рис.2).

Месторождение представляют собой серию рудных линз, согласно залегающих среди сланцев (кварц-амфиболовых, биотитовых, тальк-хлоритовых) и кварцитов в ассоциации с покровами кислых эффузивов (плагиопорфиров) и метаморфизованных мафит-ультрамафитов. Рудные тела прослеживаются по простиранию на 10-12 км при мощности от нескольких см до 350 м и значительной протяженности на глубину (Программа мониторинга..., 2012).

### **2.2.2. Минералогическое описание руд**

Кварц-биотитовые и биотит-кварцевые ритмично-слоистые сланцы гимольской серии и ассоциирующие с ними метавулканы контоксской серии, также содержащие линзы магнетитовых кварцитов, обычно мигматизированы и распространены практически по всей территории исследуемого участка (Рис.2). Руды месторождений относятся к единому типу магнетитовых кварцитов осадочно- метаморфического генезиса.

Руды Южного месторождения образовались на зеленосланцевой стадии метаморфизма с незначительным переходом к амфиболитовой. Выделены четыре разновидности руд: щелочноамфиболовые (рибекитовые, актинолитовые, кросситовые с эгирином, биотитом, карбонатом); биотитовые (грюнерит-биотитовые, карбонат-биотитовые, рибекит-биотитовые); грюнеритовые (биотит-грюнеритовые, карбонат-биотит-грюнеритовые); двуамфиболовые (роговообманково-грюнеритовые с биотитом и карбонатом).

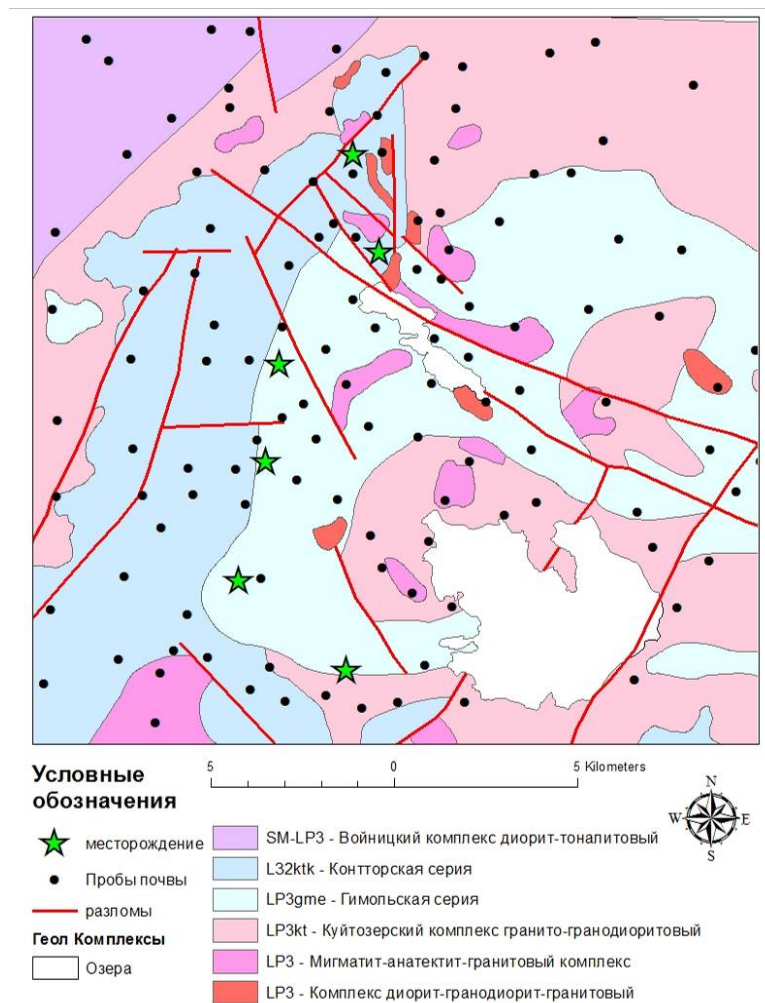


Рис. 2. Геологическая схема с точками опробования почвы.

Руды Центрального месторождения образовались на амфиболитовой стадии метаморфизма. Состав руд преимущественно амфибол-магнетитовый с разновидностями: кроссит-магнетитовые, арфведсонит (рибекит)-магнетитовые, эгирин-магнетитовые и роговообманково-магнетитовые кварциты, в меньшей степени развиты биотит-магнетитовые руды с разновидностями: грюнерит-биотит-магнетитовые, роговообманково-биотит-магнетитовые и карбонат-эпидот-биотит-магнетитовые, кварциты.

Главными минералами руд являются магнетит, кварц, амфиболы, второстепенными — гематит, сульфиды, сидерит.

### 2.2.3. Геохимическое описание руд

Содержание железа общего в рудах в среднем составляет 31-32%, железа магнетитового – 26.5%. По содержанию железа магнетитового руды делятся на бедные (10-17%), рядовые (17-35%) и богатые (>35%). Доля рядовых руд в балансовых запасах месторождения около 92%. Среди полезных примесей, повышающих качество чугуна и стали, в руде присутствуют Ni, Co, Mn, V, среди вредных, понижающих качество и



эффективность производства чугуна и стали, — S, F, Zn, Pb, As, Cu. При этом руды являются достаточно чистыми по содержанию вредных примесей фосфора (0,07%), полиметаллов Cu, Zn, Pb (тысячные доли процента), редко отмечается Zn в сотых долях процента. Содержание легирующих металлов относительно повышенное: сотые доли % Mn, Ni, Ti, тысячные - V, Co. На глубоких горизонтах отмечен Nb - 0,0015%.

Руды относятся к классу легкообогатимых, извлечение железа из руд производится в слабом магнитном поле.

Руды содержат примерно одинаковое количество серы (0,2-0,35%). Содержание серы и сульфидов соответственно растет с уменьшением содержания рудного железа в рудах: возрастает от богатых (0,03%), рядовых (0,2-0,3%) к бедным (0,4-0,9%) и в безрудных магнетитсодержащих грюнерито-биотитовых кварцитах достигает – 1-2%.

Содержание серы (до 7% и более) резко возрастает в разнообразных породах, включенных среди железистых кварцитов и подстилающих рудную толщу. Эти породы представлены слюдистыми (биотит, серицит) сланцами с карбонатом и/или графитом, а также тальк содержащими разностями. В результате метаморфизма миграция и перераспределение серы привели к образованию в продуктивной толще обогащенных сульфидами прожилково-вкрапленных зон вплоть до образования жил сплошной сульфидной руды мощностью до 10 м.

После изучения аншлифов руд в пирротине обнаружены включения пирита (до 8%), пентландита (1,5%), арсенопирита (0,5), халькопирита, кубанита, пентландита, сфалерита и галенита (по 0,25-0,5%). Все эти минералы образуют повышенный фон определенного спектра химических элементов (Pb, Zn, Cu, As, Ni и др.) в продуктах переработки сырья.

#### **2.2.4. Подземные воды**

Гидрогеологические условия рассматриваемой территории характеризуются широким распространением подземных вод, приуроченных, как к четвертичным отложениям (грунтовые воды), так и к трещиноватой зоне кристаллических пород. По условиям залегания и характеру циркуляции подземных вод выделяются два комплекса:

- поровые и порово-пластовые грунтовые воды четвертичных отложений;
- трещинные и трещинно-жильные воды кристаллических пород верхнего архея.

Оба водоносных комплекса связаны между собой и образуют, как правило, общее зеркало подземных вод. Питание подземных вод осуществляется за счет атмосферных осадков, дренаж происходит в озера, реки, болота и карьеры. Химический состав подземных вод близок к составу поверхностных, что обусловлено их тесной гидравлической взаимосвязью.

Основной водоносный горизонт, приуроченный к трещиноватой зоне кристаллического массива, характеризуется в естественном состоянии высоким содержанием ряда компонентов (железо, марганец и др.). Тесная гидравлическая связь поверхностных и подземных вод способствует распространению загрязняющих веществ, связанных с проведением горных, взрывных и обогатительных работ. За время разработки месторождения произошли значительные изменения в химическом составе природных вод в районе Южного месторождения. Для подземных вод центральной части карьера характерна повышенная, относительно первоначальной, минерализация, в частности присутствие большого количества железа, аммонийного азота и сульфатов. Природный состав подземных вод изменился: из гидрокарбонатного класса подземные воды перешли в сульфатный. В центральной части карьера концентрации сульфат - иона часто превышали ПДК по  $SO_4^{2-}$  как для питьевой воды, так и для рыбохозяйственных водоемов. В пробах воды, отобранных в 1973 – 1974 г.г. (до эксплуатации месторождения), концентрации этих химических элементов не превышали ПДК, за исключением двух проб, содержащих 10 мг/л общего железа (Программа мониторинга..., 2012).

Химический состав подземных вод в пробах, отобранных из наблюдательных и разведочных скважин, полностью идентичен химическому составу подземных вод, выходящих в бортах карьера родников (источников) и откачиваемых и сбрасываемых в водотоки дренажных вод.

Для наблюдения за динамикой и качеством подземных вод в 1999-2002 г.г. использовались 17 буровых скважин. Уровень подземных вод в районе карьеров постоянно снижается в связи с откачкой больших объемов воды. На режим подземных вод влияют, как сезонные климатические факторы, так и антропогенное вмешательство, в том числе, производство горных работ. В результате ранее проведённых режимных наблюдений выявлено незначительное понижение уровня подземных вод за время эксплуатации месторождения: в северной части карьера - на 1,2 м., в центральной части - на 3,5 - 4,0 м. Увеличение количества откачиваемой воды привело к изменению гидродинамической обстановки не только в карьере, но и на прилегающей территории. По результатам проведённых режимных наблюдений можно сделать вывод, что уровни подземных вод, в связи с углублением карьеров и отработкой рудных тел, откачкой и сбросом дренажных вод снижаются в прибортовой зоне карьеров с интенсивностью не более 1 - 2 м в год. Зона влияния карьерного водоотлива (депрессионная воронка), по оценке различных исследователей, не превышает 1 км, то есть находится практически в пределах санитарно-защитной зоны вокруг карьеров. В этой зоне объекты и скважинные водозаборы, использующие подземные воды для целей питьевого водоснабжения, отсутствуют.

В результате полевого обследования, проведенного в 2012 г., не удалось найти ни одной из скважин, использованных в 1999-2002 г.г. для ведения мониторинга уровней и качества подземных вод. Все эти скважины ликвидированы в результате попадания их в зону производства горных работ или иных причин (обрушения стволов и др.). Создание новой сети наблюдательных скважин (глубиной от 25 м до 50 м) связано со значительными затратами по их бурению, оборудованию обсадными и фильтровыми колоннами труб, созданию временных дорог и подъездов к ним.

Таким образом, учитывая, что область влияния карьеров на подземные воды не выходит за границы санитарно – защитных зон; отсутствие в области влияния карьерного водоотлива скважинных водозаборов из подземных вод, а также значительные затраты на бурение, обустройство скважин, предназначенных для мониторинга подземных вод и организацию регулярных наблюдений на них, организация дополнительной сети гидрогеологических скважин мониторинга на рассматриваемой территории представляется нецелесообразным.

### 2.3. Почвы

Описание почв проводилось автором работы и его коллегами-студентами во время прохождения на территории заповедника учебной научно-исследовательской практики в 2015 году. Отмечается, что на положительных элементах рельефа протекает подзолообразовательный процесс, а в понижениях - глееобразование и торфонакопление, поэтому почвенный покров имеет мозаичный вид. На территории заповедника встречаются два основных типа почв: подзолы иллювиально-гумусово-железистые и торфяные почвы. Рассмотрим их более подробно.

**Подзолы иллювиально-гумусово-железистые** песчаные и супесчаные формируются в мезоморфных условиях и приурочены к водноледниковым равнинам и моренным холмам и грядам. Почвообразующими породами могут быть как валунные пески, так и супеси. На них произрастают *Pineta* и реже *Piceeta myrtillosum* и *empetris-myrtillosum*. Лесная подстилка (4-8 см) грубогумусная или слабоотторфованная, подзолистый горизонт ярко белесого цвета. Почвы кислые, повышенную кислотность имеют лесные подстилки и подзолистые горизонты. Основная масса органического вещества сосредоточена в лесной подстилке и иллювиальном горизонте. Распределение гумуса по профилю имеет элювиально-иллювиальный характер. Подзолы иллювиально-гумусово-железистые (Табл. 2) содержат больше элементов минерального питания, чем иллювиально-железистые. Лесная подстилка обычно более мощная 6-8 см, которая продуцирует большое количество органических кислот, способствующих интенсивному подзолообразованию. Подзолистый

горизонт более мощный, ярко белесого цвета. Органические кислоты в полимерных комплексах с алюминием и железом при смене реакции среды осаждаются в иллювиальном горизонте, окрашивая его в бурые с коричневым оттенком цвета.

Табл. 2. Подзол иллювиально-гумусово-железистый. Разрез.

Горизонт	Мощность, см	Описание
О	0-8	Буро-коричневый, включения корней, слаборазложившееся органическое вещество, граница чёткая по цвету и плотности, переход волнистый
Е	8-20	Серый, супесь, свежий, мелкозернистый, уплотнённый, граница чёткая по цвету, волнистая
ВНН	20-28	Рыжий, лёгкий суглинок, свежий, среднезернистый, уплотнённый, граница размытая
ВН	28-60	Палевый, лёгкий суглинок, свежий, среднезернистый, рыхлый, содержит признаки ожелезнения, включения гравия, граница размытая
С	60-80	Серый лёгкий суглинок, свежий, среднезернистый, рыхлый, содержит включения морены

**Торфяные почвы** формируются в условиях избыточного увлажнения под влаголюбивой растительностью. Заторможенность процессов минерализации и гумификации приводит к накоплению торфа. Эти почвы распространены небольшими массивами, занимая неглубокие понижения на задровых равнинах. На них произрастают низкопродуктивные *Pineta sphagnosum*.

Табл. 3. Разрез торфяных олиготрофных почв.

Горизонт	Мощность, см	Описание
ТО	7-18	Светло-коричневый, мокрый, уплотнённый, содержит слаборазложившиеся органические остатки, включения корней, граница волнистая, ясная по цвету
ТТ	18-46	Тёмно-коричневый, мокрый, плотный, содержит среднеразложившиеся органические остатки, слабоминерализованный

### 3. Методики исследования объекта

#### 3.1. Методики отбора и анализа проб в лаборатории

В территорию отбора проб включена площадь 231 км<sup>2</sup>, охватывающая непосредственно район самого рудного поля и прилегающие к ним и находящиеся под техногенным воздействием предприятия участки верховий бассейнов четырех озерно-речных систем (Рис. 3).

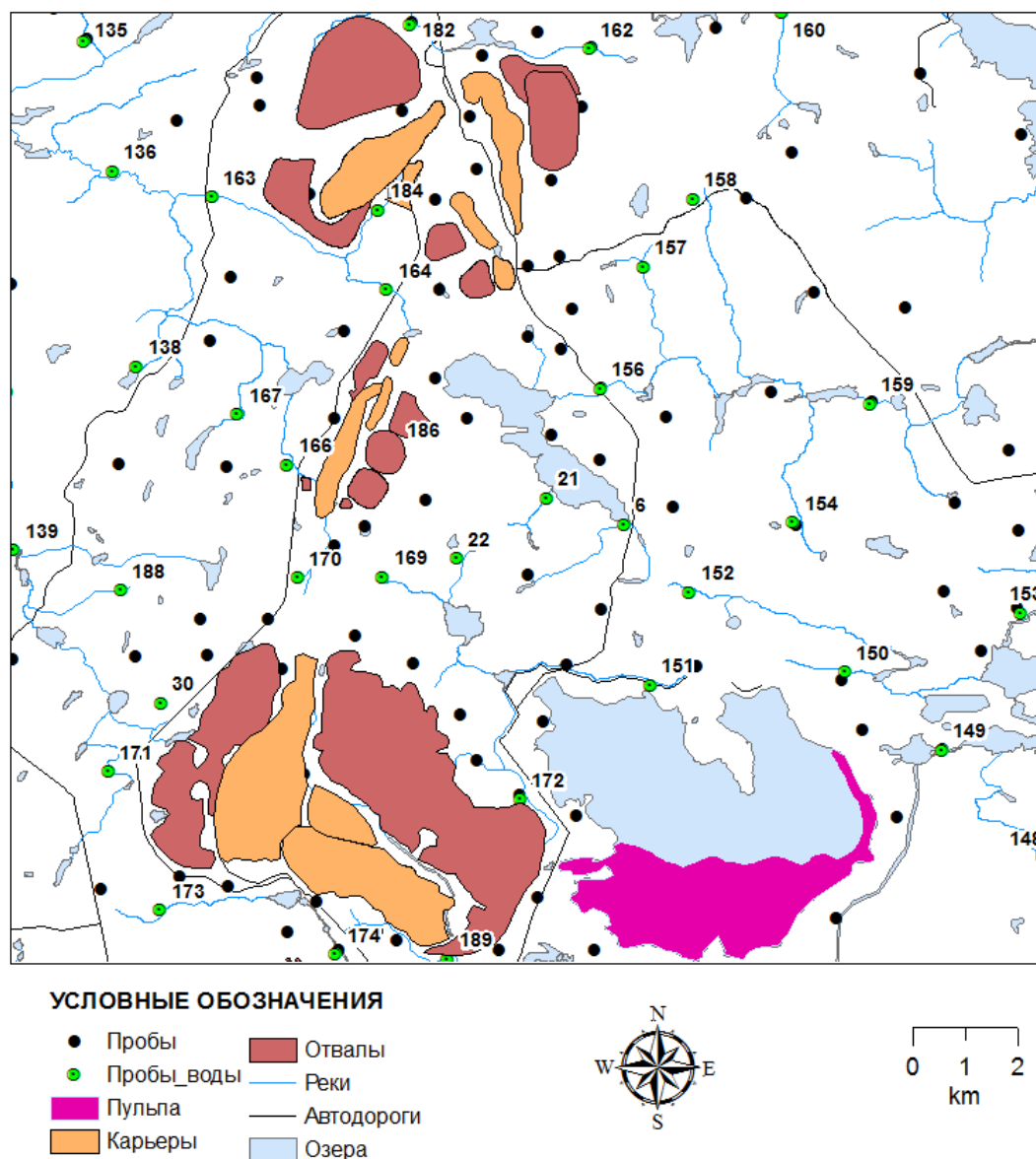


Рис. 3. Схема расположения точек опробования

Комплексное опробование сопряженных поверхностных компонентов экосистемы рекомендовано российской методикой многоцелевого геохимического картирования

(МГХК), апробированной в различных регионах России (Программа Мониторинга..., 2012).

Опробование проводилось для 5 природных сред: наземные мхи, органический горизонт почв (O), минеральный почвенный горизонт (BF / VHF / C) (Рис. 4), поверхностные воды, донные осадки.

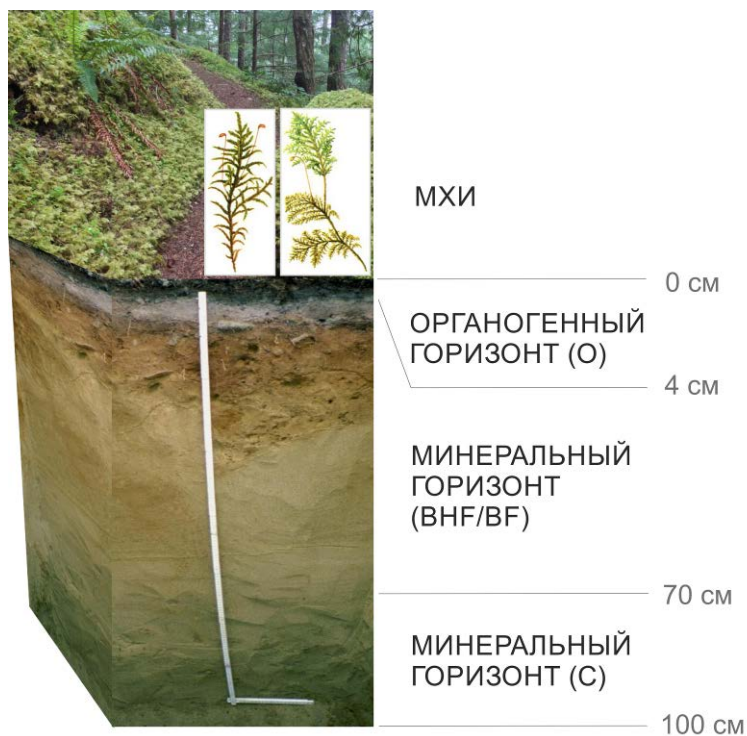


Рис. 4. Схема залегания природных сред опробования.

Одним из основных положений МГХК является выбор точек опробования на основе многофакторного (геологического, геохимического, ландшафтного, хозяйственной деятельности) районирования площади работ.

Выбор гомогенных условий в пределах каждой запланированной репрезентативной точки опробования даст возможность снизить влияние вариаций природных условий и более корректно оценивать антропогенное воздействие на окружающую среду. Поэтому площадка опробования (50×50 м) выбиралась в преобладающем типе элементарного ландшафта.

В случае холмистого рельефа площадка для опробования выбиралась в верхней части склона холма.

В районах низинного рельефа площадка выбиралась на пологом склоне, ближе к подножной части склона или долины. В районах заболоченных территорий для отбора проб выбираются участки транс-элювиального ландшафта на его границе с обводненным, супер-аквальным ландшафтом. Полученный почвенный разрез и материал для опробования

минерального горизонта соответствовали наиболее распространенному на локальном водосборе типу четвертичных отложений.

При этом плотность опробования мхов, органического и минерального горизонта почв в центральной части площади составляла 1 точку на 2 км<sup>2</sup>. На остальной территории плотность опробования этих сред - 1 точка на 5 км<sup>2</sup>. Общий объем точек опробования - 125 точек.

Плотность опробования поверхностных вод и донных осадков водотоков и водоёмов - 1 точка на 8-9 км<sup>2</sup> в центральной части и 1 точка на 13-15 км<sup>2</sup> на периферийной части, общее число точек - 55.

Лаборатория, выполняющая аналитические исследования, имеет государственную аккредитацию, современные методы и техническое снаряжение для количественного определения валового содержания и подвижных форм широкого спектра элементов с необходимым пределом их обнаружения для каждой из изучаемых компонентов природно-геологической среды (ПГС).

В перечень определяемых в каждом компоненте ПГС входит 23 элемента: As, Cd, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Mo, Na, Ni, P, Pb, S, Sb, Se, Sn, Te, Tl, V, Zn.

Отбор и анализ проб в лаборатории с фоновой территории Государственного заповедника проводился по таким же методикам, как и отбор и анализ проб с исследуемой территории. Число точек опробования – 3 (Рис. 5). Опробование проводилось для трех природных сред: наземные мхи, органогенный горизонт почв (О) и минеральный почвенный горизонт (BF / ВНФ / С).

В перечень определяемых в каждом компоненте ПГС элементов входят поллютанты, характерные для находящейся под антропогенным воздействием территории: As, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, S, Zn.

Анализ проб на валовые содержания производился в лаборатории Ресурсного Центра СПбГУ, на содержание подвижных форм – в лаборатории кафедры «Геоэкология и природопользование» СПбГУ.

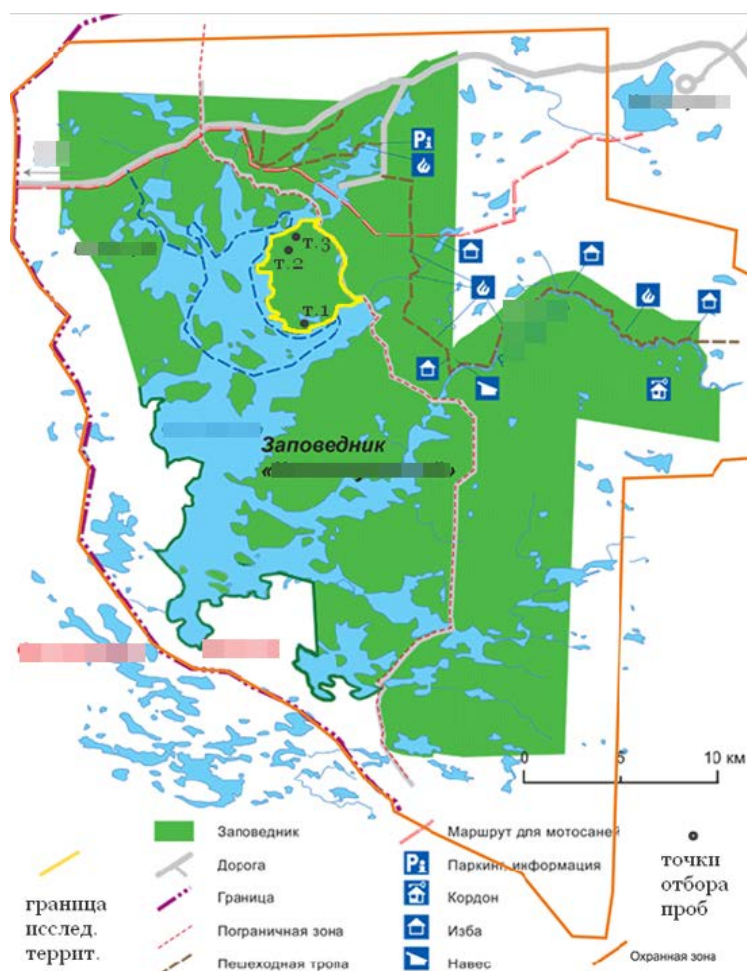


Рис. 5. Расположение точек отбора проб с фоновой территорией.

### 3.1.1. Методика отбора и анализа проб минерального (нижнего) горизонта почв

Пробы минерального горизонта почвы отбираются для того, чтобы представить особенности коренных пород исследуемой территории. Крупные, регионального масштаба вариации элементов в составе самого верхнего слоя Земной коры будут отражаться в этом случае.

Опробованию подвергается минеральный горизонт С или, в случае его залегания на глубине более 1,0 м или не доступности, слабоизмененная часть горизонта ВF или, в случае его отсутствия, горизонт ВНF. Горизонт С представляет исходную материнскую породу, на которой формировался почвенный профиль. Для опробования в центре намеченной площадки проходится шурф сечением 60x60 см глубиной 50-100 см.

Опробование осуществляется равномерно по всей площади забоя выработки с помощью однотипного для всех бригад инструмента (стальной савок). Вес отбираемой пробы 1 кг. Пробы упаковываются в плотные мешки из синтетического волокна и подвергаются сушке. При отборе пробы в бланках полевой документации фиксируются



ландшафтно- геоморфологические характеристики точки отбора пробы, характер и состояние растительного и древесного покрова и наличие признаков техногенного воздействия.

В лаборатории проводились сушка проб до воздушно сухого состояния ( $<40\text{ C}^0$ ), просеивание фракции  $<2\text{ мм}$ , разложение проб царской водкой (смесь  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$ ) и определение элементов (методы ICP-MS, OES и AAS).

### **3.1.2. Методика отбора и анализа проб органогенного (верхнего) слоя горизонта почв**

Органогенный горизонт почвы опробуется для отражения взаимодействия между атмосферой и литосферой. Он также используется для изучения продолжительности атмосферного приноса элементов в экосистему и его накопления с течением времени.

Опробование этого горизонта осуществляется путем формирования сборной пробы верхнего (0-3 см) органогенного слоя, представляющего, как правило, смесь растительной подстилки и подстилающего его гумусового материала.

Обязательным условием выбора места отбора был учет расстояния (не менее 2-3 м) до ближайших деревьев для исключения влияния стока атмосферных осадков с крон деревьев и кустарников. При отборе пробы верхний слой живой растительности, крупные корни и минерализованная часть образца глубже 3 см удалялись с использованием защитных виниловых перчаток. Объем сборной пробы из 8-10 образцов составлял в среднем 1.5-2 л.

В полевой документации фиксируются средняя величина и пределы изменчивости мощности органического ( $A_0+A_1$ ) слоя, его состав и количество взятых в сборную пробу отдельных образцов.

Пробы, упаковываются в маркированные мешки из плотного синтетического волокна, подвергаются сушке в чистом помещении на полевой базе.

В лаборатории осуществляется сушка проб до воздушно-сухого состояния ( $<40\text{ C}^0$ ), гомогенизация проб и просеивание фракции  $<2\text{мм}$ , разложение лабораторной навески концентрированной  $\text{HNO}_3$  в микроволновой печи и определение содержания перечисленных элементов (методы ICP-MS, OES и AAS), вытяжка подвижных форм ацетатом аммония при  $\text{pH}=4.5$  и определение содержания перечисленных элементов (методы ICP-MS и OES).

Дополнительно в пробах органического горизонта почв выполняется определение зольности весовым методом, а также содержания ртути методом «холодного пара».

### 3.1.3. Методика отбора и анализа проб мхов

Мохообразные обладают высокой сорбирующей способностью. Они лишены покровных тканей, поэтому могут впитывать влагу всей поверхностью. С этим связана их повышенная способность поглощать химические элементы из атмосферного воздуха, если эти элементы отсутствуют в субстрате. Быстрое и в больших количествах поглощение химических элементов облегчается также благодаря тому, что у мхов очень большая площадь поверхности по отношению к объему.

Экспериментальные исследования уточняют процесс поглощения тяжёлых металлов мхами и свидетельствуют о некоторой избирательности металлов в этом процессе. По степени уменьшения сорбционной способности и удержания в тканях мхов *Hylocomium splendens* ТМ располагают в следующий ряд: Cu, Pb > Ni > Co > Zn, Mn, Cd (Опекунова, 2014). Таким образом, по мхам можно судить о комплексном воздушно-почвенном загрязнении территории.

Опробование мхов проводилась вокруг точки проходки шурфа почвенного разреза. Опробованию подвергается два вида мхов: *Hylocomium splendens* или (при его отсутствии) *Pleurozium schreberi*. Отбор производится с различных, равномерно расположенных в пределах площадки мест (не менее 6-8) отдельных проб только одного из указанных разновидностей мхов, из которых составляется сборная проба объемом примерно 1л. В пробу отбираются только зеленые или зеленовато-коричневые отростки за последние 2-3 года. Отбор проб обязательно осуществляется в медицинских виниловых перчатках с соблюдением всех мер предосторожности, исключающих загрязнение пробы минеральным материалом или опавшей листвой.

В бланке полевой документации помимо вида опробованного мха приводятся сведения о характере мохового покрова (густой или редкий, регулярный или пятнистый) и фактическом размере опробованной площадки (м<sup>2</sup>).

Пробы упаковываются в бумажные пакеты и просушиваются в закрытом, чистом помещении.

В лаборатории осуществляется сушка проб до воздушно сухого состояния (<40 С<sup>0</sup>), измельчение на центрифуге с Ti ножами до размера <2мм и гомогенизация проб, разложение лабораторной навески концентрированной HNO<sub>3</sub> в микроволновой печи, определение содержания перечисленных элементов (методы ICP-MS, OES и AAS).

### **3.1.4. Методика отбора и анализа поверхностных вод**

Наблюдаемые концентрации элементов в речных водах сильно подвержены влиянию литосферы. Техногенное загрязнение может существенно изменить природный состав вод. На значительной части исследуемого района поверхностные воды являются главным источником питьевых вод.

Пробы поверхностных вод отбирались из существующих поверхностных водоемов и водотоков. На водотоках отбор проб выполняется в интервале протяженностью 200-250 м со спокойным течением и отсутствием заметных на глаз следов загрязнения.

Опробование поверхностных водоемов и водотоков включает в себя отбор из одного места нескольких проб разного объема и предназначенных на различные виды анализа, в том числе:

- 500 мл бутылочка с нефилтрованной пробой воды на анионный анализ;
- 100 мл полиэтиленовая бутылочка подкисленной ( $\text{HNO}_3$ ) пробы воды для ICP-MS и ICP-AES катионный анализ;
- 500 мл стеклянная емкость для анализа на нефтепродукты.

В полевых условиях в точке пробы воды выполняются измерения pH и электрической проводимости на pH-ЕС-метре.

В бланке полевой документации, приводится общая характеристика точки наблюдений, отмечаются погодные условия и уровень воды на момент опробования, характер течения, состав ложа водотока, наличие антропогенных изменений (сооружений) в пределах русла и береговой зоны, возможные источники загрязнения.

### **3.1.5. Методика отбора и анализа донных отложений водотоков**

Пробы донных осадков отражают природный усредненный геогенный состав всего водосборного бассейна.

Пробы донных осадков отбирались как сборные пробы, составленные минимум из 5 частных образцов, взятых равномерно с того же интервала водотока или береговой линии протяженностью 200-250 м, где осуществлялся отбор проб воды. Отобранная сборная проба весом 2-5 кг должна содержать как минимум 150-200 г материала фракции  $<0.1$  мм, в которой преобладает тонкозернистый песок, глинистые и коллоидные частицы краевых участков водотока, как более информативные для геохимического опробования.

В лаборатории происходит сушка проб до воздушно-сухого состояния ( $<40$   $^{\circ}\text{C}$ ), просеивание фракции  $<0.15$  мм, разложение проб царской водкой (смесь  $\text{HCl}$  и  $\text{HNO}_3$ ) и определение перечисленных элементов (методы ICP-MS, OES и AAS).

### 3.2. Методика математической обработки и картографического представления данных

Анализ данных, полученных в лаборатории, осуществлялся в модуле Geostatistical Analyst программы ArcGis. Анализ дал следующие результаты (на примере наиболее характерного поллютанта – мышьяка):

Гистограмма плотности распределения показывает, что данные по концентрациям мышьяка в органическом горизонте почв (А-А<sub>0</sub>) имеют асимметричное относительно линии среднего/медианы распределение, а нормальный график КК (квантиль-квантиль) сильно отклоняется от прямой, то есть распределение далеко от нормального (Иванюкович, 2010).

Данные прологарифмированы, что позволяет приблизить функцию плотности распределения значений концентраций к нормальному распределению по Гауссу.

Кроме статистического анализа, программа ArcGis позволяет интерполировать значения экологических показателей в точках отбора проб на всю территорию изучения, разбить их на категории по диапазону значений и отобразить на карте. Для визуализации данных используется метод обратно взвешенных расстояний, который устойчив к асимметричному ненормальному распределению данных и позволяет контрастнее выделять на карте зоны локальных аномалий. В процессе интерполяции используются настройки: степень  $p$ , в которую возводятся веса равна 1, максимальное число соседей равно 10, минимальное число соседей равно 5. Зоны аномалий – это зоны, в пределах которых значения концентраций элементов превышают фоновые значения.

#### 3.2.1. Методика определения фоновых и аномальных значений концентраций

Для определения фоновых значений концентраций используются два подхода: натуральные измерения и расчетный метод.

Натуральные измерения фоновых концентраций заключались в отборе трех проб с фоновой территории Государственного заповедника с последующим анализом в лаборатории. По разным причинам лабораторные значения концентраций удалось получить только для Cu, Fe, Ni, Zn во мхах и Co, Fe в органогенном горизонте (Табл. 4)

Табл. 4. Результаты натуральных измерений фоновых значений концентраций.

Природная среда	Мхи				Органогенный горизонт почв (O)	
	Cu	Fe	Ni	Zn	Co	Fe
Вещество						
Сф, мг/кг	4.6	365	0.9	34.5	1.4	3396.7

Для определения фоновых значений остальных основных поллютантов в ПГС бы использован расчетный метод. В настоящей работе натуральные измерения фона приоритетны по отношению к расчетному методу. Это означает, что при расчете категории загрязнения почв и интегрального показателя в первую очередь использовались значения фона, полученные натуральными измерениями. При их отсутствии для некоторых элементов и природных сред использовался расчетный метод, описанный ниже.

На основе визуального анализа геологической, геоморфологической карт и карты распределения концентраций выбираются участки, на которых: 1) отсутствуют явные аномалии, выделяемые на карте визуально в пределах участка; 2) выдержаны ландшафтно-геохимические условия; 3) горные породы по химизму однотипны (Ильяш, 2004). Значения фоновых концентраций определялись для каждого элемента каждого выделенного участка как среднее геометрическое выборки значений выделенного участка. Фоновые значения концентрации элементов всей территории равны среднему значению среднего геометрического выбранных участков. Для оценки фона среднее геометрическое было выбрано не случайно, так как в случае ненормального асимметричного распределения является несмещенной оценкой математического ожидания.

Выделены 6 однородных участков, расположенных: 1) на пересечении интрузивного комплекса верхнего лопия и аккумулятивного типа рельефа; 2) на пересечении супракрустального комплекса и аккумулятивного типа рельефа; 3) на пересечении супракрустального комплекса и денудационного типа рельефа; 4) на пересечении комплекса саамий-лопий и аккумулятивного типа рельефа; 5) на пересечении комплекса саамий-лопий и денудационного типа рельефа; 6) в пределах санитарно-защитной зоны (СЗЗ) предприятия, равной 1000 м. В соответствии с СанПиНом 2.2.1/2.1.1.567-96 «Санитарно-защитные зоны и санитарная классификация предприятий, сооружений и иных объектов» предприятие по добыче железных руд открытым способом относится ко второму классу опасности с санитарно-защитной зоной размером не менее 1000 м.

Значения концентрации нормированы на полученные значения фона по каждому однородному участку по формуле:

$$K_c = C / C_f, \quad (2)$$

где

C – концентрация элемента в точке опробования;

C<sub>ф</sub> – фоновое значение концентрации элемента.

Затем значения прологарифмированы. Для участка СЗЗ предприятия за фоновое значение принимается общий местный фон территории, который рассчитывается как среднее геометрическое фоновых значений для каждого участка.

За аномальные значения принимаются все значения коэффициента концентрации больше 1. Соответственно, за фоновые значения принимаются все значения коэффициента концентрации меньше 1. Чтобы визуально на карте выделить все геохимические аномалии и оптимально отобразить изменение  $K_c$ , шаг изолиний  $K_c$  в пределах аномальных геохимических зон выбирается следующим образом: в интервалах с высокой плотностью распределения густота изолиний высокая (с шагом 1,12/1,25), в интервалах с низкой плотностью распределения – шаг уменьшается до 0,5/1 единиц фона. Оптимальным количеством интервалов считается 8-10. Фоновая территория закрашивается в однородный светло-голубой цвет (Рис. 8).

### **3.2.2. Расчёт коэффициента концентрации, коэффициента ПДК и мультипликативного коэффициента**

Предварительно на основе визуального сравнения и анализа карт коэффициента концентрации ( $K_c$ ) из генеральной совокупности исключаются значения, которые дают локальные аномалии, несвязанные с деятельностью предприятия. Подобные аномалии могут быть

- геогенными (в нижнем горизонте С, связанные с рудопроявлением в коренных горных породах). Геогенные аномалии фиксируются по удалённости от источника загрязнения и по отсутствию корреляции с аномалиями в верхнем органическом горизонте (О) и во мхах.
- связаны с разовыми и/или залповыми выбросами и сбросами поллютантов в окружающую среду, а также с несанкционированными свалками мусора и др.
- связаны с погрешностями отбора, транспортировки, хранения и анализа проб.

Мультипликативный коэффициент загрязнённости почв  $Z_c$  характеризует степень химического загрязнения почв и грунтов обследуемых территорий вредными веществами различных классов опасности и определяется как сумма коэффициентов концентрации отдельных компонентов загрязнения по формуле:

$$Z_c = K_{c1} + \dots + K_{ci} + \dots + K_{cn} - (n-1), \quad (3)$$

где

$K_c$  - коэффициент концентрации - отношение содержания аномальных элементов  $Ca_i$  к фоновому содержанию этого элемента  $K_{ci} = Ca_i / C_{fi}$  (используются химические элементы при  $K_c \geq 1$ );

$n$  – число аномальных элементов (СП 11-102-97).

Фоновые уровни концентрации для данного объекта позволяют оконтурить зону техногенного влияния предприятия, а также выделить на изучаемой территории геохимические аномалии, исходя из критерия  $K_c > 1$ . Нормирование значений концентраций

на ПДК (Кпдк) позволяет определить экспериментально обоснованный уровень опасности загрязнения территории для человека. Для некоторых элементов значение ПДК не определено (например, Fe). При этом концентрации Fe превышают фоновые в несколько раз. Опираясь на написанное выше, автор данной работы предлагает совместное использование как фоновых значений, так и нормативов ПДК (ГН 2.1.7.2041-06, ГН 2.1.7.2042-06) для оценки уровня антропогенной нагрузки на территорию.

Для расчёта  $Z_c$  выбираются элементы, относящиеся к 1,2,3 классу опасности в почве (Буренков). В данной работе таких элементов 12 (ГОСТ 17.4.1.02-83).

Табл. 5. Классы опасности веществ.

Класс опасности	Химическое вещество
1	Мышьяк, кадмий, ртуть, свинец, цинк
2	Кобальт, никель, молибден, медь, хром
3	Ванадий, марганец

Оценка степени полиэлементного загрязнения по показателю  $Z_c$  рассчитывается отдельно для каждого компонента природной среды в соответствии со шкалой (Табл. 6) (МУ 2.1.7.730-99).

Табл. 6. Оценка загрязнения почв по  $Z_c$ .

Категории загрязнения почв	Величина $Z_c$
Допустимая	Менее 16
Умеренно опасная	16-32
Опасная	32-128
Чрезвычайно опасная	Более 128

Оценка степени загрязнения почв одним веществом неорганической природы по коэффициенту ПДК Кпдк проводится в соответствии со шкалой (Табл. 7) (СанПиН 2.1.7.1287-03):

Табл. 7. Оценка загрязнения почв одним веществом.

Категория загрязнения почвы	Содержание в почве (мг/кг)		
	1 класс	2 класс	3 класс
Чистая	От фона до ПДК	От фона до ПДК	От фона до ПДК
Допустимая	От 2 фонов до ПДК	От 2 фонов до ПДК	От 2 фонов до ПДК
Умеренно опасная			От ПДК до К <sub>max</sub>
Опасная	От ПДК до К <sub>max</sub>	От ПДК до К <sub>max</sub>	> К <sub>max</sub>
Чрезвычайно опасная	> К <sub>max</sub>	> К <sub>max</sub>	

В зависимости от наличия норматива ПДК/ОДК, для отображения границ категорий загрязнения почв строятся карты либо валовых содержаний, либо содержания подвижных форм в органическом горизонте. В случае, когда для одного вещества предусмотрено два норматива, из двух карт для каждого поллютанта синтезируется одна путем объединения территории с одинаковой категорией загрязнения. В первую очередь объединяются в одну территории, соответствующие наиболее высокому показателю К<sub>пдк</sub> из двух сравниваемых. Таким образом, из двух оценок загрязнения почв выбирается наиболее опасная.

### 3.2.3. Методика интегральной оценка загрязнения

Интегральная оценка загрязнения территории исследования осуществлялась на основе функции желательности Харрингтона (Опекунов, Опекунова, 2014). В качестве обобщенного показателя желательности использовался интегральный показатель загрязнения ландшафта — L<sub>TP</sub> (Landscape Total Pollution), вычисляемый по формуле

$$L_{TP} = \prod_{1 \leq i \leq g} D_g^{\alpha_g}, \quad (4)$$

где

$g$  – количество компонентов природной среды (среды опробования);

$\alpha_g$  - весовые коэффициенты, учитывающие значимость каждого из компонентов среды в загрязнении ландшафта, при выполнении условия:  $\sum_{g=1}^q \alpha_g = 1$  (5)

$D_g$  – частный интегральный показатель загрязнения ландшафта для  $g$ -ого компонента ПГС, определяемый по формуле:



$$D_g = \sqrt[l]{\prod_{i=1}^l d_i}, \quad (6)$$

где

$l$  – количество загрязнителей;

$d_i$  – частные значения функции желательности для каждого загрязнителя в каждом компоненте ПГС, определяемые по формуле

$$d = \exp[-\exp(-y)], \quad (7)$$

где

$y = -0,617 * \ln(y') + 0,93$  при нормировании значений концентраций на ПДК

$y = -0,94 * \ln(y') + 1,523$  при нормировании значений концентраций на фоновые значения.

На Рис. 6 представлен график функции желательности ( $d$ ), а также шкала преобразования нормированных на ПДК или фон концентраций ( $y'$ ) в частные показатели функции желательности ( $y$ ).

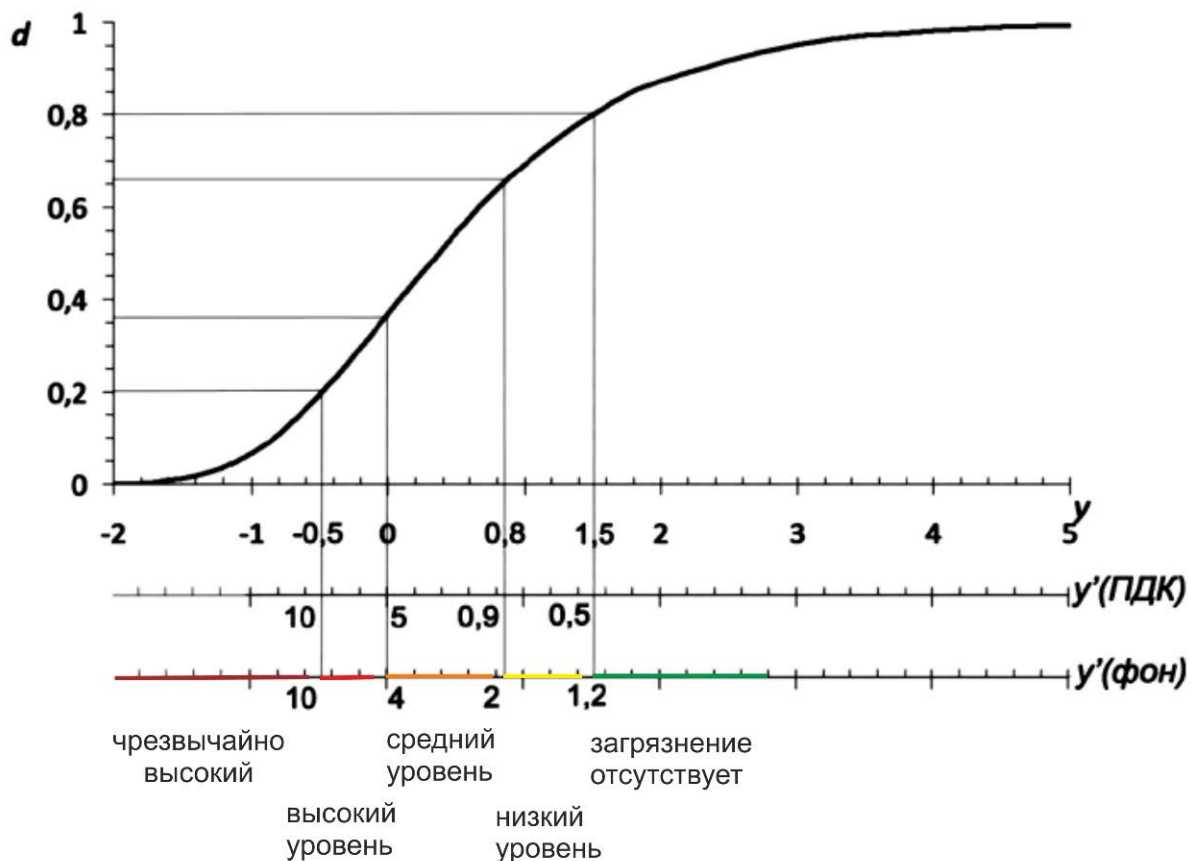


Рис. 6. График функции желательности, адаптированный под содержания загрязняющих веществ, нормированных к ПДК или фону

Шкала желательности ( $y$ ) рассчитывается по соответствующим уравнениям и на ней отмечены границы пяти категорий: более 1,5 — загрязнение отсутствует, 0,8–1,5 — низкий уровень, 0–0,8 — средний уровень, 0–(-0,5) — высокий, более (-0,5) — чрезвычайно высокий уровень загрязнения.

Указанные категории загрязнения ландшафта могут быть соотнесены с критериями зон состояния природной среды на основании кратности превышения ПДК. Зоны состояния (Куриленко, 2000) имеют экологические характеристики, представленные в таблице:

Табл. 8. Экологическая характеристика категорий загрязнения ландшафта.

Категория загрязнения	Зона состояния природной среды	Характеристика зоны состояния
загрязнение отсутствует	зона экологической нормы ( $<0.9$ ПДК)	отсутствует заметное увеличение прямых критериев оценки состояния экосистем выше ПДК или фоновых значений. Продуктивность и устойчивость экосистемы не снижается.
низкий уровень		
средний уровень	зона экологического риска ( $0.9 - 5$ ПДК)	прямые критерии оценки состояния экосистем незначительно превышают ПДК или фоновые значения, а сами экосистемы характеризуются обратимыми нарушениями с заметным снижением продуктивности и устойчивости, с возможностью в дальнейшем к спонтанной деградации
высокий уровень	зона экологического кризиса ( $5 - 10$ ПДК)	прямые критерии оценки состояния экосистем значительно превышают ПДК или фоновые значения, а сами экосистемы характеризуются сильным снижением продуктивности и устойчивости, с трудно обратимыми последствиями
чрезвычайно высокий уровень	зона экологического бедствия ( $>10$ ПДК)	прямые критерии оценки состояния экосистем в десятки раз превышают ПДК или фоновые значения, а сами экосистемы характеризуются полной потерей продуктивности и устойчивости, с практически необратимыми последствиями

В настоящих исследованиях автором используется нормирование концентраций на ПДК, как наиболее обоснованный и экспериментально подтвержденный на живых

организмах способ нормирования, а в случае отсутствия нормативов ПДК – на фон, определенный натуральными измерениями в заповеднике. В случае отсутствия данных измеренного фона, применялся математически рассчитанный фон. Расчет интегрального показателя проводился для девяти веществ: As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, S, Zn.

Для нормирования концентраций в воде использовались ПДК для водоемов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования (ГН 2.1.5.1315-03), в органогенном горизонте почв – ПДК или ОДК мышьяка, кадмия, меди, серы, никеля, цинка (Табл. 9). В минеральном горизонте почв, растениях, донных осадках, а также для кобальта, хрома и серы в органогенном горизонте почв использовалось нормирование на фоновые содержания.

Табл. 9. Предельно-допустимые концентрации химических веществ в воде и почве.

Вещество	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	S	Zn
ПДК в воде, мг/л	0.01	0.001	0.1	0.5	1	0.3	0.02	-	1
ПДК/ОДК в почве, мг/кг	2	0.5	-	-	33	-	20	160	55

После получения значений частного показателя  $d$  выполняются две свертки данных. Сначала проводится свертка частных показателей в одно число отдельно в каждом из компонентов ПГС для каждой точки отбора по формуле 6. В результате получают обобщенные показатели загрязнения для каждого компонента ПГС: органогенный горизонт почв ( $D_o$ ), минеральный горизонт почв ( $D_m$ ), мхи ( $D_{mx}$ ), вода ( $D_v$ ), донные отложения ( $D_{до}$ ).

Далее определяется величина  $L_{TP}$  через свертку  $D_g$  в каждой фации. Свертка проводится по формуле 5 с учетом коэффициентов значимости. В связи с относительной однородностью геолого-геохимических и геоморфологических условий, весовые коэффициенты в настоящей работе имеют следующие значения: органогенный горизонт почв ( $\alpha_o = 0.125$ ), минеральный горизонт почв ( $\alpha_m = 0.125$ ), мхи ( $\alpha_{mx} = 0.25$ ), вода ( $\alpha_v = 0.25$ ), донные отложения ( $\alpha_{до} = 0.25$ ).

В целях адаптации шкалы желательности к оценке уровня химического загрязнения в соответствии с методикой (Опекунов, Опекунова, 2014) в зависимости от значений интегрального показателя принимаются следующие категории загрязнения: 0.8-1.0 - химическое загрязнение отсутствует, 0.63-0.8 - низкий уровень загрязнения, 0.37-0.63 - средний, 0.2-0.37 - высокий и  $<0.2$  - чрезвычайно высокий уровни химического загрязнения.

Карта категорий загрязнения построена в модуле Geostatistical Analyst программы ArcGis. Был проведен статистический анализ значений интегрального показателя, который дал следующие результаты:

Гистограмма плотности распределения показывает, что численно медиана примерно совпадает со средним, а нормальный график КК (квантиль-квантиль) практически не отклоняется от прямой, то есть распределение можно считать близким к нормальному (Иванюкович, 2010).

Для визуализации значений интегрального показателя использовался метод обратно взвешенных расстояний. В процессе интерполяции используются настройки: степень  $p$ , в которую возводятся веса равна 1, максимальное число соседей равно 10, минимальное число соседей равно 5.

#### **3.2.4. Методика оценки пространственно-временной динамики уровня загрязнения органогенного горизонта почв.**

Основная задача этой главы - выявление закономерностей распространения по территории и изменения концентраций во времени основных поллютантов. Для решения задачи использованы данные Отчета по мониторингу геологической среды в районе \*\*\* месторождения в 1999-2002 гг. (Отчет по мониторингу геологической среды..., 2009), полученные в 2001 году, а также данные документа «Программа мониторинга...», полученные в 2013 году.

Данные представляют собой значения концентраций свинца, хрома, кобальта, никеля, железа и марганца в органогенном горизонте почв в 20 точках опробования. Каждой точке отбора проб в 2001 году с точностью не менее 200 метров (2 длины стороны квадратной площадки опробования) найдена такая же по местонахождению точка отбора проб в 2013 году. Территория исследования динамики загрязнения составляет около 160 км<sup>2</sup> и включает основные источники воздействия на окружающую среду: Северный, Центральный и Южный карьер, хвостохранилище (Рис. 7).

Значения концентраций никеля нормированы на значения ПДК в почве; в условиях отсутствия ПДК в почве для свинца, хрома, кобальта, железа и марганца нормирование производилось на фоновые значения, полученные в соответствии с параграфом 3.2.1.

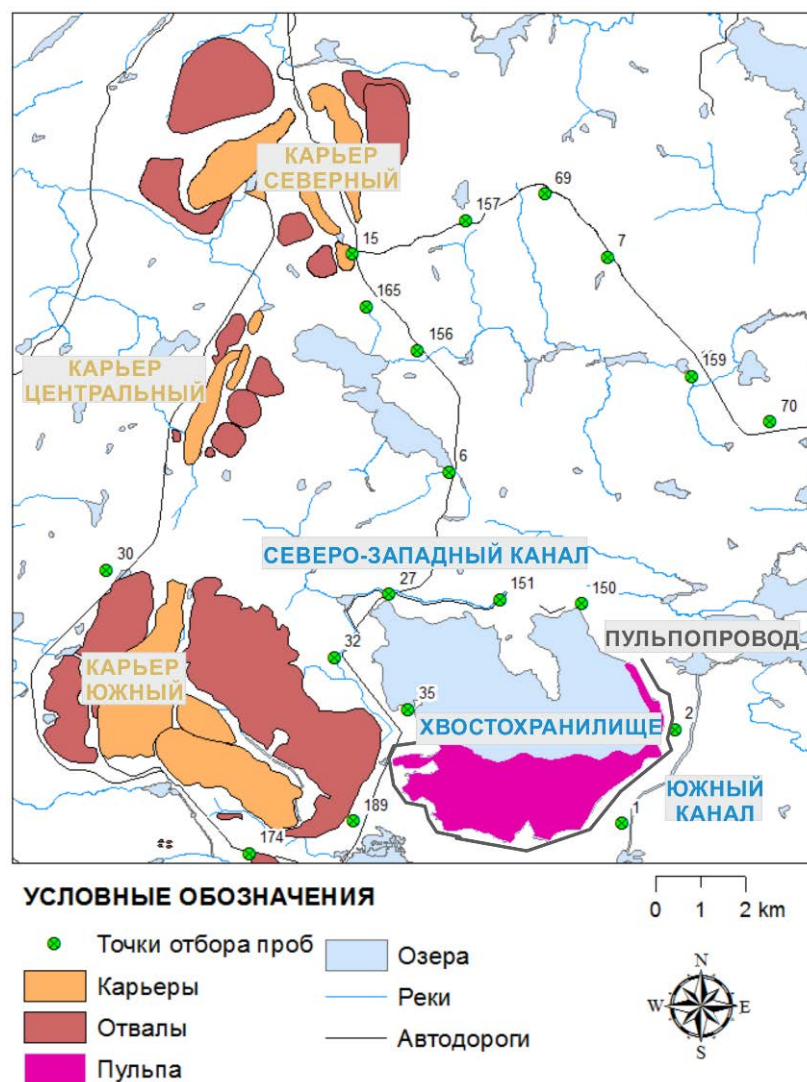


Рис. 7. Карта отбора проб в 2001 и 2013 годах.

Чтобы предугадать какими будут концентрации указанных поллютантов в 2020 и в 2030 годах, используется онлайн калькулятор расчета уравнения прямой по координатам двух точек (<http://100formul.ru/tchkprp15>). Во всех уравнениях переменная (и координата)  $x$  – это номер года отбора проб, а переменная (и координата)  $y$  – значения коэффициентов концентрации. Электронный ресурс выдает уравнение вида:  $ax + by + c = 0$ . Таким образом, используя данные за 2001 и 2013 года, посчитаны зависимости коэффициента концентрации загрязнителей от года отбора проб в каждой точке отбора (Табл. 10).

Табл. 10. Уравнения временного тренда в точках обора проб на примере Fe.

1	$0.44x+12y-978=0$
2	$0.51x+12y-1169=0$
6	$1.33x+12y-2727=0$
27	$4.63x+12y-9364=0$
30	$-0.38x+12y+719=0$
32	$3.58x+12y-7265=0$
35	$2.98x+12y-6050=0$
69	$-0.24x+12y+468=0$
150	$4.73x+12y-9542=0$
151	$4.84x+12y-9771=0$
155	$1.94x+12y-3920=0$
157	$1.63x+12y-3303=0$
174	$4.36x+12y-8879=0$
189	$3.31x+12y-6773=0$

Зная уравнения прямой тренда и подставляя в него вместо переменной (x) 2020 и 2030, вычисляются прогнозируемые в этих годах коэффициенты концентраций (y) по формуле:

$$y = (-ax - c) / b.$$

Автор понимает и признаёт, что долгосрочное прогнозирование на основании построения прямой тренда по двум точкам является не репрезентативным и не точным. Однако в целом, как показывает параграф 4.3. Результаты пространственно-временной динамики загрязнения в органогенном горизонте почв (O), такой прогноз позволяет выявить проблемные экологические зоны в будущем, чтобы обратить на них внимание в настоящем и предотвратить их образование.

Карта категорий загрязнения построена в модуле Geostatistical Analyst программы ArcGis. Был проведен статистический анализ значений интегрального показателя, который дал следующие результаты:

Гистограмма плотности распределения показывает, что численно медиана примерно совпадает со средним, а нормальный график КК (квантиль-квантиль) практически не отклоняется от прямой, то есть распределение можно считать близким к нормальному (Иванюкович, 2010).

Для визуализации значений интегрального показателя использовался метод обратно взвешенных расстояний. В процессе интерполяции используются настройки: степень  $p$ , в которую возводятся веса равна 1, максимальное число соседей равно 10, минимальное число соседей равно 5.

## 4. Результаты исследования

Оценка территории по суммарному показателю загрязнения почв  $Z_c$  оказалась не информативной (90% территории аномалий относится к категории допустимая или чистая).

Для анализа результатов исследования выбраны наиболее характерные загрязнители органического горизонта почв As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn, S с коэффициентами концентрации (Кпдк) больше 1 или близкими к ней, а также Fe.

После визуальной обработки карт выделены и пронумерованы наиболее крупные, часто встречаемые и имеющие различное происхождение геохимические аномальные зоны (Рис. 18):

№1 – аномальная зона карьера «Южный»;

№2 – аномальная зона карьера «Центральный»;

№3 – аномальная зона карьера «Северный»;

№4 – аномальная зона северно-западного канала (связана с хвостохранилищем и сточными водами карьеров);

№5 – аномальная зона южного канала (связана с хвостохранилищем и пульпопроводом);

№6 – геогенная аномальная зона в северо-западном углу изучаемой территории, приуроченная к \*\*\* диорит-тоинолитовому комплексу.

### 4.1. Результаты оценки загрязнения территории по коэффициенту концентрации

Исследуем геохимические аномалии отдельно по веществам, выделяя характерные для данного поллютанта особенности.

#### **Мышьяк.**

Территория в радиусе 2 - 4 км от техногенных объектов относится к категории «опасная», соответствующая состоянию экологического кризиса. Состояние экологического кризиса характеризуется устойчивыми отрицательными изменениями состояния естественных экосистем (уменьшение видового разнообразия, исчезновение отдельных видов растений и животных, нарушение генофонда) (Рис. 8, 9).

На Рис. 9 в органическом горизонте можно выделить три геохимические аномалии Кс, объясняющие относительно высокий уровень загрязнения мышьяком: №1, №2 и №5. Аналогично расположенные аномалии во мхах, а также значительное уменьшение этих аномалий в минеральном горизонте свидетельствуют о преимущественном поступлении поллютанта из атмосферы и постепенное накопление в органическом горизонте почв до опасного уровня.



Различие в размерах аномалий (№1 > №2) объясняется тем, что время работы карьера «Южный» значительно превышает время работы карьера «Центральный».

Частично для некоторых элементов (в частности, Ni) аномальная зона №1 объясняется влиянием со стороны ГОКа.

As обладает относительно высокой миграционной способностью As в водной среде (водный миграционный показатель вредности K2= 15 (МУ 2.1.7.730-99)).

Геогенная составляющая аномалии №4 не подтверждается, так как отсутствует пространственная корреляция аномалии с геологическими комплексами. В зоне аномалии №4 наблюдается увеличение концентрации As с глубиной, связанное, возможно, с процессами эксфильтрации.

Концентрации As в донных отложениях обводного канала в аномальной зоне №5 (т. 149, 150 на Рис. 3) превышают фоновые в 10-15 раз.

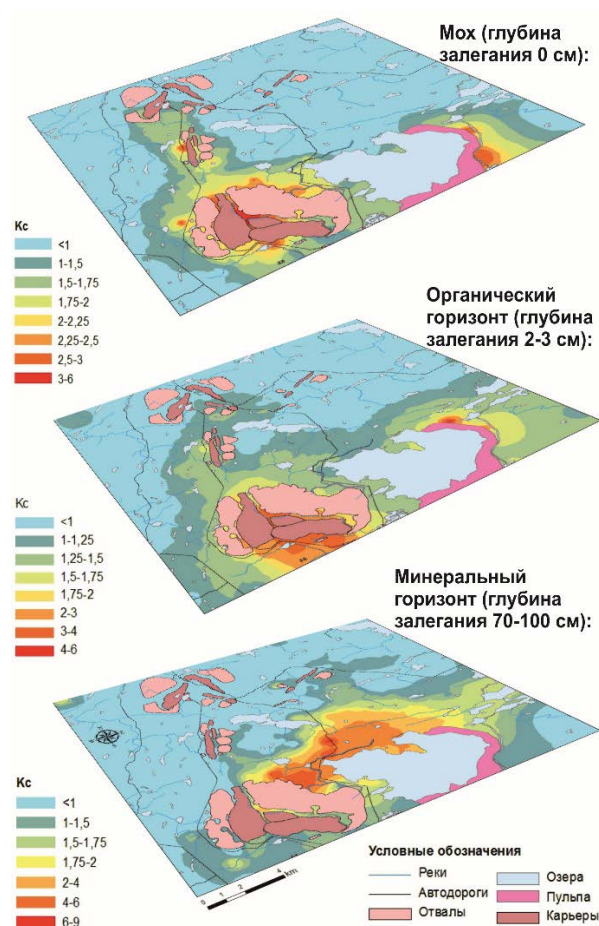
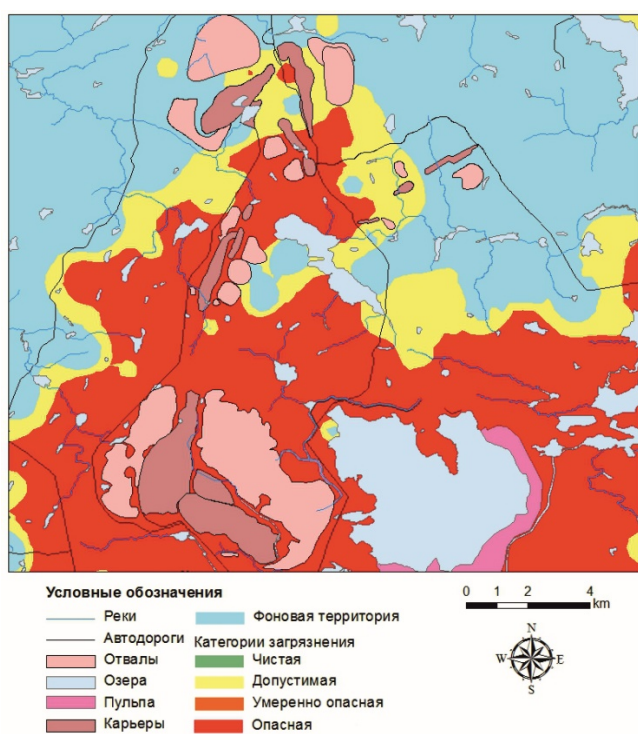


Рис. 8. Схема распределения территории по категориям загрязнения As в органогенном горизонте

Рис. 9. Схема распределения коэффициента концентрации (Kc) мышьяка по разрезу

Нужно отметить, что в целом для зоны загрязнения As характерна постепенная инфильтрация поллютанта в нижние горизонты почв.

Таким образом, аномальные зоны № 1,2,4,5 полностью объясняют форму и генезис распространения загрязнения As.

### Кадмий.

Загрязнение Cd характерно для мхов аномальной зоны №2. Поскольку Cd практически не проявляется в аномальной зоне №1 (Рис. 10, 11), можно сделать вывод, что элемент по сравнению с месторождением Южного карьера содержится в повышенных концентрациях в рудах месторождения Центрального карьера. Кроме того, по сравнению с Южным, Центральный карьер является достаточно «молодым» и не глубоким, что способствует более интенсивному оседанию пыли от взрывных работ на дневной поверхности, а не на бортах карьера. Основным источником загрязнения кадмием являются карьер Центральный и его отвалы.

Локальные опасные уровни загрязнения органического горизонта (Рис. 11) объясняются либо залповыми и/или разовыми выбросами, либо погрешностями при отборе и/или анализе проб.

В целом техногенный уровень загрязнения территории оценивается категорией «чистая».

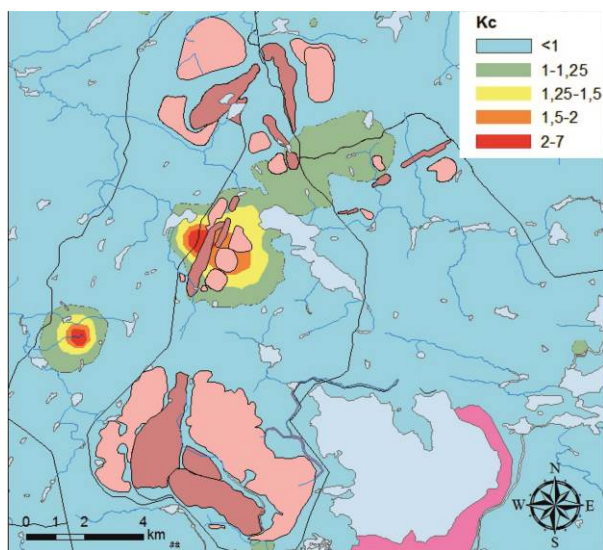


Рис. 10. Карта Кс по кадмию в органическом горизонте

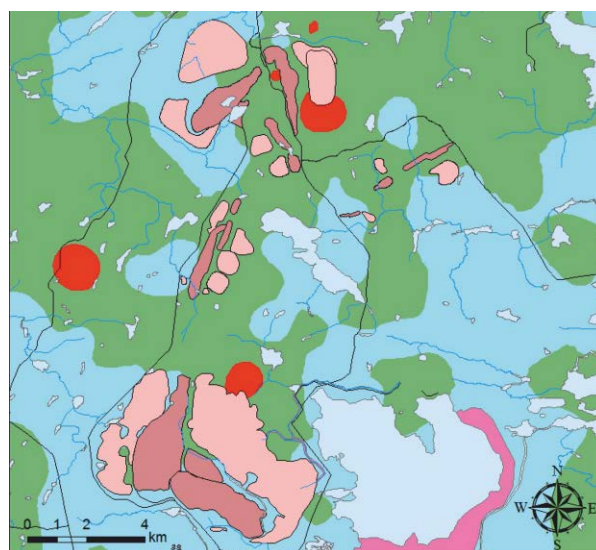


Рис. 11. Карта категорий загрязнения (справа) по кадмию в органическом горизонте

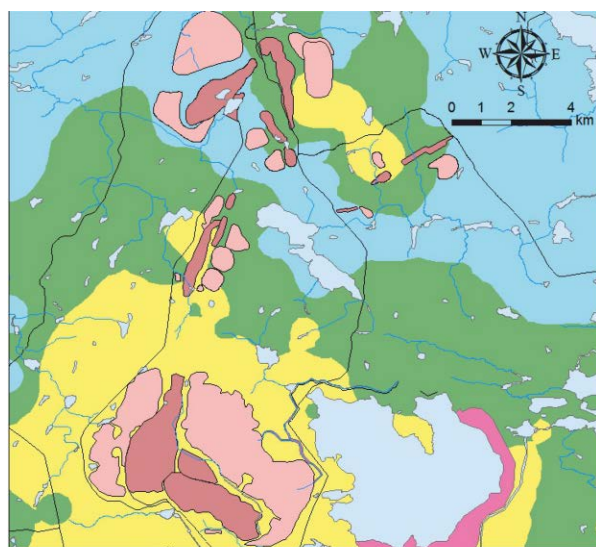
Условные обозначения	
— Реки	Фоновая территория
— Автодороги	Категории загрязнения
— Отвалы	Чистая
— Озера	Допустимая
— Пульпа	Умеренно опасная
— Карьеры	Опасная

### Кобальт.

Для территории характерны «чистая» и «допустимая» категории загрязнения кобальтом (Рис. 12). Элемент широко распространен по территории и присутствует во всех аномальных зонах. Несмотря на то, что кобальт малоподвижен в водной среде (водный показатель вредности  $K_2 > 1000$ ), элемент фиксируется в аномальной зоне №4. Справедливость этого факта может свидетельствовать о достаточно мощной техногенной нагрузки со стороны отводного канала и северного берега хвостохранилища. Пробы воды и донных отложений в этой зоне не дают существенных превышений фона в этой зоне.

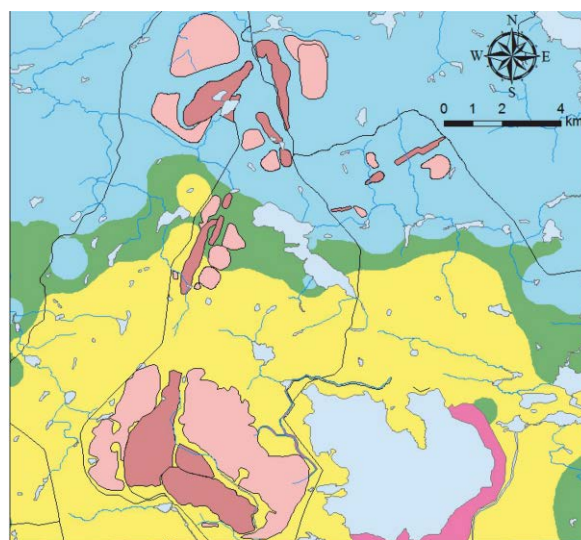
### Хром.

Присутствует во всех аномальных зонах. Наиболее высокие концентрации наблюдаются в зоне №1. Многовалентен и является активным мигрантом ( $K_2=6$ ). Картирование территории по категориям загрязненности представлена на Рис. 13. Фиксируется превышение фона более чем в 2 раза в донных отложениях аномальных зон № 4 и №5 (т. 149, 172).



Условные обозначения

— Реки	— Фоновая территория
— Автодороги	Категории загрязнения
Отвалы	Чистая
Озера	Допустимая
Пульпа	Умеренно опасная
Карьеры	Опасная



Условные обозначения

— Реки	— Фоновая территория
— Автодороги	Категории загрязнения
Отвалы	Чистая
Озера	Допустимая
Пульпа	Умеренно опасная
Карьеры	Опасная

Рис. 12. Карта категорий загрязнения  $Co$  в органогенном горизонте

Рис. 13. Карта категорий загрязнения  $Cr$  в органогенном горизонте

### Медь. Цинк. Никель.

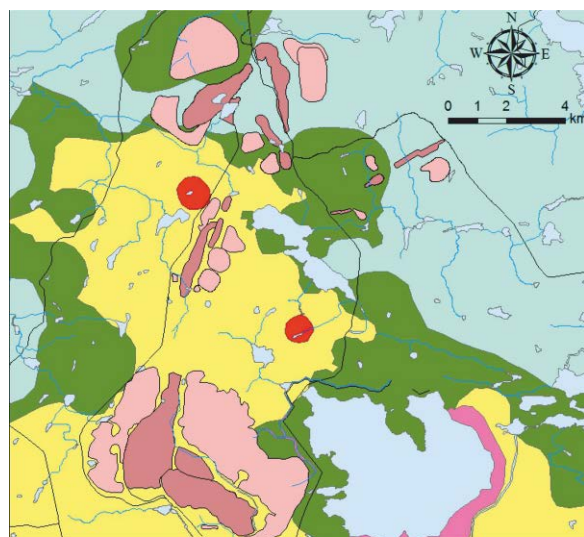
Загрязнение территории  $Cu$ ,  $Zn$ , представлено соответственно на рис. 14, 15.

Одним из источников загрязнения территории  $Ni$  (не картируемым в настоящей работе) является ГОК.



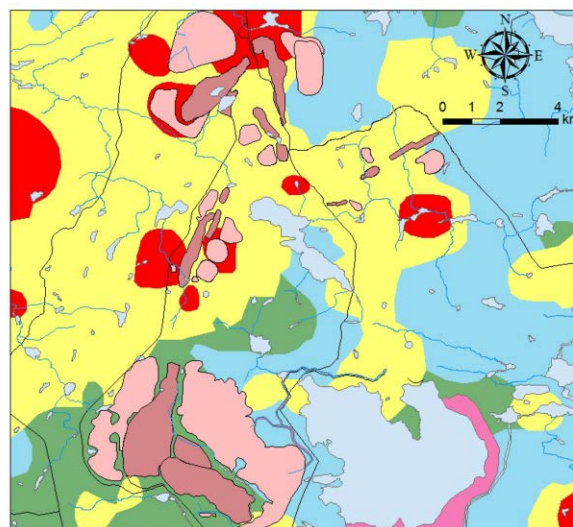
Высокий уровень загрязнения территории Zn определяется высоким содержанием относительно ПДК/фона в органическом горизонте подвижных форм элемента.

Наблюдаются превышение фона в 2-3 раза в донных отложениях канала сточных вод и обводного канала. Особенно высоко содержание Ni в донных отложениях т. 149 ( $K_c=15$ ).



Условные обозначения

— Реки	Фоновая территория
— Автодороги	Категории загрязнения
Отвалы	Чистая
Озера	Допустимая
Пульпа	Умеренно опасная
Карьеры	Опасная



Условные обозначения

— Реки	Фоновая территория
— Автодороги	Категории загрязнения
Отвалы	Чистая
Озера	Допустимая
Пульпа	Умеренно опасная
Карьеры	Опасная

Рис. 14. Карта категорий загрязнения Cu в органическом горизонте

Рис. 15. Карта категорий загрязнения Zn в органическом горизонте

### Сера.

Элемент является одним из основных загрязнителей. Только фоновые значения превышают ПДК (валовая) более чем в 3 раза. В нормативных документах значение показателя вредности  $K$  не определено, т.е. вся оконтуренная территория воздействия предприятия относится как минимум к умеренно опасной категории загрязнения органического горизонта. На Рис. 16 приведена схема распределения в единицах ПДК.

Сера - многовалентный, подвижный элемент. Этим объясняется широкий ареал распространения загрязнения серой вплоть до отдалённых от источников техногенного загрязнения северо-восточной части участка исследований. Отметим катастрофические превышения  $S$  по фону в воде канала сточных вод (в т. 172  $K_c=130$ , в т. 151  $K_c=44$ ), а также обводного канала (в т. 149  $K_c=25$ ). Проникновение серы на глубину происходит за счёт подземного стока и инфильтрационных процессов (Рис. 16). Пространственная взаимосвязь с геологическими комплексами не наблюдается.

## Железо.

Элемент является одним из основных загрязнителей. В районе Южного карьера имеет самые высокие по сравнению с другими загрязнителями превышения концентраций относительно фона в органическом горизонте ( $K_c=8-12$ ) (Рис. 17). Одним из основных источников загрязнения Fe является ГОК. Повышенные концентрации Fe в донных отложениях характерны для точек аномальной зоны № 5 в отдалении от источника загрязнения (в т. 150 и 152  $K_c=7-8$ ). Этот факт объясняется взаимосвязью коллоидных форм железа в воде с органическими веществами: чем больше концентрация органики, тем больше содержание иона железа.

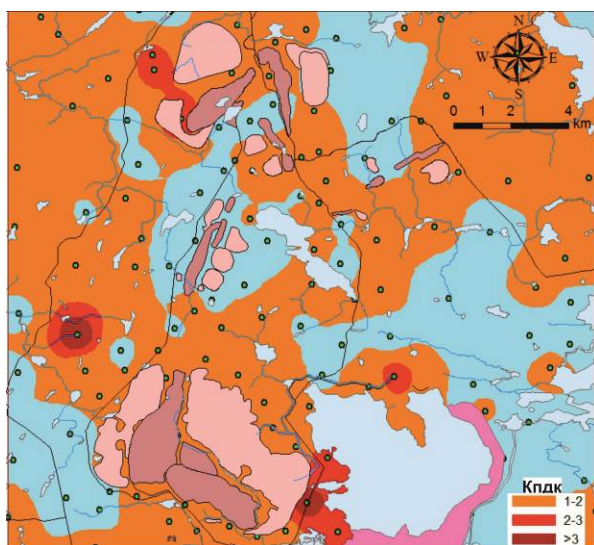


Рис. 16. Карта  $K_{pdk}(S)$  в органическом горизонте

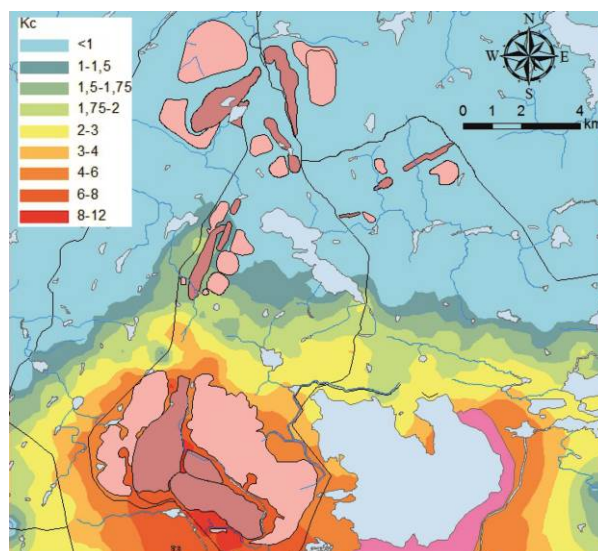


Рис. 17. Карта  $K_c(Fe)$  в органическом горизонте

В результате поэлементного анализа загрязнения для каждой аномальной зоны и для каждой ПГС выделены типичные загрязнители для дальнейшего факторного анализа (Табл. 11, Рис. 18).

Общая площадь территории, покрытой зонами аномальных концентраций химических веществ, составляет около 130 км<sup>2</sup>.

Как видно из таблицы, в целом для территории исследования типично постепенное уменьшение качественного состава загрязнителей с глубиной. С уверенностью можно утверждать, что аномальная зона №6 обусловлена геогенным влиянием комплекса диорит-тоналитовых горных пород. Уменьшение размеров аномалий с глубиной свидетельствует о преобладании техногенного фактора загрязнения над геогенным.

Табл. 11. Наиболее типичные элементы-загрязнители для каждой аномальной зоны.

Номер аномальной зоны	Наиболее типичные элементы-загрязнители для каждой ПГС		
	Мох	Органический гор-т	Минеральный гор-т
1	As, Co, Cr, Cu, Ni, Zn, S, Fe	As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Zn, S, Fe	As, Co, Cr, Cu, Ni, Fe
2	As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Fe	As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Fe	As, Cu, S
3	Co, Cr, Cu, Ni, Zn, Fe	Co, Zn, S	
4	Co, Cr, Ni, Fe	As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Fe	As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Fe
5	As, Co, Cr, Cu, Ni, S, Fe	As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Fe	As, Co, Cr, Cu, Ni, Fe
6			As, Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Zn, S, Fe

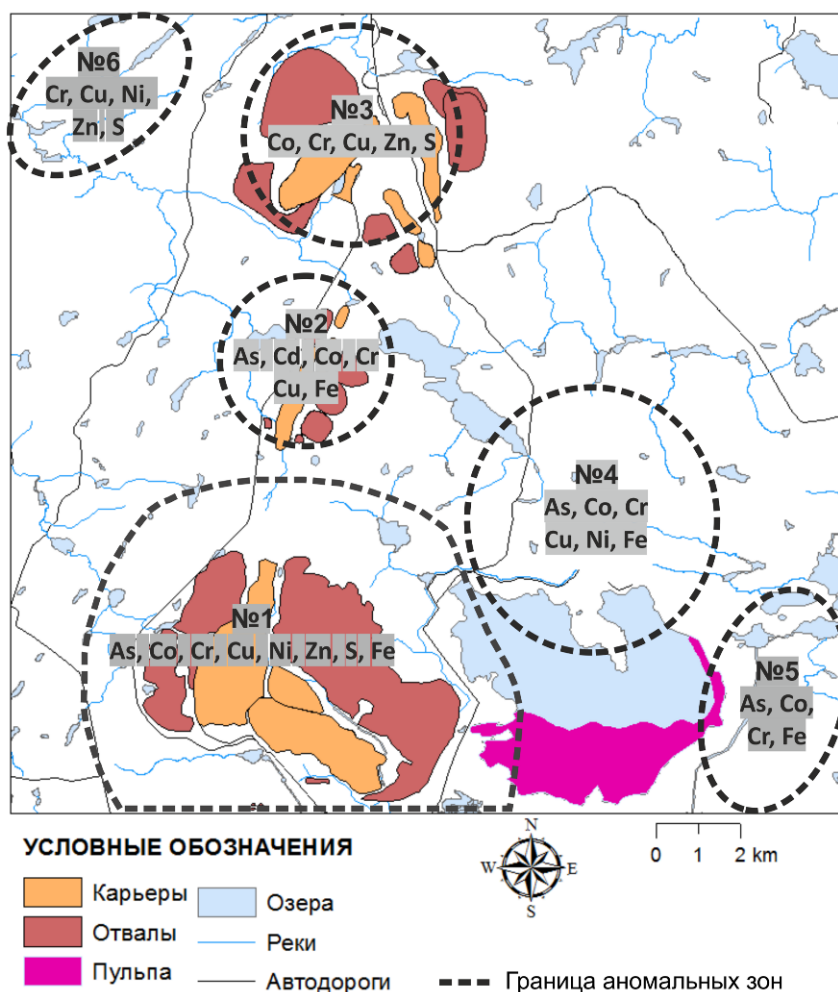


Рис. 18. Обобщающая схема расположения аномальных зон и типичных для них элементов.

Сравнение рис. 18 и геологической карты (Рис. 2) показывает, что аномальная зона №4 частично может иметь геогенный источник происхождения, т. к. она пространственно и по химическому составу коррелируется с рудоносной гимольской серией и тремя разрывными нарушениями, по которым металлы попадают в вышележащие горизонты.

#### 4.2. Результаты расчёт коэффициента радиальной миграции

Коэффициент радиальной миграции (Кр.м.) рассчитывается по формуле:

$$\text{Кр.м.} = C_A / C_C$$

где  $C_A$  – концентрация поллютантов в органическом горизонте А;

$C_C$  – концентрация поллютантов в минеральном горизонте С (70-100 см)

Кр.м. показывает степень неоднородности распределения элементов в почвенном профиле.

Табл. 12. Средние значения Кр.м. в аномальных зонах.

№ зоны	As	Cd	Co	Cr	Cu	Fe	Ni	S	Zn
1	4,84	7,33	0,76	1,02	1,30	2,15	1,26	16,46	2,30
2	3,30	8,32	0,56	0,42	1,59	0,83	0,79	9,47	2,26
3	5,07	7,52	0,21	0,17	1,84	0,23	0,56	19,50	2,44
4	1,31	8,92	0,40	0,42	0,92	0,84	0,76	14,21	1,65
5	2,79	5,62	0,48	0,34	1,16	1,31	0,64	10,37	1,51

Высокие значения Кр.м. >>1 (As, Cd, S) говорят о накоплении этой группы элементов в верхних горизонтах. Низкие значения Кр.м. <=1 (Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Zn) свидетельствуют о высокой степени рассеивания элементов в нижележащий горизонт.

#### 4.3. Результаты факторного анализа

С помощью факторного анализа для каждой аномалии в органическом горизонте выявлено количество факторов воздействия и степень их значимости.

Для отбора значимых факторов использовался критерий «осыпи»: количество факторов должно соответствовать резкому изменению градиента собственных значений фактора в зависимости от его номера.

Во всех случаях выделяются два фактора, значимость которых более 15%. Один из них основной – значимость более 50%.



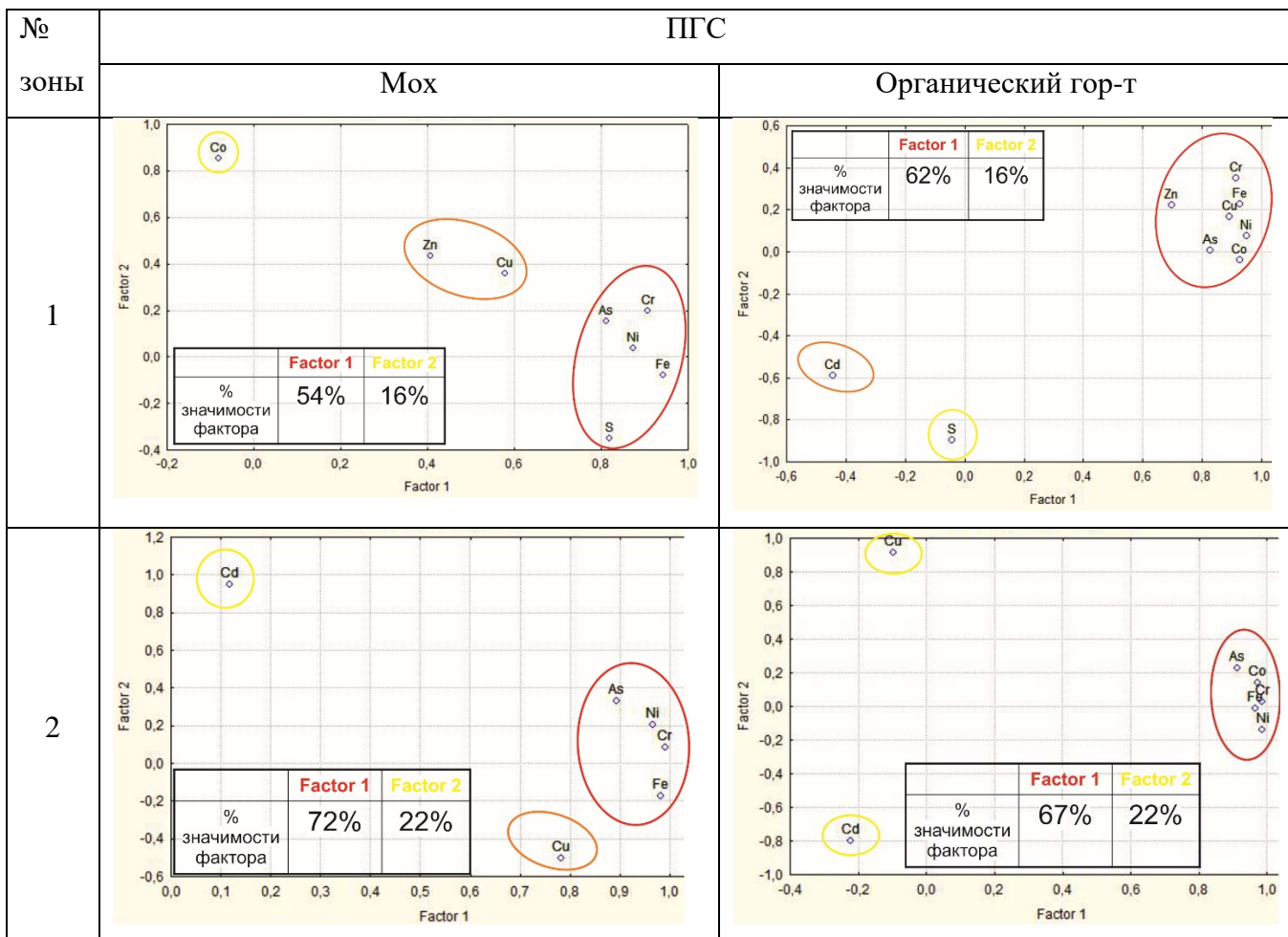


Рис. 18. Результаты факторного анализа для аномальных зон №1 и 2

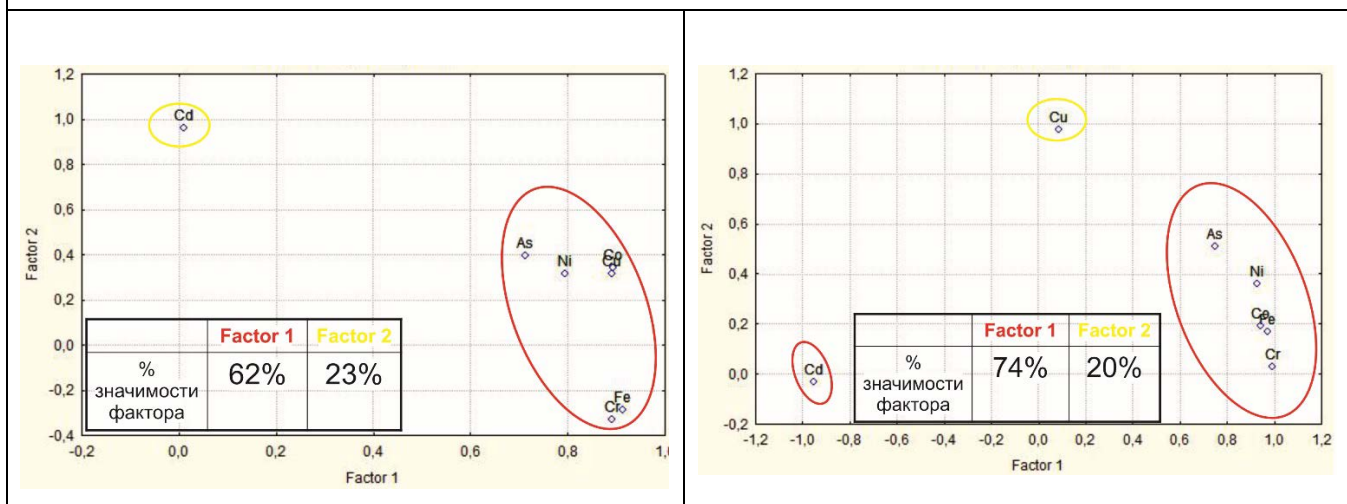


Рис. 19. Результаты факторного анализа органического слоя в аномальных зонах №4 (слева) и №5 (справа)

Для повышения контрастности в распределении факторных нагрузок и, следовательно, для облегчения объяснения факторов использовалась процедура вращения факторных осей Varimax raw.



Чтобы оценить надёжность интерпретации факторов, используется показатель общности. Общность показывает процент дисперсии переменной, который объясняет данный фактор. Если фактор объясняет более 50% дисперсии переменной, то он считается надёжным. Все результаты факторного анализа проверены по этому критерию. В минеральном горизонте более одного фактора выделить не удалось.

По результатам факторного анализа можно выделить группу поллютантов (As, Cr, Ni), изменение концентраций которых зависит от одного основного фактора. Во всех случаях распространение Cd контролирует второй по значимости фактор. Оранжевым цветом выделены элементы, которые контролируются одновременно двумя факторами.

В аномальной зоне №1 распространение группы элементов (As, Cr, Ni, Fe, S) контролируется основным фактором (1) с положительной нагрузкой (+) – атмосферный перенос загрязнения с ГОКа (на 54-62%), а также побочным (2) – карьерами и отвалами (на 16%). Положительная нагрузка фактора ассоциируется с воздушным переносом, отрицательная – с водными путями миграции (дождевой сток, подземные воды).

Для S характерна отрицательная нагрузка фактора 1. Zn и Cu в равной степени зависят от обоих факторов загрязнения с +нагрузкой. Распространение Co контролируется фактором 2+, Cd – фактором 2-.

В аномальной зоне №2 условия распределения поллютантов похожи. За исключением того, что сложно предположить влияние ГОКа на прилегающие территории Центрального карьера – ГОК расположен на расстоянии более 10 км от карьера. В зоне №2 основным источником загрязнения являются карьер и отвалы, побочным – автотранспорт. Cd и Cu тяготеют к фактору 2.

В аномальной зоне №4 целая группа элементов (As, Ni, Co, Cu, Fe, Cr) контролируется основным фактором – миграция водным путем по каналу сточных вод и по обводному (северо-западному) каналу через систему озер в область аномалии. Подтверждением являются повышенные концентрации поллютантов в донных отложениях в т. 149, 150. Отрицательная нагрузка по фактору 2 для Fe и Cr объясняется влиянием ГОКа. Cd характеризуется аэрогенным переносом.

Основное загрязнение аномальной зоны №5 создаёт обводной канал. Cd распространяется с ветром с частицами пульпы, Cu – за счет водной миграции из подходящей вплотную к берегу пульпы хвостохранилища.

Аномальные зоны №3 и №6 являются однофакторными системами соответственно с источниками загрязнения: автомобильный транспорт и подстилающие зону горные породы.

#### 4.4. Результаты интегральной оценки загрязнения ландшафта

Опираясь на карту загрязнения, составленную на основе интегрального показателя (Рис. 20), можно отметить, что большая часть территории (около 80% или порядка 190 км<sup>2</sup>) относится к низкому уровню загрязнения ( $L_{TP} = 0.6 - 0.77$  - желтый цвет). Наибольшую химическую нагрузку испытывают мхи. Их частные интегральные показатели в некоторых точках отбора достигают уровня среднего загрязнения ( $Dg = 0.51 - 0.8$ ). Из Табл. 8 видно, что продуктивность и устойчивость экосистемы в этой зоне не снижается, но всё же концентрации некоторых поллютантов хоть и не значительно, но выше фоновых значений или предельно допустимых концентраций. Этот факт свидетельствует о распространении химического воздействия предприятия на окружающую среду на большие расстояния от основных источников антропогенной нагрузки (до 10 километров).

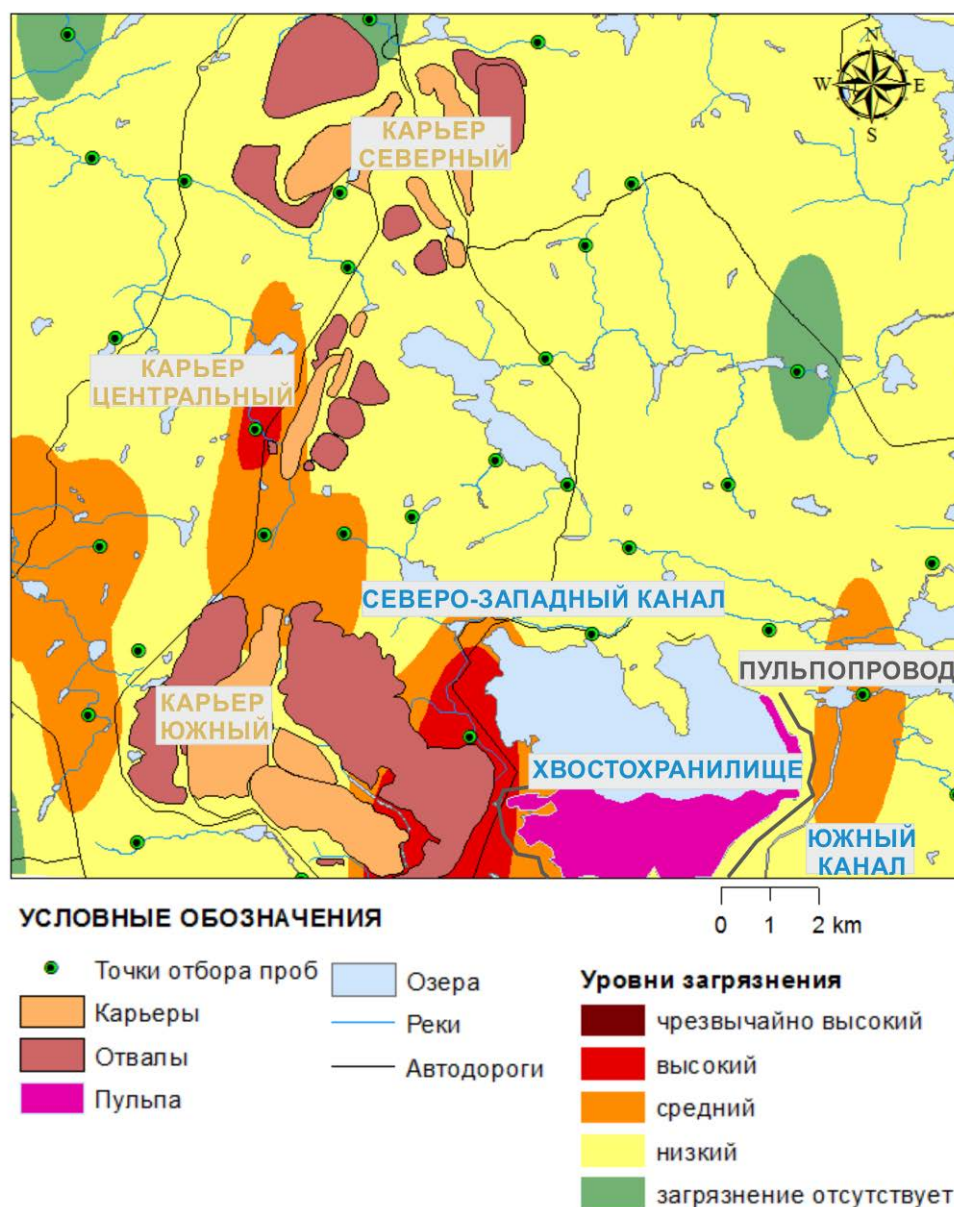


Рис. 20. Карта загрязнения территории, составленная на основе интегрального показателя

Среднее загрязнение ландшафта (оранжевый цвет) характерно для территорий общей площадью около 20 км<sup>2</sup>, расположенных внутри аномальных зон Южного карьера, Центрального карьера и Южного канала (№ 1, 2 и 5). Согласно Табл. 8 экосистемы в зоне среднего загрязнения обладают обратимыми нарушениями с заметным снижением продуктивности и устойчивости, с возможностью в дальнейшем к спонтанной деградации.

Загрязнение среднего уровня обусловлено влиянием нескольких техногенных источников. С запада от отвалов Южного карьера (Рис. 21) образование «хвоста» загрязнения неправильной формы произошло за счет в основном водной миграции поллютантов из отвалов через реки, ручьи и подземные воды. О незначительной роли воздушного переноса говорит тот факт, что «пятно» загрязнения не вплотную подходит к границе отвалов, поскольку в случае аэромиграции частицы пыли (горной породы) непременно оседали бы в непосредственной близости к отвалам. В случае же водной миграции возможен перенос веществ на значительные расстояния в форме различных химических соединений. Расстояние транспортировки будет определяться размерами частиц (чем крупнее частицы, тем ближе они осядут) и изменением физико-химических условий водной среды. При изменении значений pH и Eh в воде происходит трансформация нерастворимых форм химических соединений в растворимые и наоборот, а также выпадение осадка. Более подробное разъяснение механизмов миграции поллютантов читайте в параграфе № 5.1. Источники поступления поллютантов в аномальные зоны.

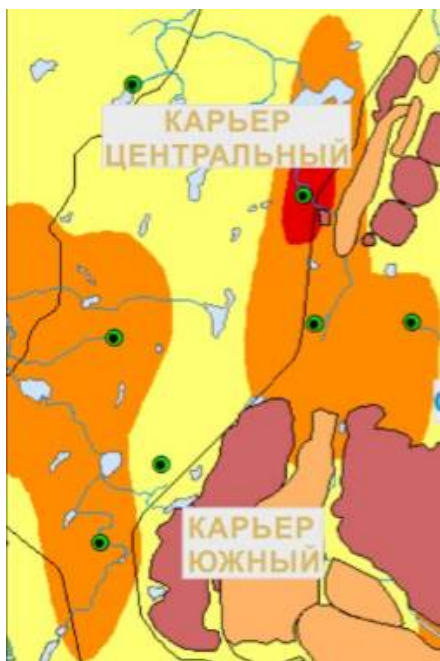


Рис. 21. Средний уровень загрязнения в аномальной зоне № 1 и 2. Фрагмент Рис. 20.

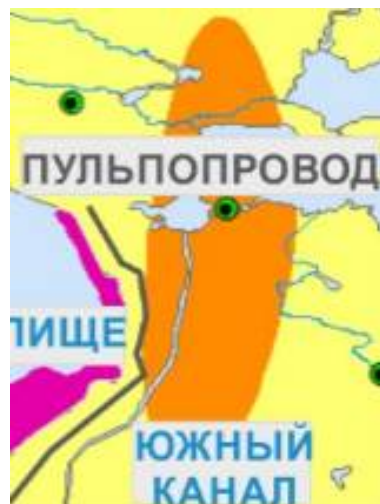


Рис. 22. Средний уровень загрязнения в аномальной зоне № 5. Фрагмент Рис. 20.

За образование «хвоста» загрязнения неправильной формы с севера от Южного карьера (Рис. 21) ответственны Южный и Центральный карьеры, их отвалы, железнодорожные пути и автомобильная дорога, проложенные между карьерами и ГОКом.

Карьеры влияют на окружающую среду в основном за счет воздушного переноса частиц горных пород во время проведения взрывных и погрузочно-разгрузочных работ, а также за счет загрязнителей, поступающих от сжигания топлива и работы специальной техники. Взрывы проводятся один-два раза в неделю в 12.00 и слышны за несколько километров до карьеров. Специальная техника представлена карьерными самосвалами «Белаз» и специальными экскаваторами. Потребление топлива «Белазом» составляет от 1300 литров на 100 км.

Железнодорожные пути и автомобильная дорога образуют зону стабильного загрязнения в радиусе до 100 метров от полотна. Из этой зоны происходит дальнейшая миграция веществ в окружающую среду.

Образованию ареала овальной формы со средним уровнем загрязнения к востоку от хвостохранилища (Рис. 22) способствовало создание хвостохранилища, Южного канала и проведение пульпопровода. Хвостохранилище приносит загрязнители в зону за счет их проникновения через борта водоёма и латеральной миграции. За более 30 лет существования в качестве хвостохранилища озеро увеличилось в размерах более чем в полтора раза. Таким образом, берега озера оказались затоплены пульпой, что увеличивает скорость поверхностной миграции веществ в зону загрязнения (Рис. 23).



Рис. 23. Берег хвостохранилища

В период создания хвостохранилища все втекающие и вытекающие из него реки были перекрыты дамбами, чтобы изолировать техногенный объект от озерно-речной системы региона. Южный канал создан для соединения двух озерно-речных систем в обход хвостохранилища. Предприятие при этом заявляет об использовании замкнутой системы



водоснабжения производства таким образом, что вода отделяется от мелкоразмерных отходов ГОКа и используется повторно. Однако городской муниципалитет ежегодно предоставляет предприятию от 1 млн. м<sup>3</sup> чистой воды. Это косвенно свидетельствует о том, что предприятие в целях недопущения разлива хвостохранилища делает попуски воды из него в Южный канал. Таким образом загрязнители мигрируют в зону загрязнения. Пульпопровод также служит источником поступления загрязнителей во время аварийных ситуаций, а также в местах непосредственного сброса пульпы в хвостохранилище.

В зоне среднего уровня загрязнения  $L_{тр}$  равен 0.48 – 0.53, что в большей степени обусловлено высоким уровнем воздействием на растительность ( $Dg = 0.21 – 0.42$ ).

Высокий уровень загрязнения (красный цвет) наблюдается в пределах аномальных зон Южного и Центрального карьеров (аномальные зоны № 1 и 2) на площади около 6 км<sup>2</sup>. В этой зоне экосистемы характеризуются сильным снижением продуктивности и устойчивости, с трудно обратимыми последствиями.

Судя по овальной, вытянутой в северном направлении форме ареала, высокий уровень загрязнения западного берега хвостохранилища (Рис. 24) обусловлен наложением химического воздействия (миграцией загрязнителей) со стороны отвалов Южного карьера на воздействие (выбросы) со стороны горно-обогатительного комбината (ГОК). Форма и направление ареала загрязнения объясняется генеральным направлением ветра на север (Программа мониторинга, 2012).

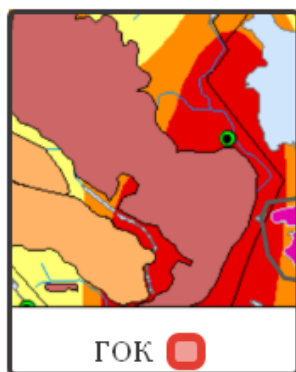


Рис. 24. Высокий уровень загрязнения в аномальной зоне № 1. Смотрите рис. 20.

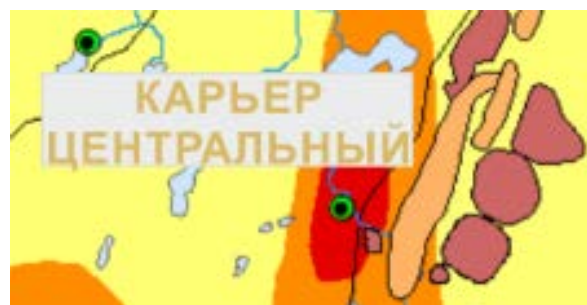


Рис. 25. Высокий уровень загрязнения в аномальной зоне № 2. Смотрите рис. 20.

Высокий уровень загрязнения западнее Центрального карьера (Рис. 25) зафиксирован по причине наличия железнодорожной станции погрузки и отправки добытой железной руды на горно-обогатительный комбинат (Рис. 26).



Рис. 26. Пример станции погрузки железной руды (<http://gazeta19.ru/news/41135>).



Рис. 27. Пример чрезвычайной ситуации на станции погрузки ([http://uralpolit.ru/news/society/news\\_event/vosem-vagonov-tovarnyaka-soshli-s-relsov-na-stantsii-druzhinino](http://uralpolit.ru/news/society/news_event/vosem-vagonov-tovarnyaka-soshli-s-relsov-na-stantsii-druzhinino))

На станциях погрузки создаются площадки под складирование привезённой с карьера руды, которые становятся источником химического воздействия на окружающую среду. Также распространение загрязнителей происходит из-за потерь в процессе загрузки руды специальным экскаватором в железнодорожные вагоны. На станции могут произойти чрезвычайные ситуации, которые приводят к загрязнению близлежащей территории. Например, опрокидывание вагона с рудой (Рис. 27) и другие.

В этой зоне зафиксированы самые низкие уровни  $L_{тр}$  (0.3-0.34). Самую большую антропогенную нагрузку испытывает растительность и водные объекты, частными интегральными показателями которых соответствуют чрезвычайно высокому уровню загрязнения ( $Dg = 0.09-0.22$ ).

Отсутствие загрязнения (зеленый цвет) характерно для участков исследуемой территории суммарной площадью около 4 км<sup>2</sup>, расположенных в отдалении (на расстоянии нескольких километров) от техногенных источников воздействия на окружающую среду. В этих зонах продуктивность и устойчивость экосистемы не снижается. Зоны можно отнести к территории с фоновым содержанием химических веществ, на которых происходит ускоренное самовосстановление экосистем.

В пределах исследуемой территории отсутствуют зоны с чрезвычайно высоким уровнем загрязнения.

Нужно отметить, что в целом интегральная оценка загрязнения территории позволяет выделить экологически неустойчивые зоны для принятия управленческого решения

проблемы. Причем объём данных используемых в аналитике уменьшается в несколько раз. В случае настоящих исследований после свёртки частных интегральных показателей пяти природных сред в один интегральный показатель объём данных (фактически - чисел) уменьшился в 5 раз без потери объективности оценки с той точки зрения, что учитывается вклад каждой среды в суммарный показатель.

Таким образом, применение интегральной оценки на практике (например, при ведении единой базы данных экологического мониторинга) позволит значительно сократить операционные ресурсы для обработки данных, а также ресурсы памяти для хранения и пополнения данных. Это приведет к удешевлению работ по мониторингу.

В отличие от суммарного показателя загрязнения почв  $Z_c$ , который оказался не информативным для исследуемого объекта, интегральная оценка выявила аномальные зоны химического воздействия.

Однако, стоит также отметить, что с помощью интегральной оценки удалось выделить только три аномальные зоны из шести и только фрагментарно, то есть таким образом, что значительная площадь аномальных зон (около 90км<sup>2</sup>), выделенных с помощью детального анализа карт коэффициентов концентрации поллютантов в различных природных средах, не фиксируется на карте интегрального показателя (Рис. 28).

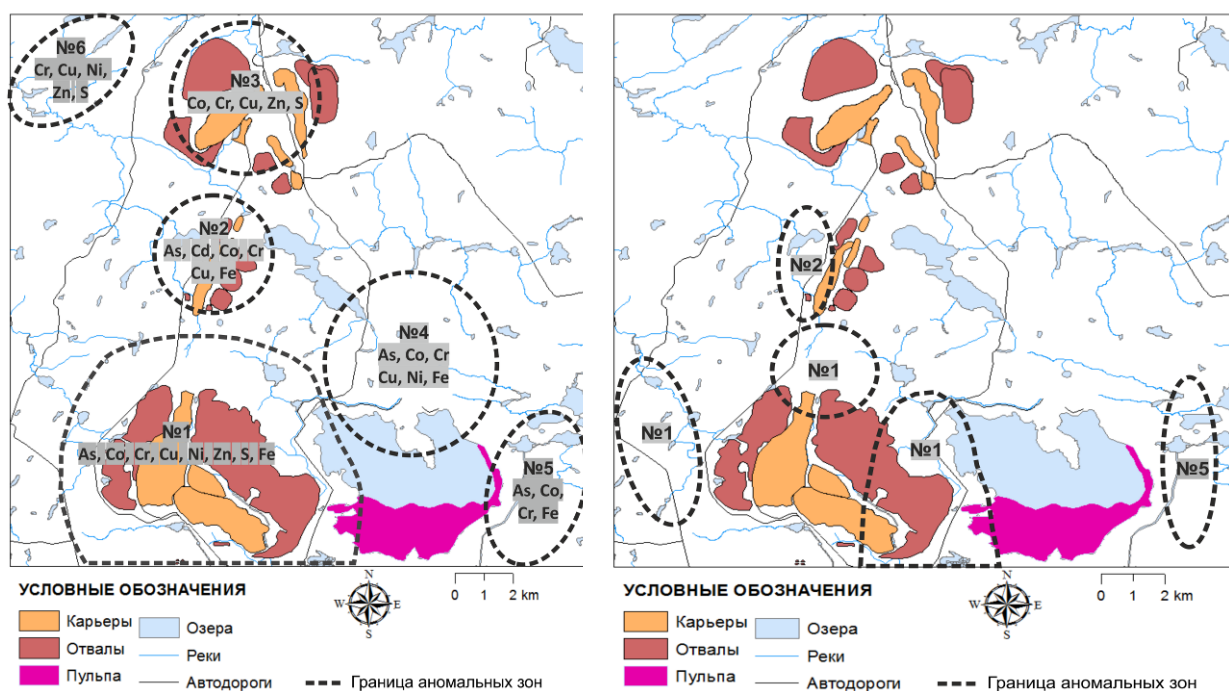


Рис. 28. Аномальные зоны, выделенные на основе значений коэффициентов концентрации (слева) и аномальные зоны, выделенные на основе интегрального показателя (справа)

С целью увеличения информативности карты уровня загрязнения по интегральному показателю рекомендуется провести исследования по обоснованию изменения границ категорий загрязнения. Требуется более точная «настройка» границ уровней загрязнения таким образом, чтобы они качественнее отображали геохимические аномалии.

С этой же целью весовые коэффициенты для природных сред предлагается назначать исходя из степени химического воздействия на природную среду со стороны предприятия. Чем выше концентрация поллютантов и чем больше точек отбора проб фиксируют повышенные концентрации в определённой природной среде, тем значительнее вклад в интегральный показатель. Значения весовых коэффициентов для таких сред должно быть больше остальных. В этом случае при визуализации на карте сложится более полная картина аномальных зон.

С позиции дальнейших исследований важным является обоснование и использование в методике весовых коэффициентов для классов опасности веществ. Введение в методику взвешенных коэффициентов повысит её объективность.

### **4.3. Результаты пространственно-временной динамики загрязнения в органогенном горизонте почв (О)**

Сравнение коэффициентов концентраций Pb, Cr, Co, Ni, Fe, Mn в органогенном горизонте в 2001 году с коэффициентами концентраций в 2013 году указывает на существенное уменьшение загрязнения территории (Табл. 13).

Из Табл. 13 следует, что в 87% точек отбора проб (зелёный цвет) наблюдается положительная тенденция к очищению органогенного горизонта почв от основных поллютантов. В т. 2, 7, 32, 165 кратность превышения ПДК или фона в 2013 году уменьшилась на 10 – 20 единиц.

Особенно резкие изменения характерны для Cr, Fe и Mn практически во всех точках отбора. Эти вещества больше чем другие склоны к перемещению на глубину в минеральный горизонт почв, что подтверждается расчётом коэффициентов радиальной миграции (Табл. 12). Высокая подвижность Cr, Fe и Mn объясняется многовалентностью, которая позволяет им образовывать большое количество химических соединений, растворимых в воде.

В остальных случаях (красный цвет) фиксируется незначительная (не более чем в 1.58 раза в т. 69 по Pb) тенденция к накоплению поллютантов со временем.

Слабое изменение концентраций в органогенном горизонте (в пределах 1 кратности превышения ПДК/фона в большинстве точек) наблюдается для Pb и Ni.



Табл. 13. Изменение кратности превышение ПДК или фона в 2013 году по сравнению с 2001 годом

№ точки отбора проб (Рис. 7)	Вещество					
	Pb	Cr	Co	Ni	Fe	Mn
1	-3.22	-8.48	-2.54	-0.90	-0.44	-2.74
2	-3.35	-20.26	-11.79	-2.20	-0.51	-1.88
6	-0.14	-4.75	-3.57	-0.67	-1.34	-1.42
7	-0.68	-14.81	-6.00	-1.39	-6.49	-2.29
15	+1.15	-6.48	-3.54	-0.62	-2.59	-1.76
27	-3.60	-9.37	-5.57	-0.86	-4.62	-1.30
30	-0.18	-2.06	-4.25	-0.37	+0.38	-0.33
32	+1.58	-4.95	-4.50	-0.61	-3.57	-12.40
35	-1.56	-8.10	-2.79	-0.95	-2.97	-2.11
69	+0.16	-0.01	+0.04	+0.03	+0.26	+0.26
70	+0.07	-4.39	-2.39	-0.42	-2.81	-0.81
150	+1.17	-9.71	-4.96	-0.99	-4.73	-2.63
151	-1.38	-8.38	-3.96	-0.55	-4.84	-1.57
155	-1.73	-5.09	-3.68	-0.45	-1.94	+0.89
156	-0.01	-7.77	-3.04	-0.77	-2.34	-2.25
157	+0.13	-5.14	-1.43	-0.65	-1.63	-0.68
159	+1.36	-3.95	-2.50	-0.39	-1.17	-0.04
165	+0.75	-10.04	-3.86	-0.66	-1.98	-0.62
174	0.00	-6.84	-6.11	-0.85	-4.37	-2.62
189	-0.71	-3.38	-1.57	-0.48	-3.31	+0.30

В 2011 году только 13 из 120 значений коэффициентов концентраций во всех точках отбора проб по всем веществам (6 веществ \* 20 точек отбора = 120) были ниже 1, то есть соответствовали категории «загрязнение отсутствует».

В 2013 году количество значений коэффициентов концентрации меньше 1 увеличилось до 54 из 120, то есть на 35%. Содержание в органогенном горизонте почв (О) никеля снизилось до уровня «загрязнение отсутствует» практически во всех точках отбора проб. Значительно увеличилось число «чистых» точек по хрому и кобальту.

С помощью нахождения уравнения тренда в каждой точке отбора проб составлен прогноз загрязнения территории в 2020 и в 2030 годах. Прогноз составлен при условии, что технологии добычи и переработки железной руды, а также технологии очистных сооружений и системы обращения с отходами производства останутся на уровне 2013 года.

Прогноз показывает, что в 2020 году число значений концентраций с категорией «загрязнение отсутствует» увеличится до 80 из 120, а в 2030 году количество таких значений достигнет 93 из 120 (Рис. 29).

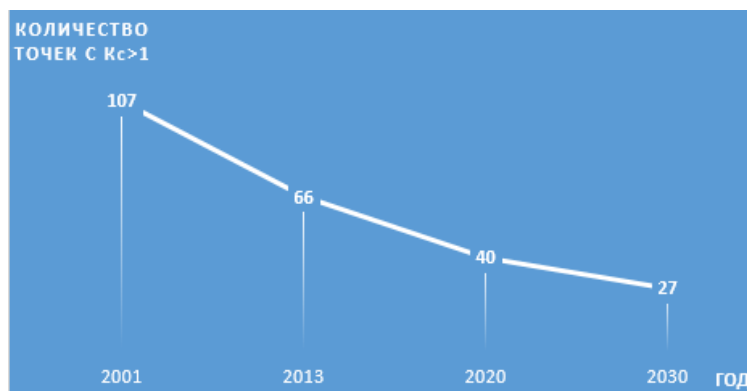


Рис. 29. Прогнозный график уменьшения числа точек с  $K_c > 1$  со временем

Учитывая высокий темп разработки и внедрения экологически чистых технологий в производство, можно допустить, что уменьшение уровня загрязнения до 2030 года будет происходить ещё более интенсивно, чем предполагается.

На Рис. 30 визуализировано уменьшение площади территорий с «чрезвычайно высоким», «высоким» и «средним» уровнем загрязнения с 2001 по 2030 года для одного из самых характерных поллютантов железорудного производства – Fe.

Анализируя прогнозное уменьшение уровня загрязнения по Fe (Рис. 30), нужно отметить, что в 2001 году 99% территории имел статус «среднее/высокое/чрезвычайно высокое загрязнение». К 2030 году только 40% территории будет испытывать техногенную нагрузку. Причем уровень воздействия значительно снизится в пределах аномальных зон карьеров и северо-западного канала (аномальные зоны № 1, 2, 3, 4, 6). К 2030 году аномальные зоны № 3 и 4 полностью исчезнут (перейдут в статус фоновых территорий).

Сильно улучшится экологическое состояние органогенного горизонта почв в аномальной зоне Южного карьера. Практически на всей территории аномальной зоны уровень загрязнения изменится с «чрезвычайно высокого/высокого» на «средний».

Критическая ситуация вплоть до 2030 года останется в аномальной зоне Южного канала (№ 5). Для стабилизации обстановки в этой зоне предприятию нужно перейти на полностью замкнутую систему водоснабжения производства, чтобы прекратить попуски воды из хвостохранилища в Южный канал.

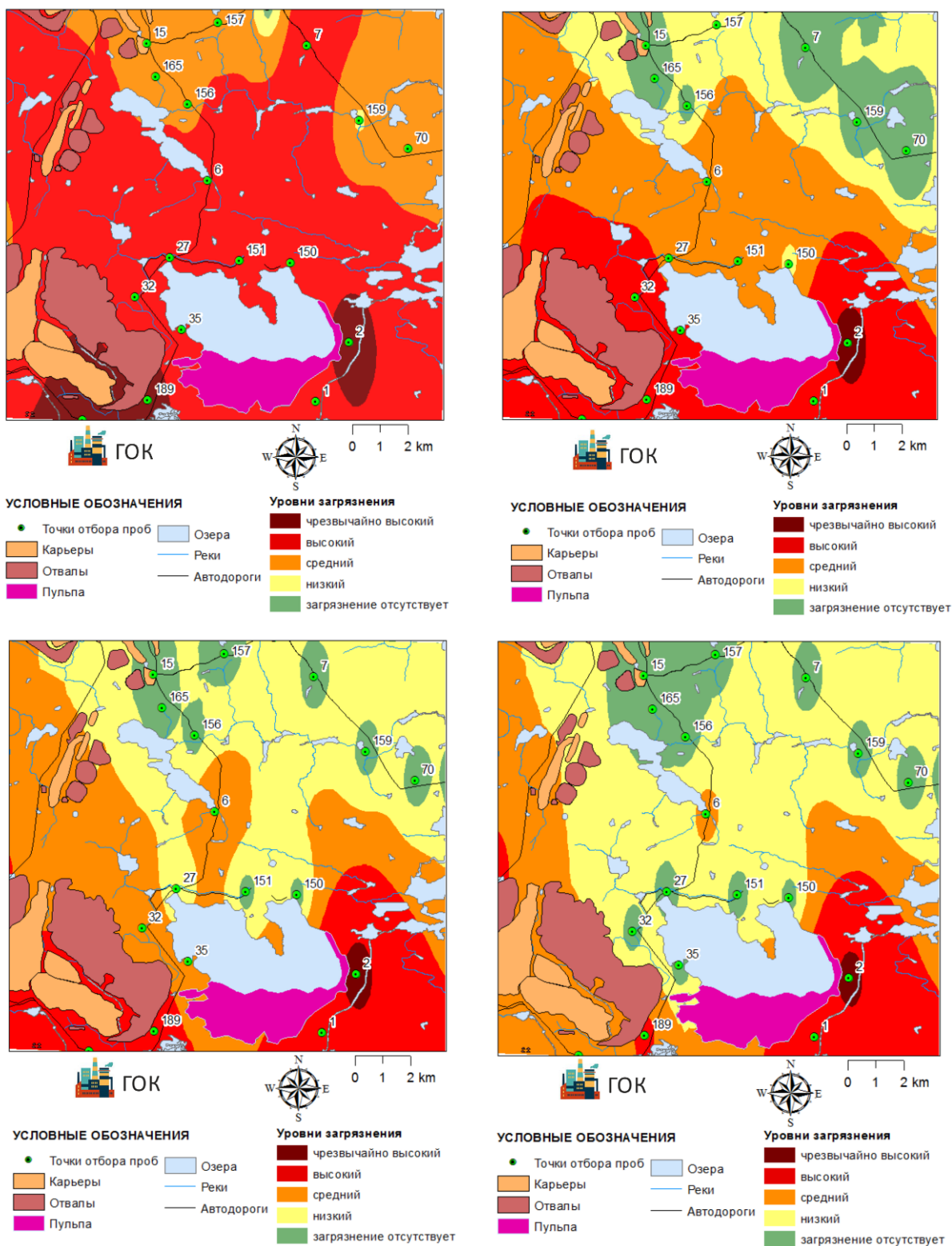


Рис. 30. Карты коэффициента концентрации Fe в 2001 (левая верхняя карта), в 2013 (правая верхняя), в 2020 (левая нижняя) и в 2030 (правая нижняя) годах

В целом по территории исследования прослеживается перспектива улучшения экологического состояния окружающей среды. На это есть несколько причин.

Во-первых, активно проходят процессы самовосстановления экосистем за счёт латерального и глубинного рассеивания поллютантов. Большую часть территории занимают болота, которые являются «естественным сорбентом» загрязнителей. Важную роль в процессе самоочищения играют донные осадки, которые связывают загрязнители в слабо подвижные формы и аккумулируют их.

Во-вторых, как заявляют в пресс-центре предприятия, в период с 2001 по 2013 года проводились активные мероприятия по охране окружающей среды, что свело к минимуму выбросы в атмосферу, почву, воду. В частности, за этот период были улучшены системы водо- и газоочистки предприятия, в 2011 году была установлена автоматизированная система уровня и расхода воды. На предприятии работает мини-завод по переработке пустой породы в щебень мощностью 65 000 тонн в месяц. Щебень используется для отсыпки дорог карьеров. Также проводится рекультивация территорий, например, с помощью ивы.

Однако также нужно обратить внимание на систематические расхождения, вызванные различными методиками опробованиями. Кроме того, пробы 2001 и 2013 года различны по составу. В 2001 году содержание органического материала составила порядка 40%, а в 2013 – порядка 70%. Эти факторы могут оказывать существенное влияние на полученные результаты.

## **5. Обсуждение результатов исследования**

### **5.1. Источники поступления поллютантов в аномальные зоны**

**Аномалия №1** обусловлена:

- постепенно оседающей из атмосферы пылью, поступающей с газами трёх обжиговых машин из цеха по производству окатышей ГОКа. Качественный анализ пыли электрофильтров обжиговых машин показал содержание в ней As, Ni, Co, Cr.
- постепенно оседающей из атмосферы пылью, разносимой ветром с отвалов горных пород, содержащей изоморфные замещения и минералы-примеси As, Ni, Co, Cu, Fe, Cr.
- постепенно оседающей из атмосферы пылью, разносимой ветром во время взрывных работ по добыче сульфидной руды, содержащей изоморфные замещения и минералы-примеси As, Ni, Co, Cu, Fe, Cr;
- работой техники на бензиновом топливе с содержанием As, Ni, Co, Cu, Fe.

Наиболее подвержены воздействию поллютантов в пределах Аномалии №1 области северо- восточной и юго-восточной окраины отвалов.

**Аномалия №2** обусловлена:

- постепенно оседающей из атмосферы пылью, разносимой ветром с отвалов горных пород, содержащей изоморфные замещения и минералы-примеси As, Ni, Co, Cu, Fe, Cr.
- постепенно оседающей из атмосферы пылью, разносимой ветром во время взрывных работ по добыче сульфидной руды, содержащей изоморфные замещения и минералы-примеси As, Ni, Co, Cu, Fe, Cr;
- работой техники на бензиновом топливе с содержанием As, Ni, Co, Cu, Fe.

**Аномалия №3** обусловлена работой техники на бензиновом топливе с содержанием As, Ni, Co, Cu, Fe.

**Аномалия №4** прослеживается только в минеральном горизонте и обусловлена:

- миграцией подвижных форм по каналу сточных рудничных и подотвальных вод в подземные воды;
- последующей миграцией подвижных форм в подземных водах, динамически связанных с отвалами, отводным (северо-западным) каналом сточных вод, хвостохранилищем.

Размеры аномалии в минеральном горизонте зависят от степени водопроницаемости грунтов (мелко- и среднезернистые грунты с коэффициентом фильтрации  $K_f=1 - 5$  относятся к водопроницаемым (ГОСТ25100-95)).

**Аномалия №5** ассоциируется:

- с переносом частиц пульпы, содержащей поллютанты и находящихся выше уровня озера, во время сезонных межелей, по средствам поверхностного дождевого стока, паводков и ветра;
- с поступлением поллютантов из обводного канала
- непосредственно с местами сброса пульпы в хвостохранилище;
- с возможными утечками пульпы при авариях на пульпопроводе.

Наблюдаемые повышенные концентрации в пределах **аномалии №5** в минеральном горизонте почв связаны с:

- проникновением из органического горизонта на глубину подвижных форм;
- их переносом подземными (грунтовыми) водами из хвостохранилища и обводного (Южного) канала на прилегающую территорию.

## **5.2. Мероприятия по снижению экологических рисков для населения, рекомендованные предприятию**

В пределах территории исследования во время полевых работ были неоднократно замечены люди, собирающие грибы и ягоды; а вдоль автодорог стоят пункты приема ягод от населения. В связи с этим рекомендуется в первую очередь на въездах и выездах в зону с высоким и средним уровнем загрязнения на обочине автодорог поставить хорошо

читаемые таблички, информирующие о въезде/выезде из зоны загрязнения и об опасности сбора лесных пищевых ресурсов (грибов, ягод, лечебных трав) в пределах этих зон. Аналогичные информационные стенды рекомендуется установить по периметру зон на лесных тропинках.

В целях реализации прав населения на возможность получения экологической информации в свободном доступе в соответствии с федеральным законом «Об охране окружающей среды», необходимо размещение результатов исследования на сайте региональных органов власти, предприятия \*\*\*, в печатных и телевизионных средствах массовой информации.

Для преобразования результатов исследования в научно-популярную форму, а также для дальнейшего сотрудничества, с предложениями и пожеланиями по улучшению работы обращайтесь к автору по адресу электронной почты: [napetre@mail.ru](mailto:napetre@mail.ru) (Шайтанов Антон Владимирович).

## Заключение

В ходе проделанной исследовательской работы была выполнена полиэлементная эколого-геохимическая, интегральная и пространственно-временная оценка загрязнения территорий, прилегающих к железорудному предприятию.

Решение поставленных задач дало следующие результаты:

1. По итогам математической обработки данных и анализа цифровых моделей картографических материалов выделены «фоновая» и аномальные территории, а также выявлены основные элементы-загрязнители: As, Cd, Cr, Cu, Ni, Zn и Fe. Территория подвержена техногенному воздействию в радиусе 2-4 км от производственных объектов.
2. По средствам факторного анализа оценен вклад каждого источника в образование аномальных зон. Выяснено, что 70% загрязнения обусловлено отходами производства, 30% - выбросами ГОКа. Для каждой из аномальных зон выявлены типичные элементы-загрязнители и рассчитаны коэффициенты радиальной миграции.
3. Описаны механизмы поступления поллютантов в аномальные зоны: через озерно-речную сеть и воздушным путём.
4. Расчёт интегрального показателя и его сравнение с оценками коэффициентов концентрации выявили сильные стороны методики интегральной оценки и определили пути дальнейшего развития методики.
5. Прогноз загрязнения до 2030 года выявил тенденцию к восстановлению экосистем.

В работе представлена характеристика (описание) категорий загрязнения ландшафта по интегральному показателю.

Полученные результаты могут быть использованы для организации регулярного мониторинга территорий с повышенной техногенной нагрузкой.

## Литература

1. Буренков Э.К. и др. (ред.). Требования к производству и результатам многоцелевого геохимического картирования масштаба 1- 1 000 000
2. ГН 2.1.5.1315-03 Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в воде водных объектов хозяйственно-питьевого и культурно-бытового водопользования
3. ГН 2.1.7.2041-06. Предельно допустимые концентрации (ПДК) химических веществ в почве
4. ГН 2.1.7.2042-06. Ориентировочно допустимые концентрации (ОДК) химических веществ в почве
5. ГОСТ 17.4.1.02-83 Охрана природы. Почвы. Классификация химических веществ для контроля загрязнения
6. ГОСТ 25100-95 Грунты. Классификация.
7. Ежегодные отчеты по мониторингу окружающей среды в районе технического воздействия ОАО «\*\*\*», Цех технического контроля и лабораторных исследований, ОАО «\*\*\*», 1987 – 2011 гг.
8. Иванюкович Г. А. Статистический анализ экогеологических данных, Санкт-Петербург, 2010.
9. Ильяш В.В. Методика обработки данных литогеохимических съемок, ВГУ, 2004г.
10. Куриленко В. В. Основы управления природо- и недропользованием. Экологический менеджмент. СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2000.
11. МУ 2.1.7.730-99 Гигиеническая оценка качества почвы населенных мест
12. Опекунов А. Ю., Опекунова М. Г. Интегральная оценка загрязнения ландшафта с использованием функции желательности Харрингтона, Вестник Санкт-Петербургского университета, вып. 4, 2014
13. Опекунова М. Г. Биоиндикация загрязнений, Учеб. пособие. - СПб.: Изд-во С.-Петерб. ун-та, 2004. - 266 с.
14. Отчет «Экологическая оценка состояния г. \*\*\* и прилегающей территории», СПбГУ, Санкт-Петербург, 1999 г.
15. Отчет по мониторингу геологической среды в районе \*\*\* месторождения в 1999-2002 г.г., 2009 г.
16. Отчет по научно-исследовательской практике «Геоэкологические полевые исследования», СПбГУ, 2015г.
17. Пантелеева Я.Г. Геохимические изменения окружающей среды в зоне влияния промышленного комплекса ОАО «\*\*\*», СПГИ (ГУ), Санкт-Петербург, 2008.



18. Пантелеева Я.Г. Отчет «Экологически опасные элементы и минералы в сырье, продуктах и отходах ОАО «\*\*\*» и уровни накопления загрязняющих веществ в окружающей среде», Марченко А.Г., СПГГИ (ГУ), Санкт-Петербург, 2006 г.
19. Полянин В. С. Региональная геоморфология и геология четвертичных отложений. Учебно-методическое пособие, Казань: Казанский государственный университет, 2009.
20. Программа мониторинга состояния геологической и окружающей среды \*\*\* горнопромышленного района, включая территории, примыкающие к карьерам, ГОК и г. \*\*\* на период 2013 – 2015 г.г. ГГУП «Минерал», Санкт-Петербург, 2012.
21. Санитарные правила СП 2.1.7.1386-03 по определению класса опасности токсичных отходов производства и потребления
22. СанПиН 2.1.7.1287-03 Почва, очистка населенных мест, бытовые и промышленные отходы, санитарная охрана почвы
23. Селенок Л.М. Оценка фонового состояния окружающей среды в пределах \*\*\* лицензионного участка. ГГУП «Минерал», Санкт-Петербург, 2012 г.
24. СП 11-102-97. Инженерно-экологические изыскания для строительства
25. Цветкова А. Ю. Эколого-экономическая эффективность комплексного использования железорудных месторождений, Национальный минерально-сырьевой университет «Горный», СПб, 1994
26. <http://100formul.ru/tchkprp15> – онлайн калькулятор.
27. <http://www.interfax.ru/russia/357470> - INTERFAX.RU, 2014г.
28. <http://gazeta19.ru/news/41135> – электронная газета.
29. [http://uralpolit.ru/news/society/news\\_event/vosem-vagonov-tovarnyaka-soshli-s-relsov-na-stantsii-druzhinino](http://uralpolit.ru/news/society/news_event/vosem-vagonov-tovarnyaka-soshli-s-relsov-na-stantsii-druzhinino) – новостной электронный ресурс.

# Приложения

Приложение 1

## Отзыв руководителя выпускной квалификационной работы

**ОТЗЫВ РУКОВОДИТЕЛЯ ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ**

Тема выпускной квалификационной работы: Интегральная оценка и динамика загрязнения ландшафта в зоне воздействия железорудного предприятия

Автор (ФИО) Шайтанов Антон Владимирович  
 Институт наук о Земле (Санкт-Петербургский государственный университет)

Кафедра геоэкологии и природопользования

Основная образовательная программа «Геоэкологический мониторинг и рациональное природопользование»

Уровень: магистратура

Руководитель Сенькин Олег Владимирович, доцент кафедры геоэкологии природопользования СПбГУ, доцент, канд. геогр. наук

Требования к профессиональной подготовке	Соответствуют	В основном соответствуют	Не соответствуют
уметь корректно формулировать и ставить задачи (проблемы) своей деятельности при выполнении ВКР, анализировать, диагностировать причины появления проблем, определять их актуальность	+		
устанавливать приоритеты и методы решения поставленных задач (проблем);	+		
уметь использовать, обрабатывать и анализировать современную научную, статистическую, аналитическую информацию;	+		
владеть современными методами анализа и интерпретации полученной информации, оценивать их возможности при решении поставленных задач (проблем)	+		
уметь рационально планировать время выполнения работы, определять грамотную последовательность и объем операций и решений при выполнении поставленной задачи;	+		
уметь объективно оценивать полученные результаты расчетов и вычислений;	+		
уметь анализировать полученные результаты интерпретации географических и геоэкологических данных;	+		
знать и применять методы системного анализа;	+		
уметь осуществлять междисциплинарные исследования;	+		
уметь делать самостоятельные обоснованные и достоверные выводы из проделанной работы	+		
уметь пользоваться научной литературой профессиональной направленности	+		

уметь применять современные графические, картографические, компьютерные и мультимедийные технологии в исследовании	+		
уметь использовать картографические методы с применением ГИС	+		

Отмеченные достоинства работы: Собранный автором большой фактический материал позволил оценить загрязнения компонентов природной среды при добычи и первичной переработки железной руды, а применение интегральной оценки загрязнения сделать достоверные выводы об экологическом состоянии изучаемой территории. Важным достоинством работы является применение математических методов и компьютерных технологий при создании картографических материалов.

Отмеченные недостатки работы: Слишком кратко изложены аналитические методы, применяемые при определении содержания поллютантов.

Заключение руководителя: За время работы над магистерской диссертацией Шайтанов А.В. продемонстрировал умение самостоятельно добывать, анализировать и интерпретировать полученную информацию, в том числе с применением компьютерных технологий. Выпускная квалификационная работа Шайтанова А.В. соответствует требованиям, предъявляемым к магистерским диссертациям, а его работа над ней заслуживает высокой оценки.

Руководитель \_\_\_\_\_ «05» мая 2016 г.



Отзыв рецензента выпускной квалификационной работы

ОТЗЫВ РЕЦЕНЗЕНТА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Тема выпускной квалификационной работы: ИНТЕГРАЛЬНАЯ ОЦЕНКА И ДИНАМИКА ЗАГРЯЗНЕНИЯ ЛАНДШАФТА В ЗОНЕ ВОЗДЕЙСТВИЯ ЖЕЛЕЗОРУДНОГО ПРЕДПРИЯТИЯ  
 Автор (ФИО) ШАЙТАНОВ Антон Владимирович  
 Институт наук о Земле (Санкт-Петербургский государственный университет)  
 Кафедра ГЕОЭКОЛОГИИ И ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЯ  
 Основная образовательная программа ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЙ МОНИТОРИНГ И РАЦИОНАЛЬНОЕ ПРИРОДОПОЛЬЗОВАНИЕ  
 уровень МАГИСТРАТУРА

Руководитель Сенькин Олег Владимирович, доцент, СПбГУ, к. г. н.  
 (ФИО, место работы, должность, ученое звание, ученая степень)  
 Рецензент Богатырев Игорь Валентинович, Санкт-Петербургское государственное геологическое унитарное предприятие «Специализированная фирма «Минерал»,  
 заместитель директора по информатике.

ОЦЕНКА СООТВЕТСТВИЯ ТРЕБОВАНИЯМ К ПРОФЕССИОНАЛЬНОЙ ПОДГОТОВКЕ АВТОРА ВЫПУСКНОЙ КВАЛИФИКАЦИОННОЙ РАБОТЫ

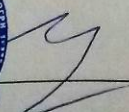
Требования к профессиональной подготовке	5	4	3	2	1	*
Актуальность темы работы	+					
Степень полноты обзора состояния вопроса и корректность постановки задачи	+					
Уровень и корректность использования в работе методов исследования, математического моделирования, расчетов и т.п.;		+				
Степень комплексности работы, применение в ней знаний общепрофессиональных и специальных дисциплин;	+					
Ясность, четкость, логичность исследования, последовательность и обоснованность изложения;		+				
Применение современных информационных технологий;	+					
Качество оформления (общий уровень грамотности, стиль изложения, качество выполнения графического материала, его соответствие тексту);		+				
Оригинальность и новизна полученных результатов, научно-исследовательских или прикладных решений;	+					
Степень самостоятельности выполненной работы;	+					

\* - не оценивается (трудно оценить)

Отмеченные достоинства работы **Привлечение к работе большого объема данных; Комплексный анализ имеющейся информации с учетом широкого круга факторов при оценке параметров загрязнения территории; Применение современных методов обработки и интерпретации данных;**

Отмеченные недостатки работы **Недостаточно корректное использование аппарата регрессионного анализа при долгосрочном прогнозировании загрязнений в условиях малого количества данных**

Заключение рецензента **Рецензируемая выпускная квалификационная работа может быть рекомендована к защите и заслуживает оценки «отлично».**

Рецензент  «05» мая 2016 г.

