

Международный проект «EnviMine» «Обеспечение экологической и геодинамической безопасности при закрытии рудников в Баренц-регионе»

В. П. Конухин¹, доктор технических наук,
А. А. Козырев², А. О. Орлов³, Ю. Г. Смирнов⁴, В. Г. Зайцев⁵
Горный институт Кольского научного центра РАН

У. Вайсянен⁶, Х. Хирвасниemi⁷, П. Йоханссон⁸, Я. Кивиломполо⁹,
П. Коури¹⁰, Ю. Купила¹¹, К. Пиетикайнен¹², Й. Пихлая¹³
Геологическая служба Финляндии, Северное отделение (Рованиemi, Финляндия)

Л. Алакангас¹⁴
Технический университет Лулео, отделение наук о Земле (Швеция)

Представлена краткая информация о результатах совместных исследований российских, финских и шведских ученых по первому этапу динамично развивающегося международного проекта «EnviMine», направленного на обеспечение экологической и геодинамической безопасности на территории Евро-Арктического Баренц-региона

Ключевые слова: международный проект «EnviMine», Баренц-регион, закрытие рудников, экологическая и геодинамическая безопасность, полевые исследования, рудник «Умбозеро», химический состав воды.

Введение

Евро-Арктический Баренц-регион, включающий в себя пять субъектов Российской Федерации: Мурманскую и Архангельскую области, республики Карелия и Коми и Ненецкий автономный округ, а также северные провинции Финляндии — Лапландию и Оулу, Швеции — Норрботтен и Вастерботтен и Норвегии — Финмарк, Тромс и Нурланн, представляет собой один из важнейших в мире источников минерального сырья. Не случайно с каждым

годом все большее значение приобретает развитие в этом регионе горнодобывающей промышленности.

В то же время с вводом в эксплуатацию новых подземных рудников и карьеров многие действующие предприятия, запасы которых дорабатываются или их отработка становится нерентабельной, подлежат закрытию. Проблемы закрытия рудников возникают и из-за возрастающих требований по промышленной и экологической безопасности, ограничивающих негативное техногенное воздействие на окружающую среду — воду, почву и воздух.

Требуется также поиск решений по восстановлению нарушенных земель включая хвостохранилища и отвалы пустых пород, которые в настоящее время являются серьезной угрозой экологической безопасности для окружающей среды из-за возможного разрушения временных дамб, пыления и распространения загрязнения в бассейнах поверхностных и грунтовых вод. Особое внимание должно быть уделено рассмотрению проблемы с точки зрения сохранения естественных природных ресурсов (лесов, пастбищ и водоемов), а также путей миграции оленей, что важно для коренного населения Арктического Севера.

Проект «EnviMine» был разработан в связи с актуальностью решения экологических проблем в горнодобывающем секторе экономики Баренц-региона.

¹ e-mail: vladimirr@goi.kolasc.net.ru.

² e-mail: kozar@goi.kolasc.net.ru.

³ e-mail: aleor@goi.kolasc.net.ru.

⁴ e-mail: smirnov@goi.kolasc.net.ru.

⁵ e-mail: murtfji@com.mels.ru.

⁶ e-mail: ulpu.vaisanen@gtk.fi.

⁷ e-mail: hannu.hirvasniemi@gtk.fi.

⁸ e-mail: peter.johansson@gtk.fi.

⁹ e-mail: janne.kivilompolo@gtk.fi.

¹⁰ e-mail: pentti.kouri@gtk.fi.

¹¹ e-mail: juho.kupila@gtk.fi.

¹² e-mail: kimmo.pietikainen@gtk.fi.

¹³ e-mail: jouni.pihlaja@gtk.fi.

¹⁴ e-mail: Lena.Alakangas@ltu.se.



Рис. 1. Местонахождение рудников «Кеми» в Финляндии, «Умбозеро» в России и «Лавер» в Швеции

Проект выполняется специалистами Финляндии, России и Швеции. План проекта связан с реальными экологическими условиями на выбранных объектах исследований — действующем руднике «Кеми» в Финляндии и закрытых рудниках «Умбозеро» в России и «Лавер» в Швеции.

Работы начаты в апреле 2012 г. и должны быть завершены до конца 2014 г. Проект финансируется по программе «Kolarctic ENPI CBC» Европейским союзом, Финляндией, Швецией и Россией.

Партнерами по проекту являются:

- Геологическая служба Финляндии (ГТК), Северное отделение, Финляндия (ведущий партнер);
- Федеральное государственное бюджетное учреждение науки «Горный институт Кольского научного центра Российской академии наук», Россия;
- Технический университет Лулео (LTU), отделение геонаук, Швеция.

Цели исследований и ожидаемые результаты проекта

Общая цель проекта — разработать экологические и геодинамические условия безопасности и создать базу для научно-технического обоснования процессов закрытия рудников. В числе конкретных задач проекта — разработка методологии экологически безопасного закрытия рудников в особых условиях Баренц-региона и выработка информации для специалистов, интересующихся горной экологией.

Вторая цель проекта — проведение экологических исследований с применением передовых технологий,

а также обмен опытом и научными знаниями между участниками проекта. Для принятых в проекте объектов исследований — рудников — будет создана обновленная база данных. В нее войдет информация о ситуации на рудниках с подробными научными данными по воздействию хвостов и пустой породы на окружающую среду, а также оценка последствий этого воздействия на качество воды на прилегающей территории. На основе имеющихся и новых данных будут разработаны рекомендации по программе реабилитации и мониторинга для изучаемых районов размещения исследуемых рудников.

Третья немаловажная цель исследований — развитие и расширение многосторонних отношений между финскими, российскими и шведскими организациями, ответственными за экологическое управление и надзор в Баренц-регионе, обмен опытом и научными знаниями.

Проект будет способствовать расширению приграничного сотрудничества между властями и учеными Баренц-региона и поднимет общую ответственность за решение экологических проблем, связанных с закрытием рудников в будущем.

Проект находится под контролем Координационной группы, в которую включены представители региональных властей, горнодобывающих компаний и организаций, принимающих участие в реализации проекта. Результаты по ходу работ представляются на семинарах и конференциях в странах — участниках проекта, а в дальнейшем будут представлены на международных форумах и использованы в сфере высшего образования.



Рис. 2. Аэрофотоснимок рудника «Кеми»

Объект исследований в Финляндии — рудник «Кеми»

Рудник «Кеми» находится в северной части страны (рис. 1). Это единственный действующий хромовый рудник в Европейском союзе. Запасы руды составляют около 37 млн т, а минеральные запасы — 87 млн т. Подземная добыча ежегодно составляет 1,2 млн т руды и приблизительно 0,5 млн т пустой породы. Пустая порода используется как закладочный материал для засыпки закрываемых стволов шахты. Некоторая часть пустой породы пригодна к использованию для различных строительных целей. Рудник «Кеми» был запущен в 1968 г. Карьер эксплуатировался с 1968 по 2004 гг. Подземная разработка началась в 2003 г. Рудник «Кеми» был выбран для проекта как действующий рудник с имеющейся обширной базой данных и возможностью получения дополнительной информации [1].

Рудник «Кеми» (рис. 2) в настоящее время является действующим и отличается хорошими экологическими характеристиками и технико-экономическими показателями. Небольшие экологические проблемы вызывает окисленная руда. Как в хромовой руде, так и в пустой породе нет легкорастворимых минералов. Рудник работает согласно стандарту ISO 14001 по сертифицированной системе контроля экологической оценки. Система контроля включает, например, мониторинг качества грунтовых и поверхностных вод, выбросов вредных примесей и пыли.

Мониторинг качества грунтовых вод и их уровня осуществляется с помощью восьми скважин. Начало мониторинга положено в 2004 г. Отбор проб

проводится четыре раза в год. Мониторинг включает в себя измерения температуры, уровня pH, электропроводности, концентрации кислорода, общего фосфора, общего азота, аммонийного азота, хлора, железа, хрома, никеля и цинка. Мониторинг качества поверхностных вод проводится на нескольких площадках от 4 до 12 раз в год.

На территории рудника и его окрестностей были проведены исследования хвостов и пустой породы, растительного и животного мира. Отдельно изучалась социальная ситуация в районе расположения рудника. Кроме того, производился мониторинг шума и колебаний. Следует отметить, что за последние несколько лет применение новых технологий значительно уменьшило негативные экологические последствия. При этом рекультивация и восстановление поверхности осуществлялись по заранее разработанному проекту. На руднике используется замкнутый водооборот при обогащении, вследствие чего объем водосброса значительно уменьшился.

Азот являлся фактором нагрузки из-за использования взрывчатых веществ и старых отвалов пустой породы. В настоящее время используются эмульсионные взрывчатые вещества, которые практически не растворимы в воде. Рудник «Кеми» не использует химических реагентов кроме флокулянтов в процессе обогащения с применением гравиметрической сепарации. Это также минимизирует вредное воздействие на окружающую среду.

Обобщение и интерпретация имеющихся данных с рудника «Кеми» осуществляется в соответствии с планом проекта. Воздействие работы рудника

на воду и грунт на прилегающей территории будет изучаться на площадке рудника и контрольных участках на прилегающей территории с помощью анализа органических донных отложений, грунтовых и поверхностных вод. Моделирование направлений движения потоков грунтовых и поверхностных вод определит движение нерастворенных веществ, поступающих в окружающую среду. Отбор проб органических донных отложений и проб воды для анализа выполнен в 2013 г. Отбор проб органических донных осадков на руднике «Кеми» приказан на рис. 3.

Геохимический состав и свойства отложений будут исследованы методами количественной оценки с использованием мультиэлементных анализаторов ICP-MS и ICP-OES. Пробы воды анализируются аналогичным методом на элементы с помощью IC-метода на анионы и титриметрическим определением на щелочность и содержание KMnO_4 . Применяемые аналитические методы различны для стран-партнеров в связи с различными типами и характеристиками руд и вмещающих пород для каждого исследуемого горнодобывающего предприятия Баренц-региона.

Объект исследований в России — рудник «Умбозеро»

Рудник «Умбозеро» расположен в центральной части Мурманской области (см. рис. 1). По первому этапу проекта «EnviMine», в период с 3 апреля 2012 г. по 31 марта 2013 г., были решены две основные задачи:

- анализ социально-экономического состояния региона, в том числе близлежащих территорий рудника «Умбозеро» после его закрытия;
- проведение на площадке геофизических исследований и мониторинга состава поверхностных вод и снежного покрова для выявления основных индикаторов загрязнения окружающей среды.

Мурманская область — один из наиболее крупных и экономически развитых регионов европейского севера России. На севере она омывается Баренцевым морем, на востоке и юге — Белым морем, на западе граничит с Норвегией и Финляндией, а на юге — с Республикой Карелия Российской Федерации.

В области насчитывается 61 особо охраняемая природная территория общей площадью 122,4 тыс. га (8,44% площади региона), в том числе 3 заповедника, 11 государственных природных заказников и 47 памятников природы. На территории Ловозерского района, где расположен рудник «Умбозеро», находятся заповедник регионального значения и сеть природных памятников федерального и регионального значения.

Рудник «Умбозеро» расположен на западном склоне Ловозерского щелочного массива. Месторождение представлено комплексом пологопадающих пластообразных залежей. Рудные залежи, на которых проводились горные работы, расположены на расстоянии 50—60 м друг от друга по вертикали (основной рудный горизонт III-14 и дополнительный III-10). Руды и вмещающие породы — устойчивые.



Рис. 3. Отбор проб органических донных осадков на площадке рудника «Кеми»

Коэффициент крепости пород по шкале Протодяконова от 10 до 15. Мощность обрабатываемого рудного тела в пределах отметок +290 м и +170 м составляет 1,5—3,0 м. Угол падения пласта — от 6° до 30°. Обогащение руд велось на Умбозерской обогатительной фабрике.

Месторождение, расположенное в центре Кольского полуострова, в течение последних лет уверенно занимает первое место по геодинамической (сейсмической) активности массива среди всех эксплуатируемых рудных месторождений России. Рудники этого месторождения отличаются тем, что горно-тектонические удары и техногенные землетрясения происходят здесь более часто и мощно, чем на других рудниках страны.

На рис. 4 приведена гистограмма распределения сильных сейсмических событий в массиве месторождения, происшедших в течение прошлых лет, энергия которых оценивается магнитудой $M > 1,0$, т. е. более 106 Дж.

Когда площадь отработки по верхней залежи достигла примерно 1 км по простиранию и 0,2 км по падению, в массиве рудника произошел сильнейший горно-тектонический удар (17 августа 1999 г., $M = 4,0—4,4$), в результате которого были разрушены горные выработки нижней залежи.

Для горно-тектонических ударов на руднике «Умбозеро» характерно то обстоятельство, что они вызваны большими горизонтальными тектоническими напряжениями, действующими в массиве рудника. Горизонтальные напряжения вызывают относительный сдвиг геолого-структурных блоков в направлении действия максимальных напряжений в массиве

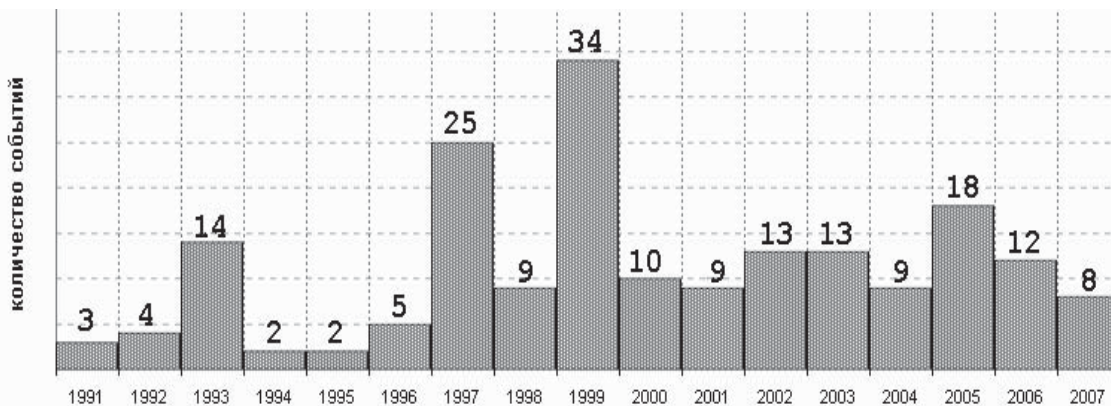


Рис. 4. Распределение по годам количества сильных сейсмических событий ($M \geq 1$) в массиве Ловозерского месторождения

под влиянием горных выработок. Поэтому основной формой разрушения выработок и целиков на руднике является сдвигание относительно узких подготовительных и капитальных выработок меридионального направления в кровле и почве.

В результате горно-тектонических ударов сечение выработок перекрывается на площади от 10% до 90% за счет разрушений в кровле и ее сопряжениях с боками, а также в почве выработок. Целики также разрушаются по периферии и в сопряжениях с кровлей, не теряя способности сопротивляться вертикальным нагрузкам. Площадь единичных разрушенных выработок в плоскости нижней рудной залежи в результате горно-тектонических ударов на руднике «Умбозеро» составила более 500 м².

В период работы рудника шахтные и оборотные воды обогатительной фабрики, а также дренажные воды хвостохранилища из отстойника сбрасывались в озеро. Только в 2004 г. сброс в Умбозеро составил 4,95 млн м³, в том числе: недостаточно очищенных шахтных вод — 4,9 млн м³, нормативно чистых производственных сточных вод — 0,041 млн м³ и недостаточно очищенных — 0,008 млн м³. В последние годы отмечалось увеличение содержания марганца в Умбозере, и в отдельные сезоны года по этому показателю превышались предельно допустимые концентрации (ПДК). В 1997 г. максимальное значение марганца составило 3,5 ПДК. Наблюдалось содержание железа, превышающее ПДК в 2—10 раз.

Умбозеро — наиболее крупный водоем Кольского полуострова как по площади, так и по объему. Озеро является рыбохозяйственным водоемом высшей категории. Оно загрязняется сточными водами рудника «Умбозеро» и обогатительной фабрики и, через систему рек и озер, карьерными водами рудника «Восточный» ОАО «Апатит» (более 50 млн м³ в год). В разные годы в озере регистрируется повышенное содержание взвешенных веществ, фторидов, нефтепродуктов, марганца, меди.

В начале августа 2009 г. произошло полное самозатопление всех подземных выработок рудника «Умбозеро» шахтными водами. В настоящее время

шахтные воды выходят из вскрывающей штольни самотеком.

Хвостохранилище обогатительной фабрики рудника «Умбозеро» построено в примыкании к склону горы Аллуйв, расположено по рельефу выше Умбозера и ниже обогатительной фабрики. Сооружение оборудовано дренажной системой, предназначенной для организованного отвода фильтрующей через дамбу воды. К настоящему времени накоплено 5,7—5,9 млн м³, или около 10 млн т материала. Полезная площадь хвостохранилища — 14 га, высота дамбы — 43 м. Хвосты обогащения представляют собой измельченный порошок серого цвета, в котором выделяются отдельные зерна щелочных алюмосиликатов, зеленые призмы оливина и красные кристаллы эвдиалита. Плотность материала составляет 2,72—2,74 т/м³. Средний минеральный состав отвальных хвостов: полевой шпат — 30—55%, нефелин — 25—30%, эгирин — 12—20%, другие минералы — около 1%.

В процессе полевых работ периодически проводился отбор проб воды из источников на территории промплощадки рудника и за ее пределами, отбор проб хвостов из хвостохранилища обогатительной фабрики, выполнялась первичная съемка георадаром поверхности над обрабатываемой рудной залежью подземного рудника и поверхности хвостохранилища.

Пробы воды отбирались из вскрывающей горной выработки, ближайших ручьев, на хвостохранилище и в его отстойнике, а также в губе Песочной и губе Северной на Умбозере. Пробы снега в зимний период отбирались на промплощадке рудника и прилегающей территории. В качестве примера на рис. 5 показаны участки отбора проб воды.

По результатам отбора проб воды были проведены лабораторные исследования по определению ее химического состава. На первоначальном этапе определялось содержание следующих веществ: Na, K, Sr, Cu, Ni, Mn, Fe, Mg, Ca, P₂O₅. Методология аналитических исследований опробована при проведении предыдущих исследований, связанных с оценкой использования подземных вод для водоснабжения города Апатиты [2; 3; 4].



Рис. 5. Участки отбора проб воды (цифрами обозначены места отбора проб в соответствии с рис. 6)

Измерение массовой концентрации Na, K, Sr выполнялось эмиссионным пламенно-фотометрическим методом, основанным на измерении абсолютной интенсивности излучения атомов Na, K, Sr, на соответствующих резонансных линиях элементов при возбуждении их в пламени ацетилен — воздух в соответствии с ПНД Ф 14.1:2:4.138-98. Измерения проводились на атомно-абсорбционном спектрофотометре «Квант-2А». Определение массовой концентрации Cu, Ni, Mn, Fe, Mg, Ca выполнялось пламенным атомно-абсорбционным методом. Определение общего фосфора выполнялось на спектрофотометре UNICO 1201. Некоторые результаты измерений химического состава воды представлены в табл. 1.

Дополнительно определялось содержание в воде фтора (табл. 2). Так, допустимое содержание в воде фторидов для II климатического района (Мурманская область), составляет 1,5 мг/л. На рис. 6 показана схема участков отбора проб и трассы геофизических исследований на первом этапе работ по проекту.

Как видно из табл. 2, содержание фтора в воде, поступающей из подземных выработок, составляет 38 мг/л, что значительно превышает допустимое количество. Также наблюдается увеличение содержания фтора в прудке хвостохранилища (2,9 мг/л) и отстойниках (19,1, 33,0 мг/л).

Объект исследований в Швеции — рудник «Лавер»

Подземный медный рудник «Лавер» расположен в северной части Швеции (см. рис. 1). Месторождение в течение 10 лет разрабатывала компания «Boliden Mineral AB», в 1946 г. рудник был закрыт. Исходное месторождение содержало более 1,5 млн т меди со средним содержанием меди 1,51%. Основные горные породы данного участка представлены гранитами.

Производство оставило 1,2 млн т хвостов и небольшое количество пустой породы [5]. Площадь хвостохранилища составляет 12,2 га и расположено к югу от карьера. Основные минералы в хвостах: пирротин, халькопирит, кварц, плагиоклаз, биотит и мусковит.

На хвостохранилище есть территории, как покрытые растительным покровом, так и без покрова. В 1951 и 1952 гг. снеговой сток смыл 25% хвостов вниз по течению. Прежний пруд-отстойник был заполнен сульфидными крупными фракциями, в то время как тонкие фракции были смыты речной системой. Новый пруд был построен в 3 км ниже по течению. Оставшиеся хвосты нейтрализованы известью. На них был нанесен плодородный слой и высеяны семена травы.

Таблица 1. Содержание элементов, мг/л

№ пробы	P ₂ O ₅	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cu	Ni	Mn ²⁺	Fe общ.	Sr ²⁺
1	2,04	3,46	216,4	0,62	0,06	0,0012	0,0025	0,0063	0,040	0,038
2	2,04	2,95	125,6	1,42	0,57	0,0014	0,0020	0,0045	0,112	0,084
3	0,50	1,68	7,24	1,56	0,42	След	След	0,0025	0,050	0,032
4	0,88	4,27	34,20	3,15	1,00	0,0046	0,0029	0,048	1,090	0,102
5	0,42	3,52	48,58	1,80	0,54	0,002	0,0011	0,0040	0,36	0,089
6	0,25	0,55	3,38	0,47	0,13	След	0,0011	0,0015	0,20	0,019
7	0,50	0,70	4,70	0,30	0,13	След	След	0,0017	0,12	0,017
8	0,50	0,65	3,41	0,52	0,27	След	0,0024	0,0029	0,070	0,024
9	След	0,76	4,03	0,75	0,36	След	След	0,0011	0,15	0,031
10	След	1,63	7,13	1,56	0,52	След	След	0,0025	0,065	0,036
Норматив по СанПин	—	—	200	30	—	1,0	0,1	0,1	0,3	7,0

Таблица 2. Содержание в воде фтора

Участок отбора проб воды	Содержание, мг/л
1	38,0
2	15,5
3	0,8
4	2,9
5	19,1
8	0,4
9	0,1
10	1,3
11	33,0

Сегодня хвостохранилище главным образом покрыто свежей травой и деревьями. Деревья в основном принадлежат к семействам сосны, ели и ивовых, которые «переселились» на хвостохранилище из прилегающих лесов.

В качестве основной задачи исследований на руднике «Лавер» была принята оценка эффективности функционирования отстойника и процессов сульфидного окисления в хвостохранилище, а также изучение их влияния на прилегающие водные ресурсы. По полученным результатам до начала восстановительных работ можно оценить риски и эффективность используемых процессов.

Изучение минералогии и геохимии хвостохранилища, грунтовых и дренажных вод частично было проведено в 1993 и 2001 гг. [5; 6; 7]. В вертикальном разрезе хвосты имеют три четких зоны: окисленная зона толщиной приблизительно 1,3 м, промежуточная зона вторичного обогащения меди с различной толщиной по всему хвостохранилищу от нескольких сантиметров до 1 м и глубокая неокисленная зона. Верхняя окисленная зона очищена от сульфидов в отличие от нижележащего неокисленного материала. В промежуточной зоне, где произошло вторичное обогащение меди, основной вторичный минерал был определен как ковеллин [8]. Четкая граница между окисленной и неокисленной зонами дала возможность оценить средний фронт окисления как 2,8 см в год.

Выявлено, что из хвостов металлы вымываются в дренажные воды, где происходит их окисление. Массовый баланс показал, что лишь 5—10% металлов, связанных с рудой, выветриваются из хвостохранилища, и обнаружены в ручье. Это говорит о том, что большая часть металлов осталась в хвостах при вторичном минеральном осаждении.

Были сделаны оценки на основе полевых измерений массовой нагрузки в ручье годового переноса S из хвостохранилища. Объем S, перенесенный в ручей (фаза растворения, 16,5 кг в год), был схожим с рассчитанным при сульфидном окислении в хвостах (16,9 кг в год).

Годовой перенос сульфидных элементов в ручье сократился более чем на 40%, а уровень pH увеличился. Объемы S, переносимые в дренаж каждый год, соответствуют изменениям в переносе S в хвостохранилище за счет окисления. Это означает, что уровень сульфидного окисления за последние годы уменьшился.

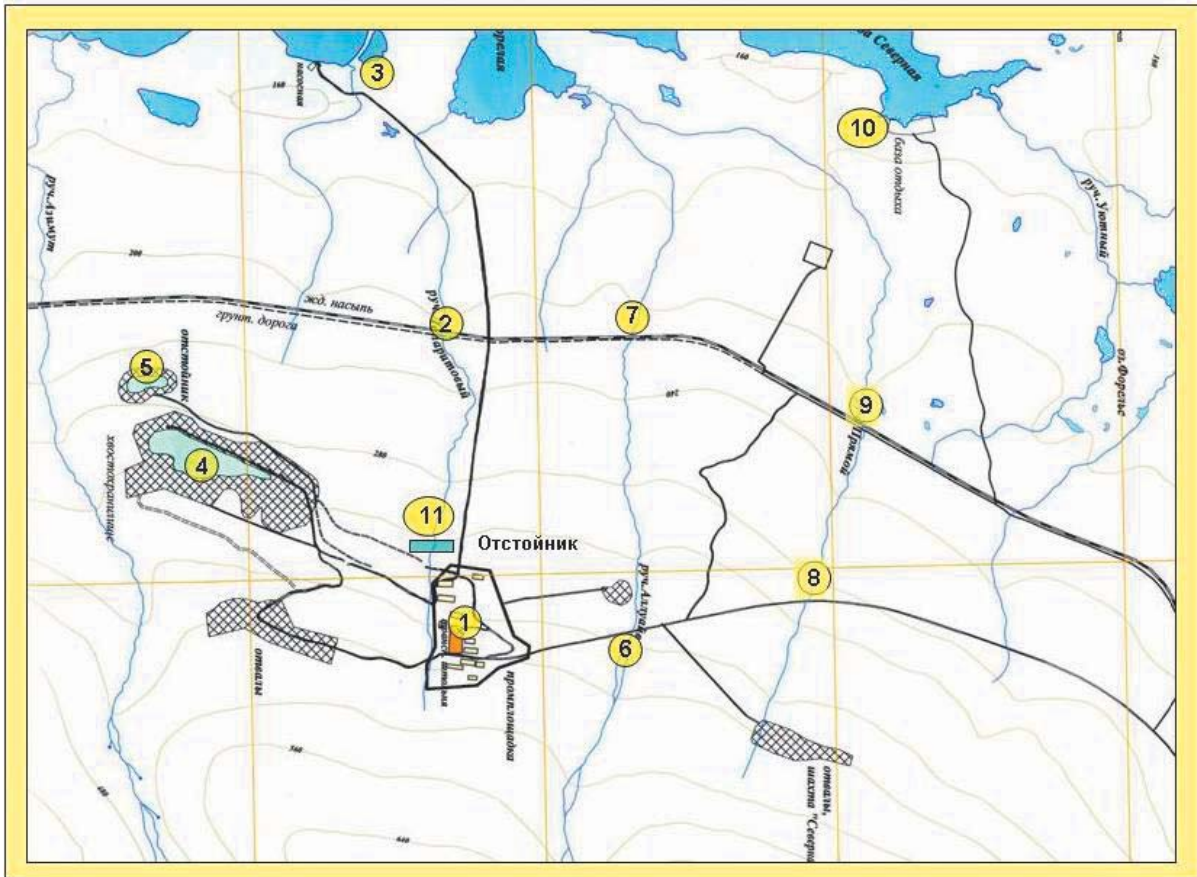


Рис. 6. Схема участков отбора проб и трассы геофизических исследований

Использование результатов исследований

Риски загрязнения грунтовых, поверхностных вод, поверхностных отложений и грунтов, как и атмосферы, могут быть существенно снижены при использовании результатов выполненных работ по проекту не только для исследуемых объектов и прилегающих к ним территорий, но и по всему Евро-Арктическому Баренц-региону.

Полученная информация может быть также полезна при проектировании новых горнодобывающих предприятий и при создании методологии безопасного закрытия конкретных рудников. База данных может быть использована и в качестве учебного материала для студентов и лиц, связанных с экологическими проблемами горнодобывающих предприятий.

Литература

1. Mroueh U.-M., Vahanne P., Wahlström M. et al. Mine closure handbook / P. M. Heikkinen, P. Noras & R. Salmiinen (eds.); GTK, VTT, Outokumpu Oyj, Finnish Roads Enterprise, Soil and Environment Ltd. GTK-Espoo. — [S. l.], 2008. — 169 p.

2. Конухин В. П., Козырев А. А., Орлов А. О., Смирнов Ю. Г. Результаты исследований альтернативных источников водоснабжения населения // Дальний Восток: Труды III международной научной конференции: Отдельный выпуск Горного информационно-

аналитического бюллетеня (научно-технического журнала). — 2009. — № 0В5. — С. 174—182.

3. Конухин В. П., Козырев А. А., Орлов А. О., Смирнов Ю. Г. Исследование подземных источников воды для города Апатиты // Экология и промышленность России. — 2010. — № 4. — С. 52—54/

4. Конухин В. П., Козырев А. А., Орлов А. О., Смирнов Ю. Г. Исследование подземных источников для водоснабжения городов Заполярье экологически чистой водой на примере города Апатиты // Арктика: экология и экономика. — 2012 — № 2 (6). — С. 58—65.

5. Ljungberg J., Öhlander B. The geochemical dynamics of oxidising mine tailings at Laver, northern Sweden // J. of geochemical exploration. — 2001. — 74. — P. 57—72.

6. Alakangas L., Öhlander B. Formation and composition of cemented layers in low-sulphide mine tailings, northern Sweden // Environmental Geology. — 2006. — 50. — P. 809—819.

7. Alakangas L., Lundberg A., Öhlander B. Estimation of temporal changes in oxidation rates of sulphides in copper mine tailings at Laver, northern Sweden // Science of the Total Environment. — 2010. — 408, 6. — P. 1386—1392.

8. Holmström H., Ljungberg J., Ekström M., Öhlander B. Secondary copper enrichment in tailings at the Laver mine, Northern Sweden // Environmental Geology. — 1999. — 38. — P. 327—342.