На правах рукописи

Наход Виталий Александрович

ВЛИЯНИЕ РАЗРАБОТКИ МЕСТОРОЖДЕНИЯ ГИПСА «ГЛУБОКОЕ» НА БИОГЕОЦЕНОЗ УЧАСТКА НЕДР ЧУГСКАЯ ПЛОЩАДЬ

Специальность: 1.6.21. – Геоэкология

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата геолого-минералогических наук

Архангельск — 2026

Диссертационная работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Федеральном исследовательском центре комплексного изучения Арктики имени академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (ФИЦКИА УрО РАН)

Научный руководитель:

Малов Александр Иванович – доктор геолого-минералогических наук, директор Института геодинамики и геологии ФГБУН Федерального исследовательского центра комплексного изучения Арктики им. академика Н.П. Лаверова Уральского отделения Российской академии наук (ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН), главный научный сотрудник лаборатории экологической радиологии Института геодинамики и геологии ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН

Официальные оппоненты:

Экзарьян Владимир Нишанович – доктор геолого-минералогических наук, профессор, заслуженный эколог РФ, заведующий кафедрой экологии и природопользования ФГБОУ ВО «Российский государственный геологоразведочный университет имени Серго Орджоникидзе» (МГРИ)

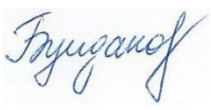
Родькина Ирина Алексеевна – кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник кафедры инженерной и экологической геологии Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова», Геологический факультет

Ведущая организация:
Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Федеральный исследовательский центр "Карельский научный центр Российской академии наук"

Защита диссертации состоится 20 октября 2026 года в 14-00 часов на заседании Диссертационного совета 24.1.054.01 при ФГБУН «Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева Российской академии наук» по адресу: 109004, Москва, ул. Николоямская, д. 51.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Институте геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН по адресу: 101000, Москва, Уланский пер., д. 13, стр. 2.

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2026 года.

Ученый секретарь
Диссертационного совета,
кандидат географических наук  Е.В. Булдакова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Одним из ключевых элементов ресурсного потенциала выступают месторождения общераспространённых полезных ископаемых. Они служат сырьевой базой для дорожного строительства, производства стройматериалов и других отраслей. Годовые объемы добычи многих видов строительного сырья сопоставимы с масштабами добычи угля и иных полезных ископаемых. На месторождении гипса «Глубокое» на протяжении последних пяти лет отмечается стабильный уровень добычи при значительном (38%) приросте объемов отгрузки продукции в период с 2020 по 2024 годы.

Добыча гипсового камня неизбежно сопряжена с существенным вмешательством в природные системы. Преобладающий открытый (карьерный) способ разработки гипсовых месторождений, стимулируемый постоянно растущим спросом на стройматериалы, оказывает наиболее масштабное и видимое негативное воздействие на окружающую среду. Оно проявляется в загрязнении атмосферы, поверхностных и подземных вод, деградации земельных ресурсов, а также влияет на здоровье человека.

Особую значимость придает ситуации то, что гипсовые субстраты являются местом обитания множества редких видов, строго приуроченных к таким почвам. Исследования (Mota 2003 и др.) подтверждают уникальную природоохранную ценность гипсовых почв провинции Альмерия (Испания) из-за их флористического богатства и редкости, несмотря на интенсивную разработку карьеров — крупнейших в Европе по производству гипса. На территории месторождения «Глубокое» выявлены редкие и охраняемые виды эпифитных лишайников: Bryoria fremontii и Lobaria pulmonaria, а также копрофильный мох Tetraplodon angustatus. Непосредственно к границе горного отвода примыкает территория Чугского государственного природного ландшафтного заказника регионального значения (ООПТ). Это подчеркивает актуальность изучения влияния разработки месторождения на биогеоценоз района.

Степень разработанности темы. Анализ литературы показывает, что имеется значительный объем работ, посвященных оценке экологических последствий добычи твердых полезных ископаемых, таких как каменный уголь, руды металлов и их промышленной переработки. Эти исследования детально описывают механизмы химического загрязнения атмосферы (пыль, выбросы от техники), водных объектов и донных отложений (сточные воды, смыв с отвалов), деградации почв и трансформации ландшафтов (Даувальтер и др., 2010; Гашкина и др., 2015; Шевченко и др., 2021; Hou et al., 2019; Mardonova, Han, 2023; Arooj et al., 2024; Li et al., 2024). Изучены гидрогеохимические особенности и миграция элементов в условиях криолитозоны и таежных ландшафтов (Шварцев, 2005; Новиков, 2017; Савичев, 2019; Солдатова и др., 2022). Разработаны методологии оценки химического загрязнения окружающей среды (индексы геоаккумуляции, загрязнения и обогащения, экологического риска) и его влияния на биоту (Müller, 1969; Hakanson, 1980; Long et al., 2006; MacDonald et al., 2000). Имеются работы по оценке радоноопасности пещерных комплексов в карстующихся породах (Bezuidenhout and le Roux, 2024; Ogunjo et al., 2024, Miklyaev et al., 2024). Последовательно изучается влияние взрывных работ при добыче полезных ископаемых на сейсмическую устойчивость различных сооружений и горных массивов (Башков и др., 2016; Жариков и др., 2019; Куликов, Ганопольский, 2018); в том числе имеются единичные работы по оценке устойчивости карстовых пещер (Железняк, Манилюк, 2017).

Однако анализ воздействия гипсо-добывающей промышленности на окружающую среду в мировой литературе крайне ограничен и не раскрывает деталей (Al-Harthi, 2001; Misuko, 2016; Mardonova, Han, 2023). Особенно это касается комплексных исследований системы «атмосфера — снег — поверхностные и подземные воды — почвы — донные отложения — биота», включающих изучение изменений химических и радиоактивных составляющих экологического воздействия в условиях северной тайги. Также недостаточно изучено сейсмическое воздействие на уникальные карстовые формы рельефа и ихтиофауну при взрывных работах на гипсовых карьерах. В данной диссертационной работе предпринята попытка восполнения указанных

пробелов на основе многолетнего мониторинга с использованием современных методов полевых и аналитических исследований и анализа полученных результатов.

Цели и задачи исследования.

Целью данной работы является оценка воздействия разработки месторождения гипса на биогеоценоз с определением источников загрязнения, интенсивности переноса вредных веществ, радиационной составляющей, степени влияния на растительный и животный мир, а также на карстовый рельеф Чугского заказника. Для достижения поставленной цели определены основные задачи:

1. Выявление основных источников загрязнения окружающей среды.
2. Определение степени загрязнения снежного покрова, вод, донных отложений и почв.
3. Комплексное исследование изменения радиационного фона.
4. Определение фактического сейсмического воздействия на природоохранный объект при рутинной деятельности предприятия и при ведении взрывных работ.
5. Оценка состояния растительного покрова и животного мира в зоне воздействия месторождения гипса «Глубокое».
6. Количественная оценка антропогенного воздействия разработки месторождения гипса «Глубокое» на биогеоценоз участка недр Чугская площадь.
7. Практические рекомендации по снижению антропогенного воздействия.

Объект исследования: Биогеоценоз участка недр Чугская площадь, включая: Чугский государственный природный ландшафтный заказник (уникальные карстовые формы рельефа, пещеры, редкие виды флоры и фауны), а также месторождение гипса «Глубокое» (технологические процессы добычи гипса, зоны антропогенного воздействия).

Предмет исследования: Комплексное воздействие разработки месторождения гипса «Глубокое» на геоэкологические компоненты, такие как качество сред (снег, почвы, воды, донные отложения), радиационный фон и радоноопасность территории, целостность карстовых форм рельефа; биотические компоненты: динамика растительных сообществ; состояние фауны (включая ихтиофауну подземных рек); жизненное состояние редких видов, а также сейсмические эффекты: распространение упругих волн от массовых взрывов.

Материалы и методы исследования. Материал для исследования был собран автором в ходе экспедиционных работ и последующего анализа на территории гипсового месторождения «Глубокое» (Холмогорский район, Архангельская область) в период 2023–2025 гг. В методологической основе работы лежат классические концепции биогеоценоза по В.Н. Сукачеву и Г.А. Новикову, что позволило нам системно подойти к оценке объекта исследования. В программу работ входил отбор проб снежного покрова, поверхностных и подземных вод, почв и донных отложений с последующим определением их химического состава, радиоизотопных характеристик. Дополнительно использовались данные измерений мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения и плотности потока радона; сейсмического воздействия работы горного предприятия в штатном режиме и при проведении взрывных работ; данные мониторинга состояния биоценоза на фоновых и трансформированных горными работами пробных площадях; статистическая информация по загрязнению атмосферного воздуха.

Непосредственно в процессе отбора водных проб измерялись неустойчивые параметры: температура, pH, окислительно-восстановительный потенциал (Eh), электропроводность с использованием портативных приборов HANNA. В лабораторных условиях содержания микроэлементов определяли методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой. Макрокомпоненты определялись посредством атомно-абсорбционной спектрометрии, потенциометрического титрования и ионной хроматографии. В донных отложениях содержания микроэлементов определяли на атомно-эмиссионном спектрометре с индуктивно-связанной плазмой. Измерения активности изотопов урана выполняли альфа-спектрометрическим методом, а ^{137}Cs, ^{226}Ra, ^{232}Th и ^{40}K — гамма-спектрометрическим. Для определения мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения использовался дозиметр-радиометр, а для полевых

измерений плотности потока радона применялся измерительный комплекс «Альфарад плюс». При сейсмическом мониторинге использовалась сеть из пяти сейсмических велосиметров.

Все аналитические работы выполнены в аккредитованных лабораториях: экологической радиологии ФИЦКИА УрО РАН № RA.RU.21НА54, ФГБУ «ЦЛАТИ по Архангельской области» № РОСС RU.0001.511030 и ЦКП «Арктика» САФУ № RU.0001.21АЛ65.

Научная новизна исследования определяется разработкой и апробацией комплексной методологии к изучению химического, радиоактивного и сейсмического воздействия на экосистемы северной тайги, интегрирующей детальный анализ взаимосвязей в системе «снежный покров — поверхностные воды — почвы — донные отложения — биоценоз». Итогом применения полученной методологии является визуализация комплексного влияния деятельности горного предприятия на биогеоценоз с классификацией зон по степени воздействия. Разработанная методология позволяет перейти от констатации к прогнозу и управлению рисками.

Впервые установлено, что текущая деятельность горного предприятия не вызывает критических деформаций в горных породах Чугского заказника. По результатам экспериментальных исследований воздействия горнодобывающего предприятия на уникальные карстовые образования Чугского заказника получена эмпирическая зависимость скорости распространения сейсмических волн от массы заряда взрывчатого вещества. На ее основании определены максимальные величины массы зарядов, которые позволяют проводить массовые взрывы без риска воздействия на карстовый массив заказника.

Установлено, что деятельность предприятия вызывает локальные изменения радиоактивного фона: снижение гамма-излучения и плотности потока радона в карьере сопровождается повышением гамма-фона во вскрышных отвалах и ростом концентраций урана в карьерных водах.

Соответствие диссертации паспорту специальности. Диссертация соответствует пунктам 5 (Природная среда и индикаторы ее изменения под влиянием естественных природных процессов и хозяйственной деятельности человека (химическое и радиоактивное загрязнение биоты, почв, пород, поверхностных и подземных вод), наведенных физических полей, изменения состояния криолитозоны), 11 (Оценка экологического состояния и управление современными ландшафтами. Глобальные и региональные изменения ландшафтно-климатических условий среды обитания в антропоцене), 14 (Научные основы организации геоэкологического мониторинга природно-технических систем и обеспечение их экологической безопасности, разработка средств контроля состояния окружающей среды), 18 (Горно-геологическая природная среда и ее изменение при разработке месторождений полезных ископаемых, взаимодействие природных и технических систем в процессе недропользования), 24 (Теория и методы геоэкологической оценки существующих и создаваемых технологий добычи и переработки полезных ископаемых природного и техногенного происхождения, инженерная защита экосистем, прогнозирование, предупреждение и ликвидация загрязнений природной среды) паспорта специальности ВАК 1.6.21. Геоэкология (геолого-минералогические науки).

Теоретическая и практическая значимость исследования.

Данная работа носит экспериментальный характер, а, следовательно, содержит новые научные знания регионально-технологического уровня значимости, которые потенциально могут быть экстраполированы на другие территории с объектами добычи общераспространенных полезных ископаемых. Научная значимость исследования определяется методологическим обоснованием модели дифференцированного воздействия различных источников загрязнения ближнего и дальнего радиуса влияния и представлением в картографическом виде результатов оценки непосредственного воздействия карьерной добычи на биогеоценоз. Практическая значимость связана с возможностью использования как собственно полученных результатов, так и представленной в работе методологии для мониторинговых исследований на горнодобывающих объектах и подтверждается актами внедрения на производстве и в учебном процессе.

Работа выполнялась в соответствии с государственным заданием ФГБУН ФИЦКИА УрО РАН по проектам № 122011300333-1 «Особенности миграции элементов и их изотопов в абиотических компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений», № 122011400382-8 «Научные основы и социокультурные факторы сохранения и использования потенциала биологического разнообразия на Европейском Севере и в Арктике» и № 125022002727-2 «Особенности миграции элементов и их изотопов в компонентах окружающей среды Западного сектора Российской Арктики в условиях климатических и техногенных изменений».

Личный вклад автора заключался в опробовании снежного покрова, поверхностных вод, почв, донных отложений, в проведении работ по замерам сейсмического воздействия, в исследовании радиационного фона с проведением замеров плотности потока радона и мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучения, в участии в экспедиции по мониторингу флоры и фауны, а также в систематизации, обработке и анализе полученной информации с привлечением отечественных и зарубежных литературных источников.

Степень достоверности и апробация результатов исследования.

Достоверность результатов определяется использованием современного аналитического оборудования для получения исходной информации и выполнением исследований в аккредитованных лабораториях по аттестованных методикам.

Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на следующих конференциях: II Лавёровские чтения — Арктика: актуальные проблемы и вызовы, Архангельск, 2023; Двадцать четвертая Уральская молодежная научная школа по геофизике, Пермь, 2023; «Сергеевские чтения» Фундаментальные и прикладные вопросы инженерной геодинамики, Казань, 2023; IV Международная молодежная научно-практическая конференции «Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию», Архангельск, 2024; Юдахинские чтения, Архангельск, 2024; XIII Российская молодежная научно-практическая Школа «Новое в познании процессов рудообразования», Москва, 2024; XXVI Научная конференция «Сергеевские чтения» «Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества», Псков, 2025.

По теме диссертации опубликовано 17 печатных работ, в том числе 4 статьи в журналах из списка Web of Science и Scopus и 5 статей в журналах из списка ВАК.

Структура и объем диссертации.

Диссертационная работа состоит из введения, семи глав, заключения, списка литературы (183 наименований, из них 138 — иностранные источники). Общий объем: 188 страницы, включая 41 рисунок, 51 таблицу и 7 приложений.

Благодарности.

Искреннюю и глубокую благодарность автор выражает своему научному руководителю, д.г.-м.н. А. И. Малову, за неоценимую поддержку на всех этапах исследования, вдохновляющее руководство и исключительно ценные рекомендации, во многом определившие содержание и качество настоящей работы. Отдельная признательность адресована коллективу Института геодинамики и геологии имени чл.-корр. РАН Ф. Н. Юдахина за плодотворное сотрудничество, неизменную готовность к диалогу и бесценный опыт, полученный в ходе совместных экспедиций и научных изысканий.

Диссертационная работа выполнена под научным руководством доктора геолого-минералогических наук А. И. Малова.

Глава 1 обосновывает актуальность проведения комплексных геоэкологических исследований в связи с открытой добычей гипса на месторождении «Глубокое». Работа направлена на оценку воздействия разработки карьера на биогеоценоз уникальных северотаежных ландшафтов, включая трансформацию территории, нарушение водного баланса, загрязнение (атмосферное, водное, почвенное), фрагментацию среды обитания и угрозу биоразнообразию, в том числе редким видам. Особое внимание уделяется риску для примыкающего Чугского заказника с его уникальными карстовыми формами рельефа.

Исследование ставит целью детально изучить источники, перенос и степень химического загрязнения (включая тяжелые металлы) и радиоактивного воздействия (радон, уран-238, цезий-137 и др.) в системе «снег — вода — почва — донные отложения», применяя широкий спектр геохимических индексов и методов оценки экологического риска. Научная новизна работы заключается в восполнении пробела знаний о воздействии гипсодобычи в условиях северной тайги с помощью комплексного подхода.

Глава 2 характеризует природные условия района месторождения гипса «Глубокое» в Холмогорском районе Архангельской области. Район расположен в северной тайге, на Двинско-Мезенской низменности, вблизи реки Пинеги и граничит с Чугским ландшафтным заказником. Климат умеренно-континентальный, с холодной зимой и коротким прохладным летом, характеризуется избыточным увлажнением и устойчивым снежным покровом. Геологическое строение включает мощные толщи карбонатных и сульфатных пород (гипсы, ангидриты) пермского возраста, залегающих под четвертичными отложениями. Особенностью района является интенсивное развитие поверхностного и глубокого гипсового карста, представленного воронками, долинами и подземными полостями, со средней степенью закарстованности 22%. Гидрогеологические условия сложны и разнообразны: зона пресных вод ограничена, преобладают минерализованные сульфатные воды в пермских отложениях. Объект исследований — действующий карьер по добыче гипса (с 2008 г.) с проектной мощностью до 1 млн тонн в год.

Глава 3 описывает комплексную методологию исследования воздействия добычи на окружающую среду. Пробы снега, поверхностных вод, донных отложений и почв отбирались по стандартизированным протоколам с последующей лабораторной обработкой. Химический состав анализировался методами ИСП-МС, ионной хроматографии и атомно-абсорбционной спектрометрии; радионуклиды (уран-234 и -238, радий-226, торий-232, цезий-137, калий-40) определялись с помощью альфа- и гамма-спектрометрии. Для оценки загрязнения донных отложений применялись геохимические индексы (индекс геоаккумуляции *Igeo*, коэффициент загрязнения *Cfi*, степень загрязнения *Cd*, коэффициент обогащения *EF*) и показатели экологического риска (индекс потенциального экологического риска *RI*, коэффициенты *ERM-Q* и *mERM-Q*). Дополнительно определялись физико-химические параметры (pH, минерализация, содержание солей, органического вещества, карбонатов). Все методы соответствовали российским ГОСТ и международным стандартам.

В **4 главе** на основе анализа и обобщения полученных в ходе выполнения исследования экспериментальных, а также литературных данных установлена прямая зависимость между объемами производственной деятельности (вскрыша, потребление дизельного топлива) и выбросами основных загрязняющих веществ (SO_2, CO, NO_x, летучие органические соединения, неорганическая пыль). Последующий отбор и анализ проб снега выявил пространственный градиент содержания микроэлементов (Fe, Zn, Mo, Mn, Pb, Cu, Cr), убывающий с удалением от карьера и подтверждающий его роль как источника пылевого выноса тяжелых металлов. При таянии снега загрязнители мигрируют в поверхностные воды рек Позера и Чуга, где содержания меди достигают 2,9 мкг/л, а свинца 28 мкг/л. Растворение гипса обуславливает высокое содержание сульфатов (до 1540 мг/л), кальция (до 630 мг/л) и стронция (до 6406 мкг/л), многократно превышающее ПДК. В донных отложениях карстовых озер выявлены аномальные концентрации кадмия (до 1,3 мг/кг) и молибдена (до 9,9 мг/кг), связанные с техногенным переносом и сорбцией органическим веществом. Почвы в районе карьера демонстрируют повышенное содержание цинка (до 99 мг/кг), свинца (до 22 мг/кг) и кадмия (до 0,67 мг/кг). Расчет эколого-геохимических индексов показал низкий общий уровень экологического риска, с умеренным риском, связанным исключительно с загрязнением кадмием. Факторный анализ подтвердил преобладающую роль антропогенного фактора в накоплении элементов. Мониторинг фито- и зооценозов (2020–2023 гг.) не выявил признаков необратимой деградации. Наблюдаемые изменения носят адаптивный характер и связаны с естественными изменениями абиотических условий на нарушенных территориях.

В **главе 5** представлены результаты исследования влияния горных работ на карстовые формы рельефа Чугского заказника. Установлено, что рутинная деятельность карьера (эксплуатация техники) не представляет угрозы геоморфологической стабильности охраняемой территории. Массовые взрывы (проводимые 10-12 раз в год с применением до 300 тонн взрывчатых веществ) показали ожидаемое затухание воздействия с увеличением расстояния; на границе заказника (780-1179 м) пиковые скорости колебаний не превышали 0,0071 м/с, что соответствует всего 2-3 баллам по сейсмической шкале Медведева С.В. и является безопасным для целостности ближайшей пещеры «Апрельский Узел». При этом внутри контура карьера были зафиксированы превышения некоторых международных нормативов вибрации (до 430% по DIN 4150-3:1999). Для сценария приближения фронта работ к буферной зоне рассчитаны строгие ограничения по массе одновременно взрываемого ВВ (например, не более 51 кг на минимальном расстоянии 200 м) для предотвращения превышения безопасного порога колебаний (0,008 м/с). Воздействие взрывов на пещерную ихтиофауну подземных рек оценено как минимальное: максимальная плотность энергии ударной волны (0,2334 Дж/м²) на расстоянии 249 метров составила лишь 0,15% от установленного безопасного порога (150 Дж/м²), что подтверждает экологическую адекватность существующей буферной зоны. Общие выводы главы подчеркивают, что текущая деятельность карьера и установленная буферная зона обеспечивают сохранность уникальных карстовых форм и биоты заказника при существующих горных работах, однако для сохранения этой устойчивости критически важен постоянный мониторинг сейсмических параметров и строгое соблюдение превентивных мер, включая рассчитанные ограничения по массе ВВ.

В **главе 6** представлены результаты исследования радиационного фона месторождения гипса «Глубокое». Установлено, что карьерные воды содержат повышенные концентрации урана (до 7,34 мкг/л) и связанную с распадом его изотопов суммарную альфа-активность (0,202 Бк/л), превышающую ПДК для питьевой воды (0,2 Бк/л). Источником урана являются вскрышные моренные суглинки, складированные в отвалах. В донных отложениях максимальные активности ^{137}Cs (до 20,8±3,0 Бк/кг), ^{238}урана (73±11 Бк/кг), ^{234}урана (89,5±13,4 Бк/кг) и ^{226}Ra (23,5±3,6 Бк/кг) выявлены в озерах с высоким содержанием органики и карбонатов, что коррелирует с антропогенным влиянием горных работ. Средние активности ^{226}Ra (18,0±2,6 Бк/кг), ^{232}Th (9,61±1,68 Бк/кг) и ^{40}K (320±37 Бк/кг) ниже среднемировых значений. Мощность дозы гамма-излучения (11–69 нЗв/ч) максимальна на отвалах вскрышных пород. Плотность потока радона достигает 181±54 мБк/(м²с) на участках с ненарушенными моренными суглинками, тогда как гипсовые обнажения в карьере минимизируют эманацию (6–18 мБк/(м²с)). Радиационный фон обусловлен преимущественно естественными факторами при локальном влиянии горных работ.

В **главе 7** представлено методологическое обоснование модели дифференцированного воздействия различных источников загрязнения ближнего и дальнего радиуса влияния (Рисунок 1) и результаты геоэкологического картографирования непосредственного воздействия карьерной добычи на биогеоценоз, с особым вниманием к оценке загрязнения и сейсмического влияния на особо охраняемую природную территорию — Чугский заказник. Для комплексной оценки использован метод наложения тематических картографических слоев, отражающих влияние на различные компоненты среды: атмосферу (через загрязнение снега), поверхностные воды, донные отложения и геоморфологические условия (сейсмическое воздействие от взрывных работ). Результаты показали, что наиболее значимое экологическое воздействие связано не с прямыми выбросами, а с процессами вторичного загрязнения донных отложений тяжёлыми металлами. На основе интегральной оценки четырёх тематических слоёв построена комплексная карта воздействия, выделено 15 подклассов зон — от слабого до критического уровня влияния. Полученная карта наглядно демонстрирует пространственную неоднородность и многофакторность техногенной нагрузки (Рисунок 2).



Рисунок 1. Схема воздействия загрязнений на компоненты окружающей среды от различных источников

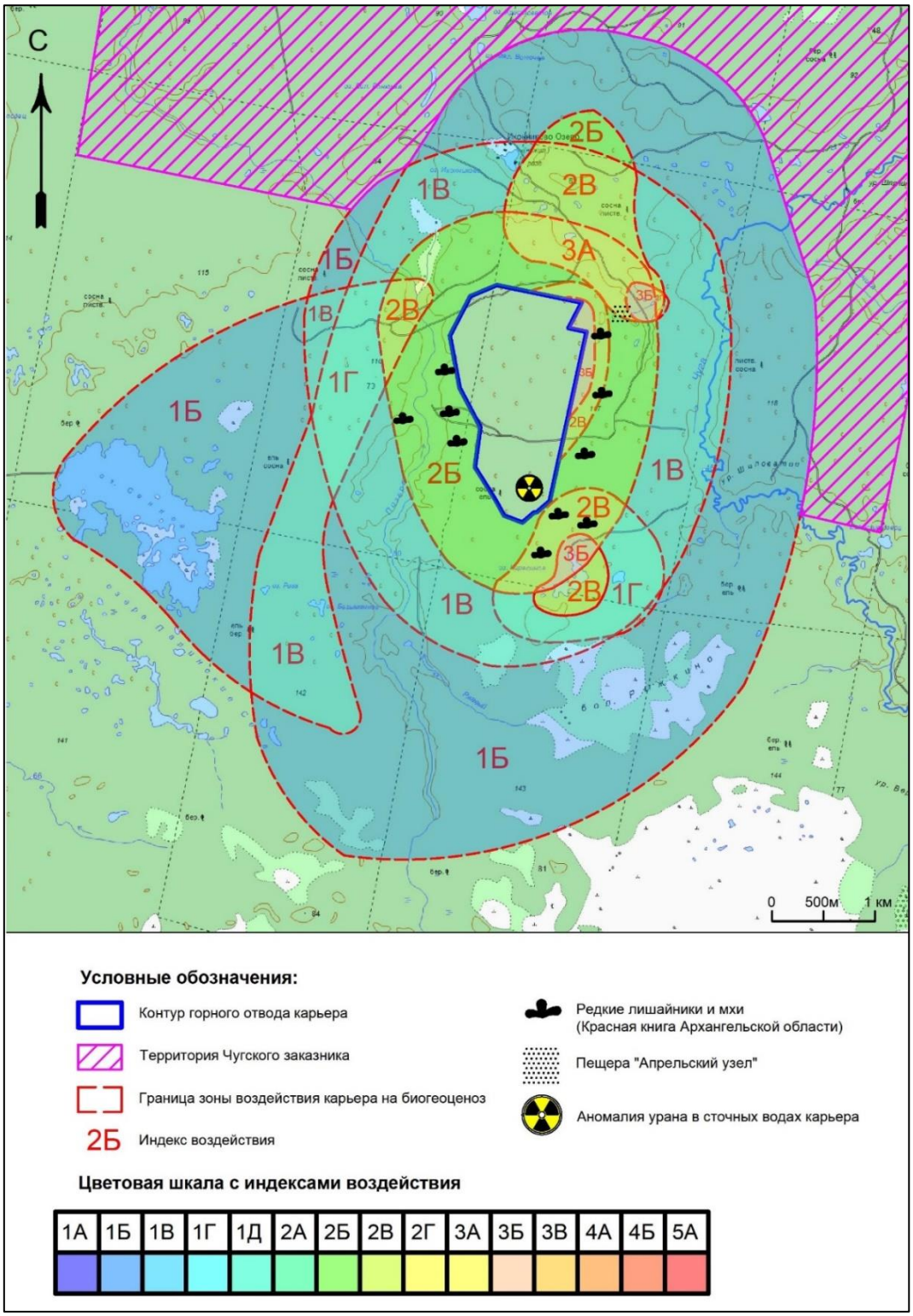


Рисунок 2. Комплексная карта воздействия гипсового карьера на биогеоценоз. 1 – Слабое (допустимое) воздействие, 2 – Локально-повышенное воздействие, 3 – Умеренное (ощутимое) воздействие, 4 Интенсивное (сильное) воздействие, 5 — Критическое (катастрофическое) воздействие

ЗАЩИЩАЕМЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И ИХ ОБОСНОВАНИЕ

1. Антропогенное загрязнение тяжелыми металлами экотопа обусловлено как региональным атмосферным переносом, так и горными работами. В целом, оно не должно вызывать неблагоприятных биологических эффектов, однако на отдельных локальных участках они возможны из-за загрязнения воды Zn, Cu и Pb; донных отложений Mo и Cd, почв Zn, Pb, Cd, Mn. Умеренный экологический риск для биоценоза, связанный с кадмием, характерен для донных отложений с высоким содержанием органики. Фито- и зооценоз за пределами карьера не испытывает необратимой деградации, а напротив наблюдаемые позитивные изменения имеют адаптивный характер и обусловлены, в первую очередь, изменением абиотических условий.

Детальный анализ данных статистической отчетности по форме 2-ТП (Воздух) за 12-летний период наблюдений (с 2013 по 2024 год) выявил устойчивые положительные корреляционные связи (коэффициент корреляции r > 0,98) между ключевыми производственными показателями: объемом вскрышных работ, потреблением дизельного топлива и выбросами загрязняющих веществ в атмосферу. Это однозначно указывает на технологические процессы как ключевой источник загрязнения. В выбросах обнаружены токсичные металлы (Pb, Zn, Cu).

Параллельные исследования снегового покрова продемонстрировали характерную пространственную дифференциацию загрязнения (Рисунок 3).

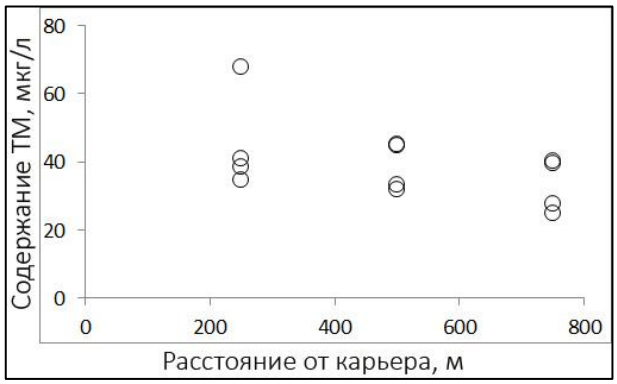


Рисунок 3. Распределение валовых концентраций микроэлементов (МЭ) в снеге в зависимости от расстояния до карьера

Концентрации цинка достигали 11,8 мкг/л, меди 6,9 мкг/л, свинца 8,9 мкг/л в непосредственной близости от карьера. Четкий градиент убывания валовых концентраций (Fe > Zn > Mo > Mn > Pb > Sb > V > Cr > Cu) с удалением от карьера (от 67.1 мкг/л в 250 м до 23.8 мкг/л в 750 м) и пространственные модели рассеяния, построенные в Surfer, демонстрируют техногенное происхождение аэрозолей. Наряду с этим региональный атмосферный перенос подтверждается комплексом независимых доказательств. Аномальные концентрации молибдена в снеговом покрове (5,14 мкг/л в среднем, с максимальными значениями до 6,17 мкг/л), не демонстрируют выраженной пространственной зависимости от расположения карьера. Аналогичная картина наблюдается для ванадия, средняя концентрация которого в снеге составляет 1,97 мкг/л, сурьмы (2,12 мкг/л) и мышьяка (1,19 мкг/л). Пространственное распределение этих элементов указывает на внешние источники поступления, связанные с промышленными центрами региона (Рисунок 4).

Распределение микроэлементов (МЭ) в поверхностных и подземных водах выглядело следующим образом: Sr>Fe>Mn>Zn>Cr>Pb>Cu и соответствовало распределению, полученному при исследовании проб снега. Концентрации Mo, As, Cd, Ni, Co, Sb и V были ниже предела

обнаружения. В целом природу Sr, Fe и Mn можно определить как литогенную, для остальных МЭ преобладают антропогенные источники. В процессе горных работ используются бурение, взрывные работы, дробление гипса, отгрузка и транспортировка продукции. При этом образуется мелкая гипсовая пыль, которая поглощает подвижные формы тяжелых металлов, а затем оседает, образуя ореол загрязнения вокруг карьера.

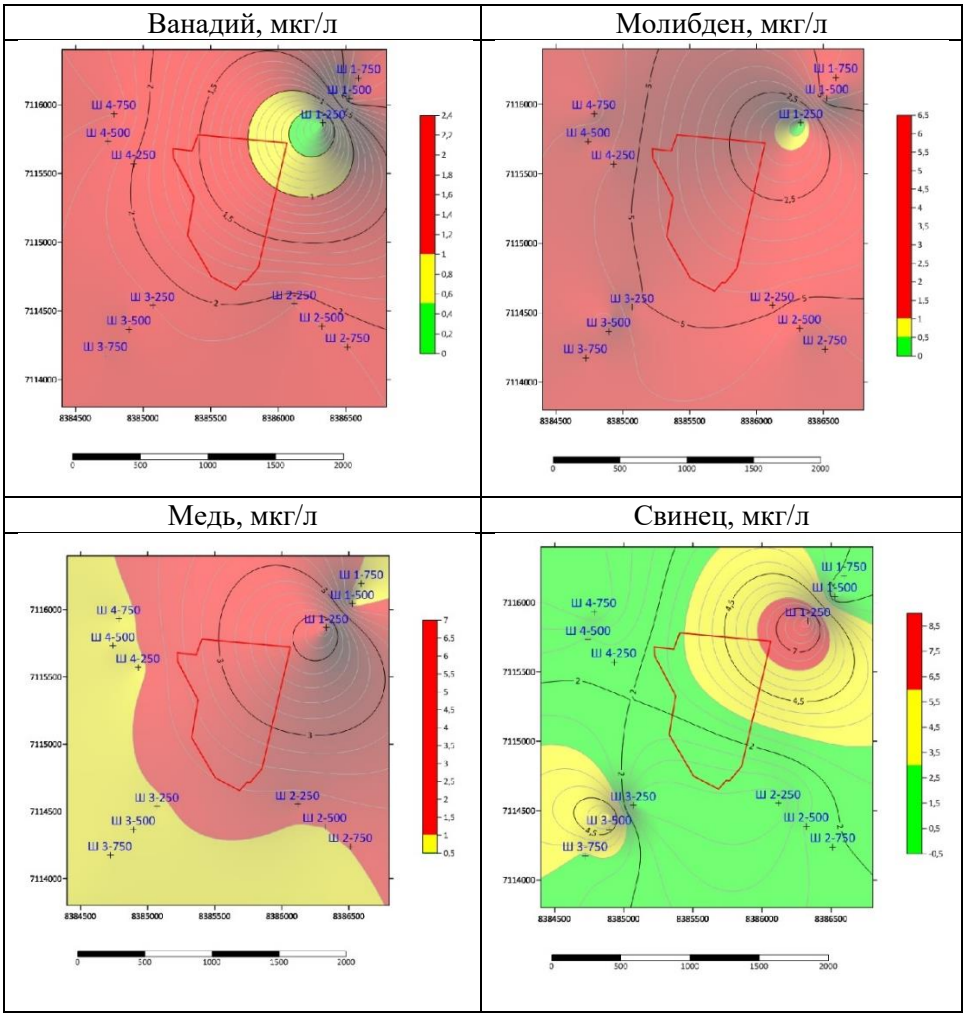


Рисунок 4. Пространственные распределения микроэлементов в точках отбора проб снега вокруг месторождения гипса, мкг/л. Красным цветом показаны превышения ПДК для рыбохозяйственных водоемов

Установлена существенная роль донных отложений в аккумуляции загрязняющих веществ. Максимально она проявлена на участках с аномально высоким содержанием органического вещества (44,5-45,6%) и карбонатов (1,61-2,41%) (пробы ДГЛ-6 и ДГЛ-7), (Рисунок 5).

Именно в этих точках зафиксированы максимальные концентрации приоритетных загрязнителей: кадмия 1,20-1,30 мг/кг, никеля 15-16 мг/кг, цинка 27-36 мг/кг и свинца 5,1-8,2 мг/кг. Для этих локальных аномалий характерны экстремальные значения трех расчетных индексов загрязнения по кадмию и молибдену: *Igeo* >1 (умеренное загрязнение), (*Cf* >3 (значительное загрязнение), *EF* >40 (очень сильное обогащение) и индекса суммарного загрязнения: *Cd* >8 (умеренная степень) (Рисунок 6). В то же время, средние значения индекса суммарного загрязнения свидетельствуют о низкой степени загрязнения (*Cd* = 5,15 для донных отложений и *Cd* = 4,32 для почв).

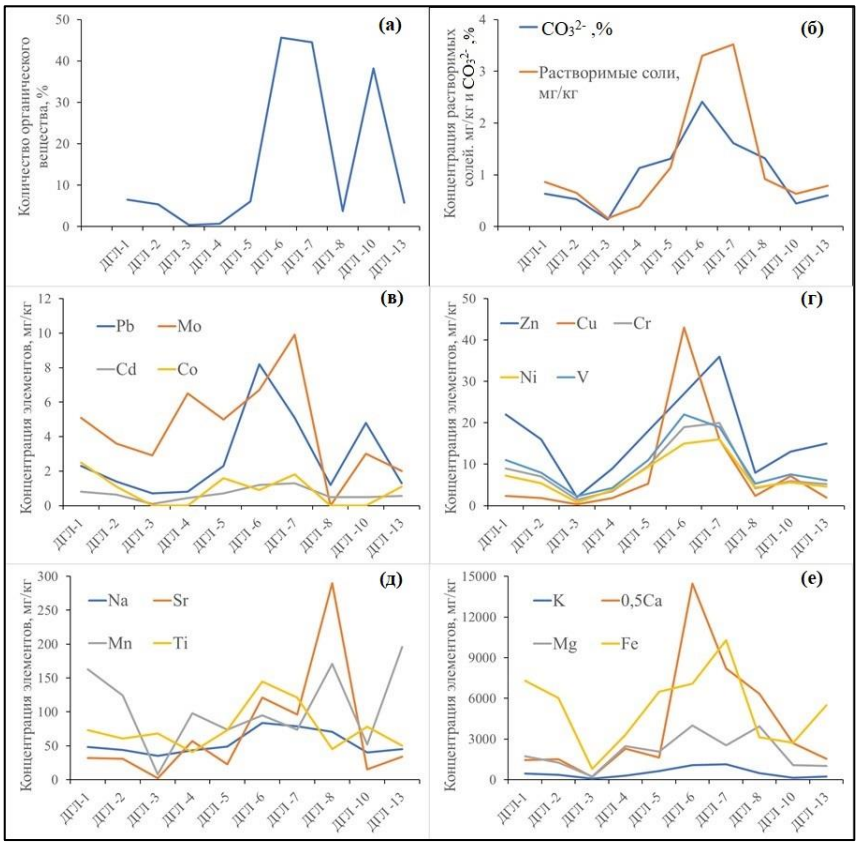


Рисунок 5. Распределение в донных отложениях: (а) органические вещества, (б) CO_3^{2-} и растворимые соли, (в) Pb, Mo, Cd и Co, (г) Cu, Zn, V, Cr, Ni, (д) Sr, Mn, Ti, Na, (е) Ca, Fe, Mg, K

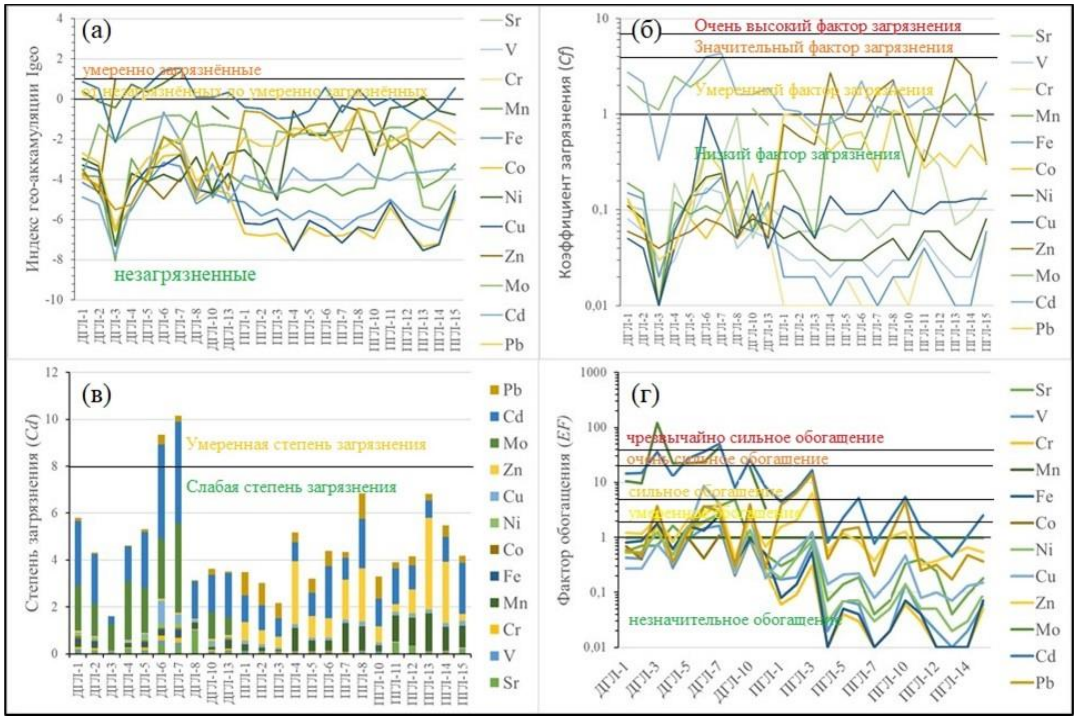


Рисунок 6. Графики распределения показателей, характеризующих загрязнение донных отложений и почв: а) индекс геоаккумуляции *Igeo*, б) фактор загрязнения *Cf*, в) степень загрязнения *Cd*, г) фактор обогащения *EF*. Также указаны классы загрязнения

Величина индекса экологического риска (*ERi*) для кадмия в пробах ДГЛ-6 и ДГЛ-7 достигала 120-130, что соответствует критериям значительного потенциального экологического риска (Рисунок 7а). Вероятность токсического воздействия на водные организмы на этих участках возрастала до 30% (*mERM-Q* = 0,129-0,137) (Рисунок 7г), в существенной степени за счет никеля (Рисунок 7в, д), а содержания кадмия и меди превышали пороговые уровни (*TEL*), что указывает на возможность возникновения неблагоприятных биологических эффектов, а также требует особого внимания при разработке мероприятий по мониторингу. В то же время, большинство проб (100% для Pb, Zn, Cr, Ni; 90% для Cu, 50% для Cd) находятся ниже пороговых уровней (*TEL, ERL*), при которых вероятны негативные эффекты для биоты, а суммарный индекс потенциального экологического риска (*RI*) для всех проб соответствует низкому уровню экологической опасности (Рисунок 7б).

Проведенное сравнение с данными других промышленных регионов показало, что значения коэффициента обогащения для кадмия (8,2-50,2) сопоставимы с показателями для промышленных районов Индии (20,3-44) и алмазных месторождений Архангельской области (5,8–44,8). Это подтверждает типичность выявленных процессов и возможность экстраполяции выводов на другие аналогичные территории.

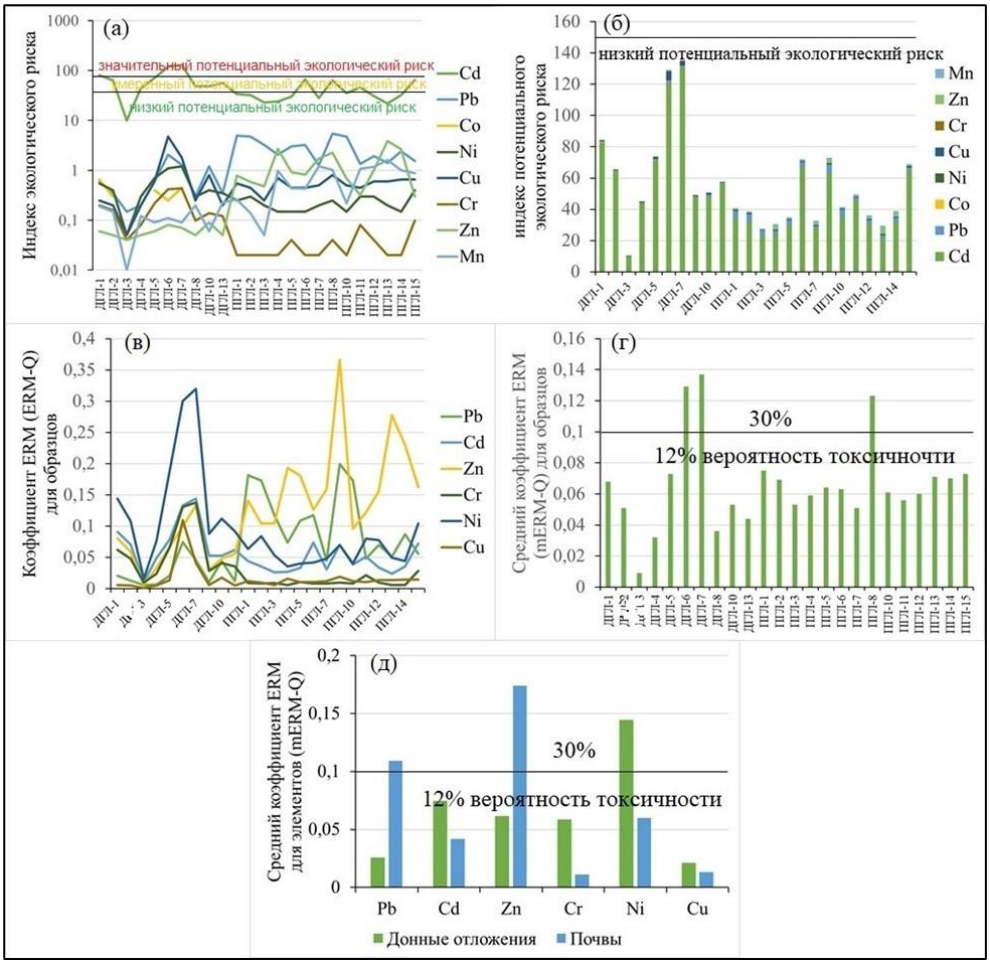


Рисунок 7. Распределение индексов, характеризующих токсикологические риски для организмов, обитающих в донных отложениях и почвах: (а) индекс экологического риска для элементов (*ERi*), (б) индекс экологического риска для проб (*RI*), (в) коэффициент *ERM* (*ERM-Q*) для проб, (г) средний коэффициент *ERM* (*mERM-Q*) для проб, (д) средний коэффициент *ERM* для элементов (*mERM-Q*)

Результаты корреляционного и факторного анализов подтвердили, что основной вклад (64,8% дисперсии) в распределение элементов связан с антропогенным фактором, объединяющим тяжелые металлы (Zn, Cu, Ni, Cr, Pb, Mo, Cd) с содержанием органического вещества (r = 0,75), карбонатов (r = 0,71) и растворимых солей (0,87) (Рисунок 5 в–е), содержание которых максимально в пробах ДГЛ-6 и ДГЛ-7 (Рисунки 5 а и б). Антропогенное загрязнение донных отложений подтверждается также тем, что по уровням обогащения (*EF*) донные отложения контрастно выше по сравнению с почвами (Рисунок 6г).

Это доказывает, что именно комбинация антропогенного потока металлов и специфических геохимических условий среды (высокое содержание органического вещества, создающее сорбционную емкость, карбонаты, влияющие на pH и процессы соосаждения) формирует локальные геохимические барьеры, способствующие аккумуляции загрязняющих веществ до опасных уровней.

Мониторинг влияния разработки месторождения на флору и фауну проводился на сети постоянных геоботанических пробных площадях (ПП), представляющих типичные северотаежные фитоценозы. За трехлетний период существенных негативных изменений в структуре древостоя не выявлено. Отмечено усиление подроста и подлеска на прикарьерных ПП, что связано с улучшением светового режима после рубок. Травяно-кустарничковый ярус и мохово-лишайниковый покров сохраняют стабильность. Подтверждено присутствие краснокнижных лишайников и мха, что свидетельствует об отсутствии критического запыления. Исследование животного мира выявило высокую устойчивость фаунистических комплексов. Герпетофауна демонстрирует сходную плотность на фоновом и трансформированном участках. Орнитофауна отличается большим разнообразием в трансформированных местообитаниях (41 вид против 28 в фоновых), включая присутствие краснокнижного лебедя-кликуна на оз. Сенное. Сообщества млекопитающих (32 вида) активно используют техногенные территории. Адаптация животных к антропогенным факторам (шум, взрывные работы) минимизирует негативное воздействие.

Таким образом, установлено, что загрязнение тяжелыми металлами имеет смешанное происхождение, а реальная экологическая опасность возникает точечно в специфических условиях — в донных отложениях озер, обогащенных органическим веществом и карбонатами. Именно на таких участках происходит аккумуляция микроэлементов, создавая зоны со значительным экологическим риском по кадмию (*ERi* > 80) и с близким к умеренному суммарным экологическим риском (*RI* > 120). Выявленные закономерности имеют принципиальное значение для разработки адресной системы мониторинга, сфокусированной на участках-аккумуляторах, и оптимизации природоохранных мероприятий на территории горного отвода. Общий вывод подтверждает, что текущая стадия разработки месторождения не привела к необратимой деградации биотических компонентов экосистемы, полученные результаты также подчеркивают необходимость учета специфики геохимических условий при оценке экологических рисков горнодобывающих предприятий.

2. Установленная 200-метровая буферная зона не всегда состоятельна для предотвращения ущерба уникальным формам рельефа биотопа Чугской площади. Дальнейшее развитие карьера может привести к превышению допустимых скоростей сейсмических волн при проведении взрывных работ. Полученная по результатам экспериментальных исследований эмпирическая зависимость позволяет рассчитывать максимально допустимые массы взрывчатых веществ при приближении карьера к заказнику.

Комплексный сейсмический мониторинг, проведенный в 2024 году с применением сети высокочувствительных велосиметров (Güralp 6TD, Trillium Compact), зафиксировал отсутствие угрозы для геоморфологической стабильности Чугского заказника от ежедневной рутинной деятельности горного предприятия. Система из пяти датчиков, установленных по линии «карьер–

пещера» с шагом 200–250 м, регистрировала параметры сейсмических колебаний в течение 43 суток (Рисунок 8).

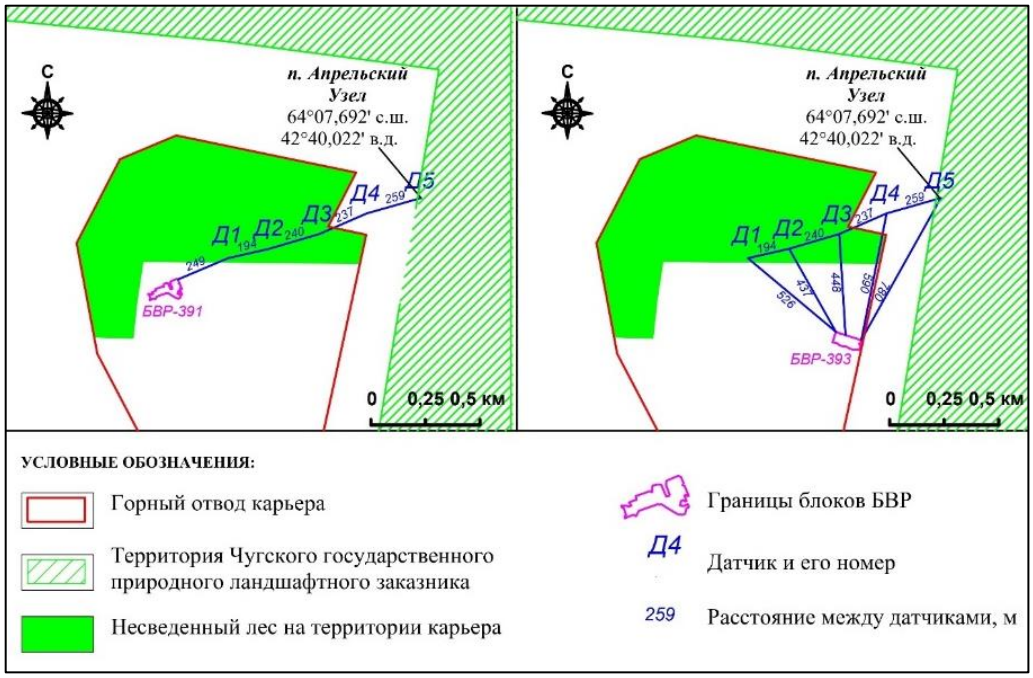


Рисунок 8. Схема расположения сейсмических датчиков и блоков буровзрывных работ

Максимальная пиковая скорость смещения (0,22645 мм/с, датчик Д1) оказалась в 20 раз ниже допустимого предела по ГОСТ Р 52892–2007 для социально значимых объектов и в 800 раз ниже нормативов устойчивости карьерных бортов (Пергамент, 2001; Назаров, 1974). Суточные колебания между рабочими и ночными периодами были незначительны, что подтверждает отсутствие кумулятивного воздействия. Эти данные однозначно свидетельствуют, что текущие операции не вызывают деформаций породного массива заказника, а установленная 200–метровая буферная зона обеспечивает надежную защиту рельефа.

Для анализа сейсмического воздействия взрывных работ на массив горных пород были обработаны данные, зарегистрированные июне – июле 2024 года. Пиковые значения скоростей колебания поверхности земли представлены на Рисунке 9.

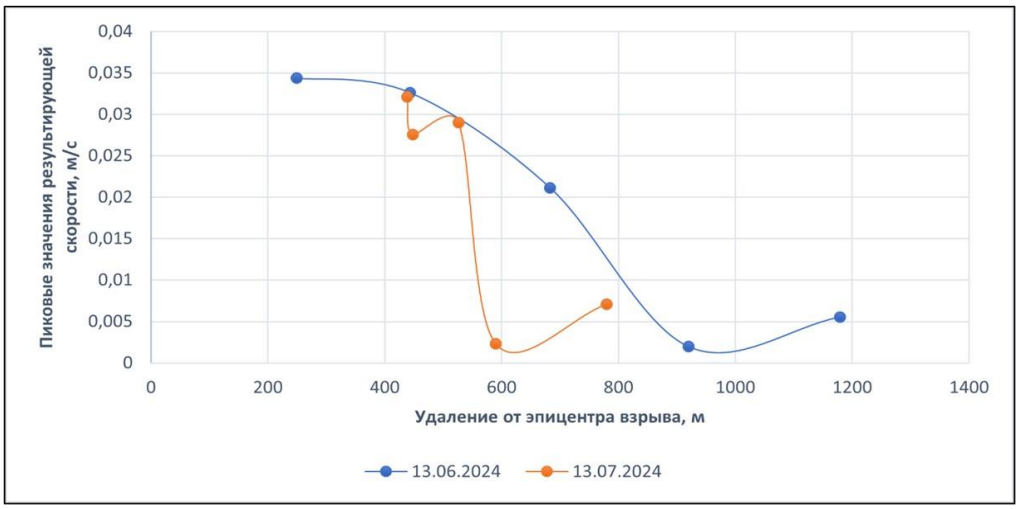


Рисунок 9. Пиковые значения скорости в зависимости от удаления прибора от эпицентра взрыва

Массовые взрывы выявили ожидаемую зависимость сейсмического воздействия от расстояния и массы ВВ. Пиковые результирующие скорости достигали 0,0344 м/с при детонации 1597 кг ВВ на расстоянии 249 м (13.06.2024) и 0,0321 м/с для 3077 кг ВВ на дистанции 438 м (13.07.2024). Критически важно отметить, что на границе заказника (датчик Д5, 780–1179 м) значения не превышали 0,0071 м/с, что соответствует всего 2–3 баллам по шкале сейсмической интенсивности Медведева С.В. — уровню, ощутимому только в условиях тишины. Диаграмма скорости распространения сейсмических колебаний в зависимости от расстояния до места взрывных работ по итогам экспериментов, проведенных в 2019 и 2024 годах, представлена на Рисунке 10.

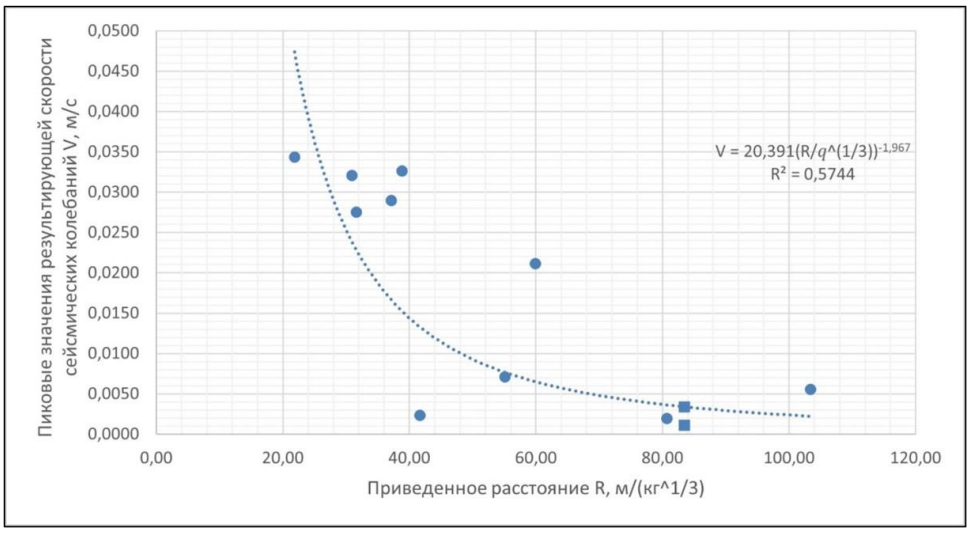


Рисунок 10. Диаграмма скорости распространения сейсмических колебаний от приведенного расстояния для условий карьера гипса «Глубокое»: ● — данные, полученные в 2024 году; ■ — данные, полученные в 2019 году

Сейсмические параметры воздействия взрывных работ в определенных горно-геологических условиях карьеров описываются на основании решения равенства между предельной скоростью и скоростью, образующейся в среде при проведении массового взрыва группы зарядов одной степени инициирования массой q на расстоянии R от объекта исследования и определяющейся по уравнению М. А. Садовского (Мосинец, 1976, Садовский, 2004):

$$V = k\left(\frac{\sqrt[3]{q}}{R}\right)^{n}, \qquad (1)$$

где V — результирующая скорость колебаний; R — расстояние от эпицентра взрыва до объекта; q — масса взрывчатого вещества в группе зарядов; k — коэффициент сейсмичности, зависящий от физико-механических свойств массива; n — показатель затухания сейсмических колебаний.

Эмпирическая модель затухания для карьера «Глубокое» выглядит следующим образом:

$$V = 20,391\left(\frac{\sqrt[3]{q}}{R}\right)^{1,967}, \qquad (2)$$

где V — результирующая скорость колебаний; q — масса заряда в группе зарядов (на одну ступень замедления); R — эпицентральное расстояние.

Для сравнения полученных данных мы можем обратиться к ГОСТ Р 52892-2007 и к методическому изданию «Устойчивость бортов и осушение карьеров, Лабораторный практикум» Стафеев А. А., Лобанова Т. В.. В справочном Приложении Б к ГОСТу представлено три варианта определения критических значений: согласно национальному стандарту Германии DIN 4150-3:1999, согласно национальному стандарту Великобритании BS 7835-2:1993 и согласно Office of

Surface Mining США. В стандарте Office of Surface Mining предельные значения установлены для невысоких зданий, подвергающихся воздействию сейсмических волн, которые образуются в результате взрывов при разработке открытых месторождений. Сопоставление экспериментальных величин с нормативными значениями показало, что полученные пиковые значения скоростей (от 0,0019 до 0,0344 м/с) составляют 6 — 107,5 % от предельно установленного значения 0,032 м/с.

Все значения, превышающие допустимые показатели, наблюдаются в пределах контура горного отвода предприятия. Результатом сопоставления экспериментальных значений с показателями шкал является вывод, что значительное воздействие на массив горных пород, сопоставимое с землетрясениями 6 баллов, отмечается в трех точках датчиками Д1, Д2 и Д3, оставшиеся два датчика фиксируют незначительные колебания, сопоставимые с двух-трехбалльными землетрясениями.

Особое внимание уделено оценке влияния на уязвимые гидробиоценозы подземных рек. В ходе спелеологических исследований в подземных водоемах Чугского массива идентифицирована популяция гольцов. Для количественного анализа применен показатель плотности потока энергии гидроударной волны (E), рассчитываемый по формуле:

$$E = 0,8V^{1,5}\left(\frac{Q^{0,33}}{R}\right), \qquad (3)$$

где V — скорость смещения породы в продольной волне, см/с; Q — масса взрывчатого вещества в группе зарядов, кг; R — расстояние от эпицентра взрыва до объекта, м.

Максимальное значение E=0,2334 Дж/м^2 зарегистрировано датчиком, размещенным в 249 метрах от места эпицентра массового взрыва, плотность энергии гидроударной волны в данном случае составила лишь 0,15% от безопасного порога для ихтиофауны (150 Дж/м²). Непосредственно у входа в пещеру «Апрельский Узел» — ключевой объект исследования, этот показатель был еще ниже — 0,0019 Дж/м². Полученные данные доказывают, что 200-метровая буферная зона полностью нивелирует риск воздействия на ихтиофауну.

Моделирование потенциальных угроз при продвижении горных работ в сторону заказника выполнено на основе эмпирической модели затухания волн, адаптированной к специфике гипсового массива месторождения Глубокое. На основании уравнения Садовского, верифицированного данными мониторинга, при значении V = 0,008 м/с, то есть соответствующей предельно допустимой скорости колебаний сооружений, имеющих высокую социальную значимость, согласно стандарту DIN 4150–3:1999, мы рассчитали допустимые значения массы взрывчатого вещества (q) группы одновременно инициируемых зарядов на эпицентральном расстоянии R = 200 — 600 м от сооружения с шагом в 50 м (таблица 1). Значение 200 метров соответствует буферной зоне.

Таблица 1. Допустимые массы группы одновременно взрываемых зарядов в зависимости от расстояния между эпицентром взрыва и объектом исследования при скорости колебаний объекта не более 0,008 м/с

Эпицентральное расстояние, м	Масса взрывчатого вещества в группе зарядов, кг
200	51
250	100
300	172
350	274
400	408
450	581
500	797
550	1061
600	1378

В итоге доказано, что современные взрывные технологии на месторождении «Глубокое» при соблюдении регламентов не нарушают целостность природных объектов Чугского

заказника. Установленная буферная зона шириной 200 м научно несостоятельна в качестве эффективного механизма защиты уникальных форм рельефа экотопа, однако ее достаточно для сохранения ихтиофауны биоценоза. Для предотвращения рисков при развитии карьера необходима имплементация динамической системы управления параметрами взрывов, основанная на зависимости $q = f(R)$. Ключевым элементом является запрет на смещение горных работ в сторону ООПТ без пересчета допустимых масс ВВ по уравнению (2) с учетом реальных свойств гипсового массива.

3. Антропогенное воздействие горных работ на радиационную обстановку связано с дезинтеграцией вскрышных глинистых пород и почв, складируемых в отвалах, что способствует их интенсивному химическому выветриванию с выносом урана в карьерные воды. Глобальное перемещение горных масс вызывает локальные перераспределения фона: снижение мощности дозы гамма-излучения и плотности потока радона в карьере, сопровождаемое их ростом во вскрышных отвалах.

Показателем влияния горных работ на радиационную обстановку служит повышенная концентрация урана в карьерных водах (проба ГЛВ-11), достигающая 7,34±1,10 мкг/л. Это не только существенно (в 3,5–4 раза) превышает фоновые уровни, характерные для подземных и поверхностных вод в карбонатных и сульфатных отложениях региона (≤2 мкг/л), но и не соответствует требованиям, предъявляемым к питьевым водам по суммарной альфа-активности (0,202 Бк/л при нормативе 0,2 Бк/л) (таблица 2).

Таблица 2. Активность изотопов урана и его концентрация в пробах воды

Пробы	Водный объект	Широта	Долгота	^{238}U, мБк/л	^{234}U, мБк/л	^{234}U/^{238}U	U, мкг/л
ГЛВ-1	Река Позера 1	64,089	42,635	3,04±0,46	3,14±0,47	1,03±0,15	0,25±0,04
ГЛВ-2	Река Позера 2	64,106	42,626	10,5±1,6	17,2±2,6	1,63±0,24	0,85±0,13
ГЛВ-3	Озеро Сенное	64,110	42,591	0,96±0,14	1,37±0,20	1,43±0,21	0,08±0,01
ГЛВ-4	Река Чуга 2	64,125	42,688	22,1±3,3	33,0±5,0	1,50±0,22	1,78±0,27
ГЛВ-5	Озеро 5	64,126	42,673	0,18±0,02	0,24±0,03	1,33±0,19	0,02±0,00
ГЛВ-6	Озеро 6	64,130	42,674	9,38±1,40	10,0±1,5	1,07±0,16	0,76±0,11
ГЛВ-7	Озеро 7	64,135	42,659	5,11±0,76	5,78±0,86	1,13±0,16	0,41±0,06
ГЛВ-8	Река Чуга 1	64,112	42,689	8,51±1,27	11,8±1,8	1,38±0,20	0,69±0,10
ГЛВ-9	Родник	64,112	42,689	16,7±2,51	18,6±2,8	1,12±0,16	1,35±0,20
ГЛВ-10	Озеро Карасевое	64,108	42,661	9,83±1,47	13,0±1,9	1,32±0,19	0,79±0,12
ГЛВ-11	Карьер	64,112	42,654	91±14	111±17	1,22±0,18	7,34±1,10
ГЛВ-11-1	Карьер	64,112	42,654	68±10	103±13	1,51±0,22	5,52±0,82
ГЛВ-11-2	Карьер	64,112	42,654	65,7±9,9	88±12	1,34±0,20	5,30±0,80
ГЛВ-12	Отстойник	64,108	42,645	24,3±3,6	29,4±4,4	1,21±0,18	1,96±0,29
ГЛВ-13	Река Позера 4	64,129	42,628	18,0±2,7	21,3±3,2	1,18±0,17	1,45±0,22
ГЛВ-14	Река Позера 3	64,116	42,632	5,77±0,86	10,1±1,5	1,75±0,26	0,47±0,07

Представляет интерес идентификация первичного источника мобилизованного урана. Сравнительный анализ активности радионуклидов в различных геологических средах показал, что гипс обладает минимальными содержаниями ^{238}U и ^{234}U (среднее значение 1,96±0,29 и 1,52±0,23 Бк/кг, или ~0,16 мг/кг). В то же время, вскрышные породы (красноцветные моренные суглинки), извлеченные из массива и складированные в отвалы, характеризуются статистически значимыми более высокими удельными активностями ^{238}U и ^{234}U (11,8±1,8 и 8,66±1,30 Бк/кг, соответственно, что эквивалентно ~0,95 мг/кг) (таблица 3). Таким образом, был сделан вывод, что именно эти дезинтегрированные и перемещенные в отвалы глинистые породы, обогащенные ураном, сорбированным гидроксидами железа и органическим веществом, являются доминирующим источником вторичного загрязнения.

Таблица 3. Удельная активность радионуклидов в почвах (П), песчано-глинистых отложениях (ПГ) и гипсе (Г), Бк/кг

Пробы	^{137}Cs	^{226}Ra	^{232}Th	^{40}K	^{238}U	^{234}U	$^{234}U/^{238}U$
П-1	39,4±5,8	26,1±3,8	14,4±2,4	216±33	2,49±0,36	1,74±0,27	0,70±0,11
П-2	45,3±6,8	39,9±5,8	22,3±3,4	256±39	3,58±0,57	3,79±0,56	1,06±0,16
П-3	9,14±2,07	12,5±1,9	12,6±2,0	118±18	6,29±0,91	6,71±1,02	1,07±0,15
П-4	30,9±4,5	39,5±5,8	29,0±4,4	196±30	4,33±0,62	4,41±0,64	1,02±0,15
П-5	48,2±7,3	12,1±2,0	11,4±1,8	187±28	1,47±0,28	1,32±0,20	0,90±0,14
П-6	24,5±3,9	29,2±4,3	27,1±4,2	111±17	9,39±1,43	9,98±1,51	1,06±0,15
П-7	23,3±3,6	37,9±5,7	23,3±3,5	251±38	1,22±0,19	1,19±0,18	0,98±0,15
П-8	31,3±4,8	18,7±2,8	22,1±3,3	262±40	10,2±1,5	9,49±1,41	0,93±0,15
П-10	28,8±4,8	12,5±2,0	8,16±2,5	127±20	2,42±0,38	2,30±0,31	0,95±0,15
П-11	33,1±4,8	26,2±4,0	21,4±3,3	496±73	10,9±1,5	10,1±1,5	0,93±0,15
П-12	32,7±5,0	33,5±5,1	31,2±4,7	352±51	10,5±1,5	10,4±1,5	1,00±0,15
П-13	34,4±5,4	37,3±5,7	23,1±3,5	166±25	6,63±0,97	5,86±0,86	0,88±0,13
П-14	36,8±5,6	18,1±3,0	26,2±3,9	223±34	6,89±0,96	8,47±1,24	1,23±0,18
П-15	35,1±5,3	31,0±4,6	21,5±3,2	346±52	8,02±1,23	5,56±0,83	0,69±0,10
среднее	**32,4±5,0**	**26,8±4,0**	**21,0±3,3**	**236±36**	**6,02±0,88**	**5,81±0,85**	**0,96±0,14**
ПГ-1	н.о.[1]	24,6±3,8	13,6±3,0	318±62	10,9±1,6	8,37±1,26	0,77±0,12
ПГ-2	н.о.	18,8±2,6	20,5±3,8	379±72	12,2±1,8	8,81±1,32	0,72±0,11
ПГ-3	н.о.	18,8±2,6	16,1±3,4	367±70	12,3±1,8	8,79±1,32	0,72±0,11
среднее	н.о.	**20,7±3,0**	**16,7±3,4**	**355±68**	**11,8±1,8**	**8,66±1,30**	**0,74±0,11**
Г-1	н.о.	4,02±1,12	н.о.	н.о.	2,78±0,42	1,98±0,30	0,71±0,11
Г-2	н.о.	2,81±0,94	н.о.	н.о.	0,99±0,15	1,14±0,17	1,15±0,17
Г-3	н.о.	4,24±1,18	н.о.	н.о.	2,11±0,32	1,44±0,22	0,94±0,14
среднее	н.о.	**3,69±1,08**	н.о.	н.о.	**1,96±0,29**	**1,52±0,23**	**0,93±0,14**

[1] н.о. — не определено (концентрация ниже предела обнаружения)

Выявлена положительная корреляция (R^2 = 0,57) между концентрацией урана в воде и окислительно-восстановительным потенциалом (Eh) для проб воды сульфатно-кальциевого состава с минерализацией 0,5–2,3 г/л (Рисунок 11).

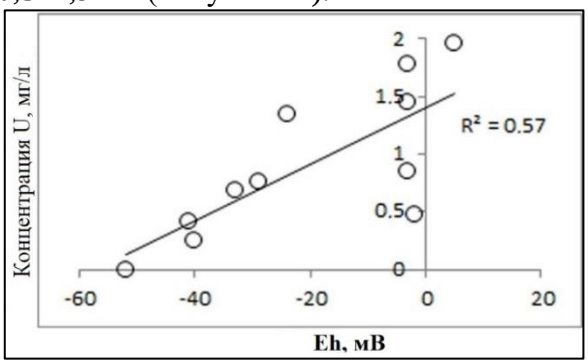


Рисунок 11. Зависимость концентрации урана в воде от Eh без учета двух образцов Ca-HCO_3-SO_4 состава с минимальными значениями TDS на уровне 0,1 г/л

Это указывает на окислительные условия, благоприятные для перехода урана в растворимую форму. Также имеет место корреляция концентраций урана во всех водопунктах, за исключением карьерных вод, с общей минерализацией (TDS), а также с основными ионами — продуктами растворения гипса — кальцием (Ca^{2+}) и сульфат-ионом (SO_4^{2-}) (Рисунок 12).

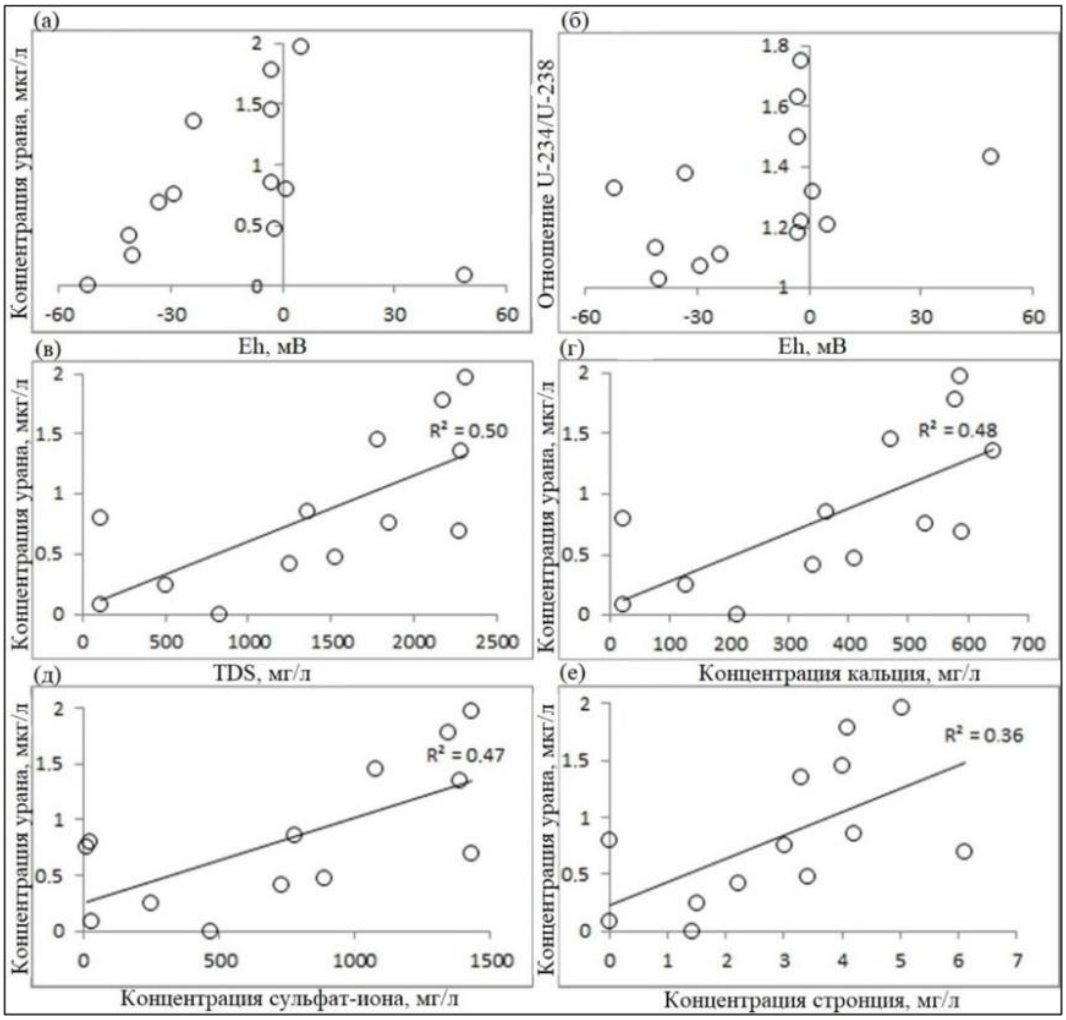


Рисунок 12. Зависимость концентрации урана в природных водах от Eh (а), TDS (в), кальция (г), сульфат-иона (д), стронция (е) и зависимость $^{234}U/^{238}U$ от Eh (б), Аномальное значение концентрации урана в карьерных водах (7,34 мкг/л) при построении графиков не учитывалось

Это свидетельствует о преимущественном выносе урана из растворяющихся гипсовых пород.

Однако рисунок 12 убедительно показывает, что при растворении гипса в воду переходит только до 2 мкг/л урана, а дополнительные 5,34 мкг/л урана, зафиксированные в пробе карьерных вод ГЛВ-11, отобранной в летний период, могли поступить только из отвалов измельченных вскрышных суглинков. Подтверждением этого стали результаты исследования дополнительных проб карьерных вод, отобранных в зимний период, в январе и феврале 2025 года (ГЛВ-11-1 и ГЛВ-11-2). Они показали значения концентраций урана 5,52±0,82 и 5,30±0,80 мкг/л. То есть в январе и феврале процессы растворения гипсов были практически заторможены, а в августе 2023 года, когда отбиралась проба ГЛВ-11, они были максимальны.

Дополнительным подтверждением миграционного пути служит факт аккумуляции урана в донных отложениях периферийных озер (до 73 Бк/кг, или ~6,8 мг/кг в пробе ДГЛ-6), где также зафиксированы максимальные содержания органического вещества (45,61%) и карбонатов (2,41%), выступающих в качестве эффективных сорбционных барьеров (Рисунок 13).

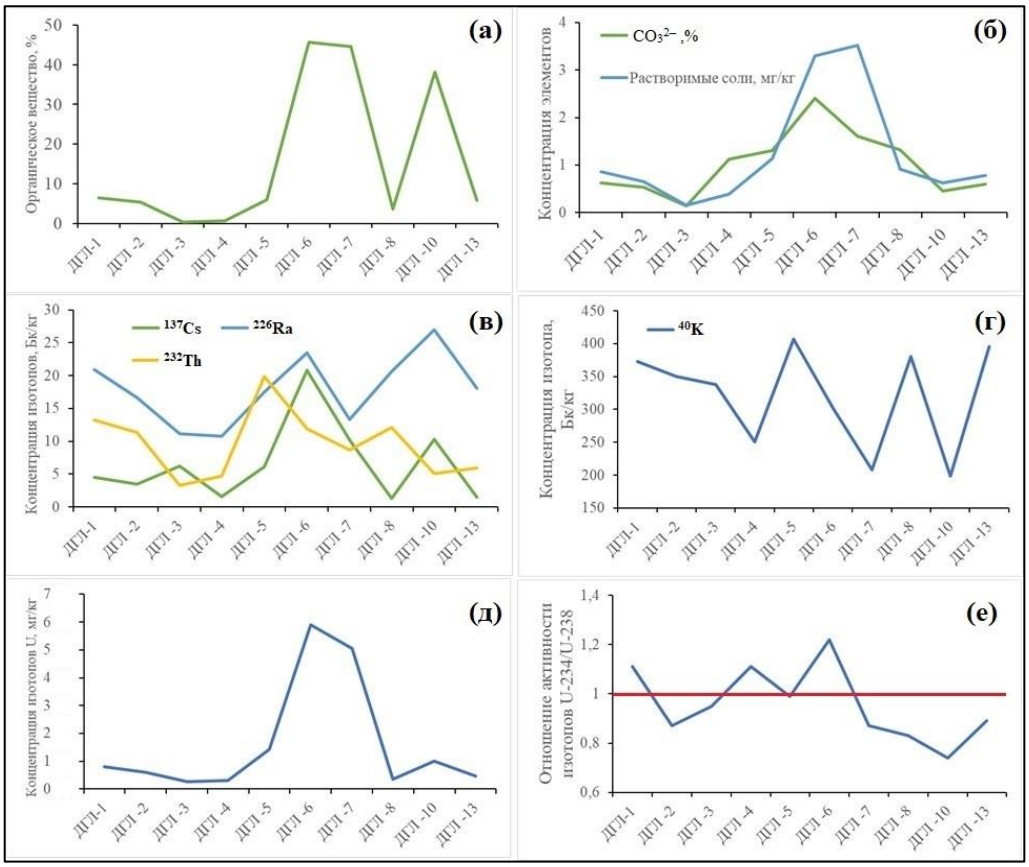


Рисунок 13. Графики распределения в донных отложениях органического вещества (а), растворимых солей и CO_3^{2-} (б), активности ^{137}Cs, ^{232}Th и ^{226}Ra (в), активности ^{40}K (г), содержания U (д) и отношения активностей изотопов урана (е)

Помимо прямого воздействия на гидрохимический режим, горные работы приводят к масштабному техногенному перераспределению естественных радионуклидов в ландшафте, что проявляется в модификации полей ионизирующего излучения. Картографирование мощности амбиентного эквивалента дозы (МАЭД) гамма-излучения выявило ее четкую пространственную приуроченность: минимальные значения (11-20 нЗв/ч) регистрировались на участках выхода гипса, а максимальные (до 69 нЗв/ч) — на территориях отвалов вскрышных пород, обогащенных глинистой фракцией, несущей природные радионуклиды (^{226}Ra, ^{232}Th, ^{40}K). Параллельно, вскрытые горными работами плотные гипсовые пласты начинают выполнять функцию барьера для эманации радона, снижая плотность его потока (ППР) до 6–18 мБк/(м²·с), в то время как на прилегающих территориях с ненарушенными почвами и моренными отложениями ППР достигал 181 мБк/(м²·с), что превышает нормативы для строительных площадок (Рисунок 14).

Существенным аргументом в пользу антропогенной природы процессов явился анализ изотопных соотношений. Пониженное (относительно фоновых водоемов) отношение активностей ^{234}U/^{238}U (~1.2) в карьерных водах было интерпретировано как следствие интенсивного механического дробления пород взрывными и горнотехническими работами. Высокая скорость растворения огромной площади поверхности дробленого материала приводит к переходу урана в водную фазу в равновесном соотношении изотопов, что нивелирует эффект предпочтительного выщелачивания более подвижного ^{234}U из приповерхностного слоя зерен породы, характерный для ненарушенных геологических массивов. Сезонная динамика (снижение концентрации урана и рост изотопного соотношения в зимний период) подтвердила зависимость интенсивности выщелачивания от температурно-влажностных условий, управляющих скоростью химического выветривания в отвалах.

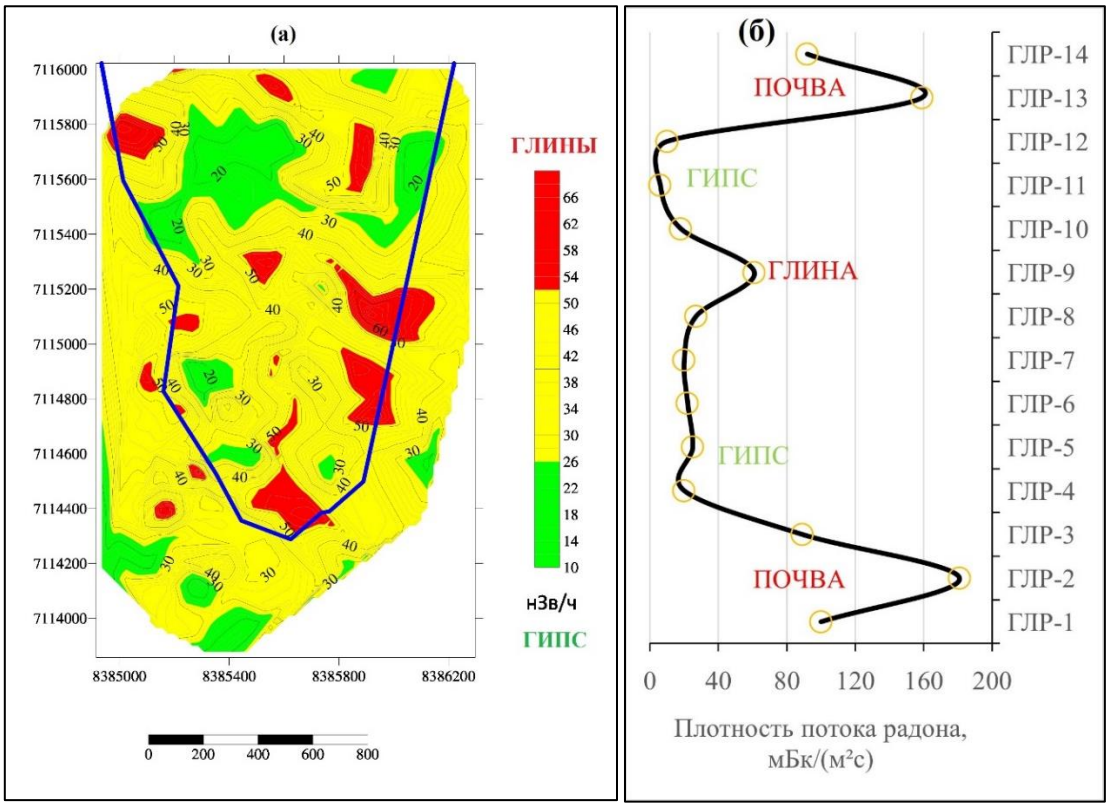


Рисунок 14. Площадное распределение значений МАЭД в районе месторождения гипса и прилегающих к нему территориях (а) и распределение плотности потока радона из почвенного воздуха по профилю Север-Юг (б)

Таким образом, комплексом полевых, лабораторных и статистических методов показано, что ключевым звеном, нарушающим естественную радиационную обстановку, является не собственно добыча гипса, а формирование и длительное существование техногенных образований — отвалов дезинтегрированных вскрышных пород. Их интенсивное химическое выветривание в условиях воздействия атмосферных агентов является доминирующим механизмом мобилизации ранее сорбированного урана, его перевода в миграционно-способные формы и последующего выноса в гидрографическую сеть с образованием вторичных геохимических и радиационных аномалий в поверхностных водах и донных отложениях.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Проведенное исследование позволило сделать следующие выводы и рекомендации:

1. Установлены приоритетные загрязнители и механизмы их миграции:

– Выявлен комплексный характер загрязнения с доминированием Mo и Cd в донных отложениях и Cd, Zn в почвах. Существенная роль антропогенного загрязнения донных отложений подтверждается более высокими уровнями обогащения по сравнению с почвами.

– Показана роль органического вещества как аккумулятора загрязняющих веществ.

– Факторный анализ выявил три доминирующих фактора, объясняющих 91,5% дисперсии данных по донным отложениям: антропогенный (64,8%, связь Zn, Ti, V, Cu, Ni, Cr, Pb, Mo, Cd с органическим веществом, карбонатами и растворимыми солями), природный (16,5%, вынос Mn, Mg, Sr из пород) и смешанный (10,2%, литогенно-техногенное происхождение Zn, Mo, Cd, Fe, Co).

2. Оценено воздействие на водные экосистемы:

– Установлено превышение ПДК для рыбохозяйственных водоемов по Ca^{2+}, SO_4^{2-} и Sr в реках, обусловленное природным растворением гипсоносной толщи.
– Выявлены локальные антропогенные вклады: повышенные концентрации Zn и Cu в карьерных водах, максимальные концентрации Pb, Zn, Cr, Cu в близлежащем озере.
– Индекс экологического риска для донных отложений показал низкий общий потенциал, но выявил умеренный риск, связанный исключительно с кадмием. Токсикологический анализ подтвердил, что загрязнение в целом не должно вызывать острых негативных биологических эффектов, хотя в точках с максимальным накоплением Cd, Ni, Zn и Pb возможны хронические воздействия.

3. Определены параметры сейсмической безопасности для карстового заказника:
– Рутинная деятельность карьера не генерирует сейсмическое воздействие, способное нарушить целостность породного массива ООПТ. Установленная 200-метровая буферная зона является эффективной мерой защиты.
– Массовые взрывы в текущий момент не оказывают разрушающего влияния на ближайшую пещеру.
– Разработана эмпирическая модель затухания сейсмических волн при взрывах на карьере. На ее основе рассчитаны максимально допустимые массы взрывчатых веществ для обеспечения безопасности карстовых форм рельефа ООПТ.
– Энергетическое воздействие взрывов на пещерную ихтиофауну ничтожно мало, что подтверждает экологическую адекватность буферной зоны.

4. Оценена динамика состояния биоты:
– Фитоценоз: Мониторинг на постоянных пробных площадях показал стабильность видового состава и структуры фитоценозов за 3-летний период. Основные изменения касаются нижних ярусов: увеличение численности подроста деревьев и высоты кустарников подлеска вблизи границы карьера, что может быть связано с изменением светового режима.
– Зооценоз: наблюдалось отсутствие существенных различий в видовом составе и обилии животного мира между трансформированными и ненарушенными территориями. Животные продемонстрировали адаптацию к антропогенным факторам, наиболее выраженную на начальном этапе деятельности предприятия.
– Редкие виды: Подтверждено наличие редких эпифитных лишайников и копрофильного мха на территории месторождения, подчеркивающее природоохранную целостность участка.

5. Дана оценка радиационного фона:
– Общий радиационный фон на месторождении и прилегающих территориях соответствует нормативам. Выделены участки I и II классов радоноопасности,
– Активность радионуклидов в воде и донных отложениях не превышает кларковых значений и нормативов.
– Деятельность предприятия вызывает локальные перераспределения фона: снижение мощности дозы гамма-излучения и плотности потока радона в карьере сопровождается их ростом во вскрышных отвалах и повышением концентраций урана в карьерных водах.

6. Полученный результат комплексного геоэкологического картографирования на основе наложения тематических слоев показал эффективность выбранной методики для наглядного представления интенсивности негативного воздействия горнодобывающего предприятия на компоненты окружающей среды. Исследование подтвердило неоднородность и многофакторность этого воздействия. Наиболее значимую экологическую угрозу в данном случае представляют не прямые выбросы в атмосферу или сброс карьерных вод, а процессы вторичного загрязнения донных отложений. Локальные участки аккумуляции становятся долговременными источниками токсикантов для водных экосистем.

В рамках работы подготовлены практические рекомендации для горного предприятия по ведению мониторинга, пылеподавлению, взрывным работам, охране ООПТ.

ОСНОВНЫЕ ПУБЛИКАЦИИ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Публикации в изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки России:

1. **Находкин В. А.** Загрязнение снежного покрова при разработке месторождения гипса в Архангельской области / В. А. Находкин, А. И. Малов, Е. Н. Зыкова. — DOI: 10.17513/use.38116 // Успехи современного естествознания. — 2023. — № 10. — С. 71-80. — URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38116 (дата обращения: 14.06.2025).
2. **Находкин В. А.** Исследование влияния разработки месторождения гипса на состав природных вод / В. А. Находкин, А. И. Малов, С. В. Дружинин. — DOI: https://doi.org/10.17513/use.38249 // Успехи современного естествознания. 2024. — № 4. — С. 56-63. — URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38249 (дата обращения: 14.06.2025).
3. **Находкин В. А.** Исследование негативного воздействия разработки карьера по добыче гипса на состав донных отложений и почвенного покрова (на примере Холмогорского района Архангельской области) / В. А. Находкин, А. И. Малов, С. В. Дружинин. — DOI: https://doi.org/10.17513/use.38230 // Успехи современного естествознания. — 2024. — № 3. — С. 58-67. — URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38230 (дата обращения: 14.06.2025).
4. **Находкин В. А.** Комплексная оценка радиационной составляющей на месторождении гипса в Архангельской области / В. А. Находкин, А. И. Малов, С. В. Дружинин, Е. Н. Зыкова. — DOI: https://doi.org/10.17513/use.38386 // Успехи современного естествознания. — 2025. — № 4. — С. 29-40. — URL: https://natural-sciences.ru/ru/article/view?id=38386 (дата обращения: 14.06.2025).
5. **Находкин В.А.** Динамика изменения состава карьерных вод на примере месторождения гипса в Архангельской области — DOI: 10.19110/geov.2025.7.4 // Вестник геонаук. — 2025. — 7(367). — С. 35-48.

Работы, опубликованные в изданиях, входящих в перечень Web of Science, Scopus и Белый список:

6. Трансформация лесных фитоценозов вблизи предприятия по добыче гипса в Архангельской области / **В. Находкин,** А. Малов, Е. Чуракова, О. Сидорова. — DOI: 10.18412/1816-0395-2024-11-47-53 // Экология и промышленность России. — 2024. — № 28 (11). — С. 47-53.
7. Malov A. I. Impact of gypsum mining on the environment in the northern taiga. / A. I. Malov, **V. A. Nakhodkin,** S. V. Druzhinin. — DOI: 10.1007/s12665-024-12038-7 // Environmental Earth Sciences. — 2025. — V. 84. — Art. 73 (2025).
8. Оценка воздействия взрывных работ на карстовый рельеф заказника (Архангельская область) **/ В. А. Находкин**, А. И. Малов, К. Б. Данилов, Г. Д. Горелик. — DOI: 10.25018/0236_1493_2025_7_0_38 // Горный информационно-аналитический бюллетень. — 2025. — № 7. — С. 38-54.
9. An Assessment of the Impact of Gypsum Deposit Development on Changes in the Radiation / A. I. Malov, **V. A. Nakhodkin,** S. V. Druzhinin, E. N. Zykova // Applied Sciences — DOI: 10.3390/app15126639. — 2025. — № 15. — Art. 6639.

Публикации в иных научных изданиях:

10. **Находкин В. А.** Оценка воздействия промышленных взрывов на карстовый рельеф ландшафтного заказника / В. А. Находкин, А. И. Малов // XXIV Уральская молодеж. науч. шк. по геофизике: сб. науч. материалов. — Пермь: ГИ УрО РАН, 2023. — С. 168-172.
11. **Находкин В. А.** Исследование сейсмического воздействия на карстовый рельеф ландшафтного заказника при ведении взрывных работ на месторождении гипсов в архангельской области / В. А. Находкин, А. И. Малов // Сергеевские чтения. Вып. 24. Фундаментальные и

прикладные вопросы инженерной геодинамики: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии (30-31 марта 2023 г.). — Москва: ГеоИнфо, 2023. — С 311-314.

12. **Находв. А.** Загрязнение снежного покрова при разработке месторождения гипса в Архангельской области / В. А. Находв, А. И Малов, Е. Н. Зыкова // II Лавёровские чтения — Арктика: актуальные проблемы и вызовы: сб. науч. материалов. — Архангельск, 2023. — С. 290-295.

13. **Находв. А.** Комплексное влияние деятельности горнодобывающего предприятия на абиотические компоненты окружающей среды (на примере Холмогорского района Архангельской области) / В. А. Находв, А. И Малов // III Юдахинские чтения: сб. науч. материалов. — Архангельск, 2024. — С. 64-69.

14. **Находв. А.** Воздействие разработки месторождения гипса на состав природных поверхностных вод / В. А. Находв, С. В. Дружинин, А. И. Малов // Арктические исследования: от экстенсивного освоения к комплексному развитию: материалы IV международ. молодеж. науч.-практич. конфер., Архангельск, 17-19 апреля 2024 года. — Архангельск: [б.и.], 2024. — С. 279-283.

15. **Находв. А**. Оценка радиационного фона на месторождении гипсов в Архангельской области / В. А. Находв, А. И. Малов, С. В. Дружинин // Новое в познании процессов рудообразования: XIII Российская молодежная научно-практическая школа: сб. науч. материалов. — Москва, 2024. — С. 178-182.

16. **Находв. А**. Анализ воздействия деятельности горнодобывающего предприятия на уникальные формы рельефа / В. А. Находв, А. И. Малов, К. Б. Данилов, Г. Д. Горелик // Сергеевские чтения. Массивы грунтов как жизнеобеспечивающий ресурс общества, Псков, 27-28 марта 2025 г. — Москва: Геоинфо, 2025. — С. 196-200.

17. **Находв. А**. Оценка токсикологических рисков для организмов, обитающих в донных отложениях в районе действующего гипсового карьера / В. А. Находв, А. И. Малов // Сергеевские чтения. Геоэкологические исследования для рационального природопользования, Москва, 2-3 апреля 2026 г. — Москва: Геоинфо, 2026. — С. 275-279.