

УДК 622.271.1:712.2

**ГЕОЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ
ВЫРАБОТАННЫХ КАРЬЕРНЫХ ПРОСТРАНСТВ НА УРАЛЕ**

Л. С. Рыбникова¹, П. А. Рыбников¹, И. В. Тарасова²

¹*Институт горного дела УрО РАН, E-mail: ribnikoff@yandex.ru,
ул. Мамина-Сибиряка, 58, 620075, г. Екатеринбург, Россия*

²*Уральский государственный архитектурно-художественный университет,
E-mail: liticias@yandex.ru, ул. К. Либкнехта, 23, 620075, г. Екатеринбург, Россия*

Деятельность добывающей и перерабатывающей промышленности приводит к формированию горнопромышленного ландшафта. Рекультивация выработанного пространства является эффективным способом решения природоохранных проблем горнодобывающей территории. Для приведения нарушенных участков земли в пригодное для их дальнейшего освоения состояние целесообразно использовать отходы добычи полезных ископаемых и перерабатывающих производств. Обоснование технологии размещения отходов в отработанном Восточном карьере горы Магнитной ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (Челябинская обл.) базируется на анализе гидродинамической и гидрохимической истории объекта, лабораторном изучении взаимодействия закладочных смесей с карьерной водой, прогнозе изменения обстановки в процессе заполнения карьера на базе моделирования гидрогеомиграции.

Отходы, выработанное пространство, архитектурно-ландшафтные объекты, подземные воды, поверхностные воды, водоотлив, загрязнение, химический состав, геомиграционное моделирование, рекультивация

В процессе разработки месторождений полезных ископаемых появляется «техногенный ландшафт, структура и формирование которого обусловлены деятельностью горнодобывающей и горноперерабатывающей промышленности» [1].

После завершения деятельности по добыче и переработке полезных ископаемых невозможно вернуть изначальное состояние природной окружающей среды, важнее обеспечить условия гармонического сосуществования природы и техники на нарушенной территории. Мероприятия, которые проводятся на промышленной территории для приведения ее в более качественное состояние, обычно характеризуются разными терминами: рекультивация, реабилитация, реновация, ландшафтное освоение, ревитализация и др. [2, 3]. В действующих нормативных документах используется термин «рекультивация» [1, 4]. Наиболее обобщающим является понятие «реабилитация», поскольку предполагает разнообразные действия по оптимизации — от инженерных до социокультурных, от архитектурных до экономических. Более широкое понятие «ревитализация» предполагает не только восстановление, но и оживление с целью дальнейшего развития и использование территории.

Мероприятия по рекультивации определяются тем, как будет использоваться территория в дальнейшем: для сельско-, лесо-, водохозяйственных, строительных, рекреационных, природоохранных или санитарно-оздоровительных целей [4].

Рекультивация территорий, нарушенных горными работами, осуществляется в два этапа. На первом, техническом, проводится заполнение выработанного пространства, террасирование откосов отвалов и бортов карьеров, выравнивание поверхности, засыпка и планировка шахтных провалов. Размещение отходов в выработанном пространстве позволяет решить ряд технологических, экологических и экономических проблем. Это снижение площади изъятых из оборота земель, уменьшение загрязнения поверхностных и подземных вод, предотвращение аэротехногенного загрязнения, ликвидация старых карьерных выемок, восстановление ландшафтов, снижение платежей за размещение отходов. При отработке месторождений открытым способом образуются значительные по глубине и площади выемки, большие территории отводятся под размещение вскрышных пород и некондиционных руд. На подземных рудниках Урала традиционно применялась технология отработки с обрушением кровли выработанного пространства, что приводило к образованию провалов глубиной до 50 м, зон обрушения и сдвижения площадью в десятки и сотни гектаров [5]. Заполнение выработанного пространства подземных рудников отходами представляет собой технический этап рекультивации и позволяет предотвратить такие процессы. На втором этапе рекультивации создаются условия, обеспечивающие возможность дальнейшего использования рекультивированных земель по целевому назначению, в том числе затопление, восстановление плодородия почв, строительство новых объектов.

Цель работы — обоснование возможности, целесообразности и экологической безопасности рекультивации Восточного карьера горы Магнитной ОАО «Магнитогорский металлургический комбинат» (ОАО «ММК») с применением закладочных материалов на основе продуктов переработки шлаков, оценка гидрогеоэкологических последствий захоронения отходов в выработанном пространстве.

АНАЛИЗ МИРОВОГО ОПЫТА РЕАБИЛИТАЦИИ ГОРНОПРОМЫШЛЕННЫХ ЛАНДШАФТОВ

Горнопромышленные территории, на которых завершена добычная деятельность, подвергаются обустройству для их последующего использования. На них создаются архитектурно-ландшафтные объекты, горные музеи, места эколого-культурного туризма [6, 7]. Так, на территории каменоломен на горе Ликкебетос в Афинах создан парк, в котором амфитеатр расположен на вершине горы, по склону ниже находятся объединенные пандусами и лестницами площадки разного назначения. В 1864–1867 гг. открыт живописный парк Бютт-Шомон (Франция) на месте старой заброшенной каменоломни. В г. Орджоникидзе (Днепропетровская обл., Украина) на территории бывших марганцевых карьеров в 1972 г. разбит Александровский ландшафтный парк.

На месте отработанного медного рудника Фламбо (США, штат Висконсин) воссоздан уголок дикой природы площадью 100 га, в том числе лесистая местность, водно-болотные угодья; проложены пешеходные тропы, конные маршруты. Территория является популярным местом отдыха и туризма круглый год.

Ботанический сад «Эдем» (графство Корнуолл, Великобритания) расположен на дне отработанного каолинового карьера глубиной 60 м. Основа сада — крупнейшая в мире оранжерея, состоящая из нескольких геодезических куполов, под которыми собраны растения со всего мира (площадь оранжереи 22 тыс. м²).

В бывшем карьере известняка расположен один из самых необычных театров мира — театр Дальхалла (Швеция, 270 км к северо-западу от Стокгольма). По форме Дальхалла напоминает амфитеатр, террасами спускающийся к изумрудному озеру (затопленные части карьера), размеры его 60 м в глубину, 400 м в длину и 175 м в ширину.

В отработанных соляных шахтах Австрии в районе г. Зальцбург организованы экскурсии в глубь горы с проездом на поезде по шахте, прогулками по подземному озеру на деревянном пароме. С мая 2007 г. в городе Соледаре (Донецкая обл., Украина) начал принимать пациентов спелеосанаторий “Соляная симфония”, расположенный в соляной шахте рудника “Артемсоль” на глубине 288 м.

В список всемирного наследия ЮНЕСКО входят 15 памятников истории горного дела, которыми являются горнопромышленные ландшафты, шахты, рудники [8]. Горнопромышленный ландшафт Корнуолла и Западного Девоншира на юго-западе Англии сложился в начале XIX в., когда этот район обеспечивал две трети мирового производства меди. Индустриальный ландшафт включает многочисленные рудники и глубокие шахты, плавильные печи и машинные залы, рабочие города, порты. В 1983 г. открыта для посещения угольная шахта, где располагается музей, посвященный угольной промышленности.

К 300-летию основания г. Нижний Тагил (Свердловская обл.) в 2022 г. планируется создать “Индустриально-ландшафтный музейно-парковый комплекс Демидов-парк” на территории бывших Демидовских заводов, карьеров и шахт. Территория “Демидов-парка” будет включать архитектурно-исторический комплекс в центре города, музей-завод, карьеры горы Высокой и Меднорудянского рудника, акваторию Тагильского пруда, гору Лисья и другие объекты.

ОПЫТ РЕКУЛЬТИВАЦИИ ГОРНОТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПУТЕМ ЗАХОРОНЕНИЯ ОТХОДОВ В ВЫРАБОТАННОМ ПРОСТРАНСТВЕ

В последние десятилетия на Урале реализован ряд успешных проектов по использованию отработанных горных выработок для захоронения отходов.

На Высокогорском горно-обогатительном комбинате (добыча открытым и подземным способом железных руд и их переработка, г. Нижний Тагил, Свердловская обл.) отходы производства используются для рекультивации 8 карьеров, что обеспечило отказ от изъятия из землепользования 5,8 тыс. га [9]. Здесь с 1995 г. реализуется проект рекультивации Главного карьера отходами обогащения, целью которого является восстановление нарушенных производством земель. Шламы самотеком поступают по горизонтальной штольне из Высокогорского обогатительного цеха в шламопровод общей протяженностью 710 м, сброс пульпы достигает 2 т·м³/ч. Рекультивация Главного карьера (глубина 290 м, объем 72 млн м³) отходами обогащения проводится в непосредственной близости от действующей шахты Магнетитовая. Применяется технология, которая обеспечивает равномерное распределение шламов и исключает опасность затопления шахты. Вода, подаваемая в Главный карьер вместе с отходами обогащения, фильтруется через толщу горных пород в шахту, откуда откачивается с помощью водоотливных установок и направляется в оборотную систему водоснабжения предприятия. К настоящему времени заскладировано 11 млн м³ отходов обогащения, а глубина Главного карьера сократилась на 150 м. Предприятие отказалось от привлечения новых земель под шламохранилища и постепенно восстанавливает природный ландшафт.

По результатам анализа ситуации в рекультивируемых карьерах в районе г. Нижний Тагил сделан вывод об экологической безопасности технологии захоронения отходов обогащения [9]. Для защиты окружающей среды и предотвращения загрязнения гидросферы необходимо предотвратить окисление оставшихся в отходах рудных минералов, ограничив доступ кислорода и воды в толщу отходов. Этого можно достичь, если поверхность отходов перекрыта противодиффузионным экраном, исключая инфильтрацию в них атмосферных осадков, а кровля заскладированных отходов не превышает местного базиса разгрузки подземных (грунтовых) вод. Выполнение второго условия не всегда возможно, особенно на горноскладчатом Урале.

Объем закладки выработанного пространства за последние годы существенно увеличился: на Гайском ГОКе он составляет 2.1 млн м³/год, на Учалинском — 1.7, на Сибайском — 0.7 млн м³/год [10].

На Гайском ГОКе (добыча открытым и подземным способом медно-цинковых руд и их переработка, Оренбургская обл.) с 1997 г. используются хвосты для приготовления твердеющей закладочной смеси непосредственно на закладочном комплексе подземного рудника после гидроциклонирования. В карьере № 2 (объем 68 млн м³, площадь 83 га, глубина 255 м) размещаются хвосты обогащения. Карьер соединен с подземным рудником дренажным штреком, для предотвращения прорыва воды из рекультивируемого карьера построена водонепроницаемая бетонная перемычка. Вода, образованная после осветления в чаше карьера, подается в оборотную систему водоснабжения. Для создания нового хвостохранилища потребовалось бы изъятие 250 га земель сельскохозяйственного назначения. Реализация проекта с 2000 г. подтвердила его безопасность и экономическую эффективность [11].

На Учалинском ГОКе (добыча открытым и подземным способом медно-колчеданных руд, Республика Башкортостан) проводятся опытные работы по разработке технологии складирования сгущенных хвостов обогащения путем гидравлической закладки для предотвращения прорыва пульпы в подземный рудник (с ним связан карьер объемом 150 млн м³ и глубиной 360 м) [12, 13].

В Челябинской области каждый год объемы накопленных промышленных отходов возрастают. На начало 2014 г. отходы занимали площадь 10.1 тыс. га и составляли 3.2 млрд т (плюс 3.7% по сравнению с началом 2013 г.) [14]. Доля отходов предприятий по добыче полезных ископаемых и металлургических заводов примерно одинакова — 35 и 37%, золы и шлаки предприятий электроэнергетики составляют 17%. Крупнейшие источники образования отходов по итогам 2013 г. — ОАО “ММК” (47.2 млн т), ЗАО “Михеевский ГОК” (27.2 млн т), ОАО “Южуралзолото ГК” (11.65 млн т), ОАО “Учалинский ГОК” (11.35 млн т), ОАО “Еткульзолото” (3.35 млн т), ОАО “Челябинский металлургический комбинат” (3.13 млн т). Доля использования отходов горнодобывающего производства не превышает 20%.

Для ОАО “ММК” чрезвычайно актуальны взаимосвязанные проблемы: рекультивация отработанных карьеров и утилизация отходов собственного производства в процессе формирования закладочных смесей. Их решение позволит подойти к вопросу восстановления территорий, нарушенных многолетней горнопромышленной деятельностью.

Магнитогорское железорудное месторождение расположено в зоне, предназначенной для добычи руды, проведения работ по рекультивации, в 12 км от центра г. Магнитогорска. Расстояние до ближайших водных объектов: 5 км на запад до Магнитогорского водохранилища на р. Урал, 5 км на восток до р. Сухая (левобережный приток р. Урал) и шламохранилища на ней.

В тектоническом отношении район находится в пределах Магнитогорской мегазоны, которая представляет собой сложную синклиналичную структуру, протянувшуюся в субмеридиональном направлении согласно с простираемостью структур Южного Урала. Месторождение Магнитогорское локализовано преимущественно в известняках (мраморах) горы Магнитной. В составе магнетитовых руд присутствует пирит, среднее содержание которого составляет 4.5%.

Начало разработки Магнитогорского железорудного месторождения датируется 1747 г., однако добыча кустарным способом началась гораздо раньше. Месторождение “Гора Магнитная” отрабатывалось двумя карьерами: Западным, глубиной 105 м, в период 1929–1994 гг.; Восточным, глубиной 130 м, с 1946 по 2006 г. Общая площадь выработанного пространства Восточного карьера составляет 163 га, длина 1945 м, ширина 1015 м, высота уступов 10 м. К настоящему

времени месторождение почти полностью отработано, добыто 538 млн т руды. В 1984 г. начались рекультивационные работы на Западном карьере, которые продолжаются до настоящего времени. В связи со списанием балансовых запасов карьера Восточный на его территории в ближайшее время предстоит выполнить рекультивацию.

Во время разработки Западного и Восточного карьеров месторождения был принят наиболее простой и эффективный способ осушения глубокими водопонижающими скважинами в сочетании с поверхностным зумфтовым водоотливом. Наибольшее влияние на обводненность карьеров оказывают трещинно-карстовые воды и напорные воды глубоких зон разломов, которые приурочены к системе пересекающихся трещин в нижней части рудоносной зоны.

Формирование химического состава подземных вод месторождения связано с химико-минералогическим составом рудной зоны и наличием в составе магнетитовых руд сульфидов. В естественных условиях до разработки месторождения они не оказывали существенного влияния вследствие слабой растворимости. В процессе открытой отработки при осушении горных пород начинается окисление сульфидов, подземные воды приобретают сульфатный состав (содержание сульфат-иона до 1.5 г/дм^3), минерализация повышается до 2.2 г/дм^3 .

Области формирования эксплуатационных запасов месторождений подземных вод находятся за пределами области возможного влияния намечаемой деятельности по рекультивации карьера Восточный.

ГИДРОГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КАРЬЕРНЫХ ВОД И ЗАКЛАДЧНОГО МАТЕРИАЛА

Для рекультивации карьерных выемок могут использоваться вскрышные породы, не содержащие радиоактивные элементы и токсичные соединения в концентрациях, опасных для жизни человека и животных [16]. В технологии закладки Западного карьера насчитывается около 20 видов отходов различных производств Магнитогорского металлургического комбината. Подготовка текущих и отвальных шлаков в качестве закладочного материала происходит на дробильно-сортировочных установках.

В качестве материала для заполнения карьерной выемки на горнотехническом этапе рекультивации планируется использовать закладочные смеси на основе продуктов переработки шлаков с добавлением некоторых видов отходов, образуемых в результате хозяйственной деятельности комбината, класс опасности которых для окружающей среды не выше 4. Доля металлургических шлаков в объеме техногенных отходов комбината без отходов горно-обогатительного производства около 80%. Основу металлургических шлаков составляют оксиды CaO , SiO_2 , MgO и FeO . Сера в шлаках находится в виде сульфидов или сульфатов Ca^{2+} , Mn^{2+} и Fe^{2+} [17].

Формирование свойств закладочного материала, поведение закладочного массива и состав вод, формирующихся при складировании закладочных смесей, определяются воздействием факторов окружающей среды: состава воды, температуры, давления.

Возможность применения закладочного материала для заполнения карьерной выемки зависит главным образом от его отношения к воде: при складировании важно взаимодействие с подземными водами либо с атмосферными осадками. Активное поведение закладочного материала в воде может оказать негативное воздействие на качество подземных и поверхностных вод. В табл. 1 приведены данные режимных наблюдений за химическим составом карьерных вод по трем объектам: Восточный карьер — объект исследования, Западный — рекультивируемый в течение последних 30 лет, Подотвальный — разрабатываемый в настоящее время.

ТАБЛИЦА 1. Характеристика химического состава вод Восточного, Западного и Подотвального карьеров за 2004–2013 гг.

Химический состав	Содержание по карьерам, диапазон значений			ПДК _{рх} *
	Восточный	Подотвальный	Западный	
рН, ед.	7.5–8.11	7.5–8.2	10.8–12.3	—
Жесткость, ммоль/дм ³	10.9–28.2	12.2–27.4	10.9–13.8	—
Сухой остаток, мг/дм ³	854–2228	761–2020	1248–2294	—
Хлорид-ион, мг/дм ³	12–114	30–183	314–388	300
Сульфат-ион, мг/дм ³	571–1347	443–1249	250–484	100
Аммоний, мг/дм ³	< 0.05–1.11	0.20–14.20	3.15–4.07	0.5
Нитрит-ион, мг/дм ³	0.03–0.32	0.11–2.61	0.90–8.47	0.08
Нитрат-ион, мг/дм ³	8.5–41.8	35.8–2740	0.5–4.15	40
Железо, мг/дм ³	0.11–0.3	0.11–1.87	0.38–1.64	0.1
Марганец, мг/дм ³	0.05–0.29	0.11–0.41	0.05–0.25	0.01
Цинк, мг/дм ³	0.001–0.039	0.018–0.190	0.005–0.065	0.01
Медь, мг/дм ³	0.001–0.003	0.001–0.038	0.001–0.017	0.001

*Предельно допустимые концентрации для водоемов рыбохозяйственного значения [18].

Состав вод Восточного и Подотвального карьеров очень близок, за исключением компонентов азотной группы: в воде Подотвального карьера они на 1–2 порядка выше, что объясняется активным использованием взрывчатых веществ при его отработке. Сопоставление данных Восточного и Западного карьеров позволяет сделать прогноз изменения состава воды при заполнении карьерной выемки отходами: вода приобретает щелочную реакцию (рН увеличивается до 12 по сравнению с 8), возрастает содержание хлоридов (до 400 мг/дм³ по сравнению с 100 мг/дм³), железа, марганца и цинка; уменьшается содержание сульфатов (от 1 до 0.4 г/л).

Для оценки степени опасности для окружающей среды свойств отходов, которые будут использованы для закладочных смесей при рекультивации Восточного карьера, проведены лабораторные эксперименты: отобраны 10 проб шлаков и дополнительно приготовлена одна проба из смеси основных металлургических отходов. Результаты исследования взаимодействия шлаковых материалов с карьерной (11 проб) и дистиллированной водой (11 проб) позволяют оценить по анализам водных вытяжек изменение во времени рН и степень выщелачивания компонентов [17].

Изменение водородного показателя происходит в первые 7 сут, он возрастает от 7 до 10–12 ед., в дальнейшем не изменяется (эксперименты проводились в течение 21 сут). Десятикратное разбавление водой снизило рН всего на одну единицу.

В табл. 2 приведены результаты анализа микрокомпонентного состава карьерных вод и водных вытяжек. Сопоставление их с показателями вод Западного карьера (рекультивируемого в настоящее время) позволяет сделать вывод о том, что при проведении рекультивации Восточного карьера его вода может обогатиться рядом компонентов, в том числе за счет повышения содержания натрия, алюминия, кальция, меди, цинка, стронция, ртути, свинца до показателей выше ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, однако этот процесс не приведет к заметному загрязнению гидросферы. Состав воды изменится с сульфатного магниевый-кальциевого на хлоридный калиево-натриево-кальциевый. Результаты краткосрочных лабораторных экспериментов по выщелачиванию закладочных смесей (табл. 2) хорошо коррелируют с данными многолетних режимных наблюдений (см. табл. 1).

ТАБЛИЦА 2. Показатели компонентного состава воды водных вытяжек и карьерных вод, мг/дм³

Показатель	Концентрация по объектам					ПДК _{рх}
	Водные вытяжки		Карьеры			
	К*	Д**	Восточный	Подотвальный	Западный	
pH	11.0	11.0	7.9	7.9	12.0	—
B ⁺	0.04	0.03	0.19	0.63	0.03	0.10
Na ⁺	147	98	45	112	180	120
Mg ²⁺	0	0	79	88	< п. о.	40
Al ³⁺	0.42	2.55	0.10	0.03	0.07	0.04
Si ²⁺	4.2	2.5	2.9	8.6	0.6	—
K ⁺	48	36	3	2	84	—
Ca ²⁺	234	217	354	267	389	180
Mn ²⁺	0.016	0.005	0.013	0.235	4.0·10 ⁻⁴	0.01
Fe _{общ}	0.10	0.04	0.24	0.21	< п. о.	0.10
Cu ²⁺	0.014	0.016	0.006	0.001	0.001	0.001
Zn ²⁺	0.10	0.129	0.03	< п. о.	< п. о.	0.01
Br ⁺	0.162	0.099	0.051	0.360	0.466	1.35
Sr ²⁺	2.31	1.70	0.69	1.38	2.08	0.40
Ba ²⁺	0.18	0.63	0.01	0.02	0.84	—
Hg ²⁺	2.3·10⁻⁴	1.4·10⁻⁴	< п. о.	< п. о.	< п. о.	1.0·10 ⁻⁵
Pb ²⁺	4.7·10 ⁻³	4.3·10 ⁻³	9.4·10 ⁻⁴	1.7·10 ⁻⁴	6.8·10 ⁻⁵	6.0·10 ⁻³
SO ₄ ²⁻	579	118	1156	984	318	100

*Взаимодействие закладочного материала и карьерной воды; ** взаимодействие закладочного материала и дистиллированной воды; п. о. — погрешность определения; жирным шрифтом выделены значения, превышающие ПДК_{рх}.

ПРОГНОЗ ИЗМЕНЕНИЯ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОЙ И ГЕОМИГРАЦИОННОЙ ОБСТАНОВКИ

Гидрогеоэкологическое обоснование возможности рекультивации Восточного карьера базируется на результатах решения ряда прогнозных задач, целью которых были: оценка необходимого дебита водоотлива для обеспечения складирования в сухом состоянии; прогноз уровней подземных вод при изменении соотношения водоотлива из Западного и Восточного карьеров; оценка опасности подтопления прилегающих территорий в случае полного прекращения водоотлива после завершения рекультивации обоих карьеров; прогноз распространения загрязняющих веществ к зонам разгрузки в процессе рекультивации Восточного карьера и после ее завершения.

Для прогноза изменения гидродинамической и геомиграционной обстановки использовано математическое моделирование как метод, позволяющий учесть фильтрационную неоднородность водовмещающих пород, граничные условия, взаимовлияние объектов, находящихся в общей области формирования подземных вод. Методика моделирования соответствует принципам, изложенным в работах [19, 20]. Для реализации использованы программные коды MODFLOW и MT3D [21, 22].

Внешний контур модели принят в соответствии с естественными границами формирования потоков подземных вод исходя из предпосылки о совпадении области формирования поверхностного и подземного стока. На западе и востоке границы соответствуют региональным дре-

нам, рассматриваемым как граничные условия третьего рода (задана связь напора и расхода через фильтрационное сопротивление ложа водоема); на юге и севере границы проведены в соответствии с локальными водоразделами (непроницаемая граница, второй род). При решении задачи водосборная площадь вписывается в прямоугольную область. Область покрывается регулярной конечно-разностной сеточной разбивкой с шагом 100 м, затем не входящие в водосборную площадь блоки модели деактивируются.

Общая площадь 323 км², расчетная — 235 км² (17 км с запада на восток, 19 км с юга на север), количество расчетных блоков 190 на 170, размер блока 100×100 м.

Внутренними граничными условиями являются дренажные системы карьеров, для моделирования разгрузки подземных вод в горные выработки в соответствующих блоках задавалось граничное условие третьего рода (дрена). Принцип работы дрены следующий: разгрузка подземных вод в дренаж начинается при превышении уровня подземных вод над нижней отметкой дрены, объем воды, попавший в дренаж, из баланса модели исключается. Глубина заложения дрены соответствует отметкам дна карьера.

Поверхностные водоемы и водотоки схематизируются как граничное условие третьего рода с учетом фильтрационного сопротивления ложа. На верхней границе модели необходимо задать значение интенсивности инфильтрационного питания, т. е. расхода потока, поступающего на единицу площади кровли водоносного горизонта. Среднемноголетнее значение интенсивности инфильтрационного питания принималось эквивалентным региональному модулю подземного стока 0.5–1.5 л/с с 1 км² [15]. На промплощадке величины питания в связи с утечками из водонесущих коммуникаций возрастают до 3 л/с с 1 км² [23].

При решении задачи в качестве фильтрационного параметра рассматривался коэффициент фильтрации в горизонтальном направлении для водоносных горизонтов. Закономерности его изменения определяются литологическими особенностями и геоморфологическим положением: наибольшие значения порядка 1 м/сут присущи долинам рек Урал и Сухая, к водоразделам они уменьшаются до 0.1–0.05 м/сут. Проводимость модельных пластов пересчитывалась автоматически как произведение мощности водонасыщенной части на коэффициент фильтрации (принятая схематизация водоносных комплексов — напорно-безнапорные).

Решение нестационарных миграционных задач осуществлялось для консервативного компонента, в качестве которого может рассматриваться, например, ион хлора. Содержание его в воде Западного карьера 350–400 мг/дм³ при фоновом значении 100 мг/дм³. В качестве основного процесса, который регулирует массоперенос, предполагалась конвекция. Процессы сорбции, осаждения, способствующие улучшению качества воды, в такой постановке относятся к инженерному запасу решаемой задачи.

Моделирование выполнялось в два этапа. На первом решен ряд обратных задач, позволяющих выполнить калибровку модели: уточнить фильтрационные, емкостные параметры и условия питания; выполнить проверку чувствительности модели. Критерием непротиворечивости модели служит совпадение модельных и фактических уровней подземных вод, а также балансовых составляющих рассматриваемой территории, в первую очередь расходы водоотлива из водопонижительных систем рудника. Для калибровки фильтрационных параметров представительными являются следующие этапы освоения изучаемой территории, наиболее полно обеспеченные режимной информацией и характеризующиеся как стационарным (условно), так и нестационарным режимом подземных вод: 1 — естественные (ненарушенные) условия; 2 — ситуация, сложившаяся на конец отработки месторождений; 3 — период с 1991 по 2013 г.

Результат решения обратных задач — уточнение гидрогеологических условий объекта исследований, подтверждение корректности отражения на модели наблюдаемых процессов, доказательство возможности использования модели для прогноза изменения ситуации с необходимой достоверностью.

Основная задача второго этапа моделирования — обоснование такой схемы организации водоотлива, которая позволит обеспечить складирование закладочной смеси в сухом виде выше уровня подземных вод, как того требуют нормативные документы [24]. На этом этапе решены прогнозные задачи, в том числе миграционные, рассмотрены и реализованы три сценария:

— водоотлив осуществляется из обоих карьеров: из Восточного — для обеспечения возможности складирования закладочных смесей в сухом состоянии, водоотлив из Западного сохраняется на уровне, сложившемся к настоящему времени;

— водоотлив не ведется из обоих карьеров: продолжается заполнение Восточного карьера; водоотлив из Западного карьера прекращается и начинается его заполнение;

— водоотлив выполняется только из Восточного карьера — для обеспечения возможности складирования в нем закладочных смесей в сухом состоянии.

Анализ результатов решения прогнозных задач показывает, что наиболее безопасным является реализация первого сценария: не происходит подтопления прилегающих территорий, потенциальное загрязнение не распространяется к региональным дренам и локализуется в непосредственной близости от карьеров.

Второй сценарий — наихудший: происходит подтопление территории, через 5 лет загрязнение как из Западного, так и Восточного карьеров достигает региональных дрен р. Урал (на западе) и р. Сухой (на востоке). В центре промплощадки комбината уровень подземных вод может повыситься на 2–4 м, а концентрация консервативного загрязняющего компонента увеличиться в 1.5–2 раза. На рисунке показано положение фронта загрязнения от Западного и Восточного карьеров при полном прекращении водоотлива из них через 50 лет.

Третий сценарий промежуточный по степени опасности: на восток в долину р. Сухой загрязнение не распространяется, подъем уровня в центре промплощадки составит около 2 м, а концентрация консервативного загрязняющего компонента может увеличиться в 1.5 раза.

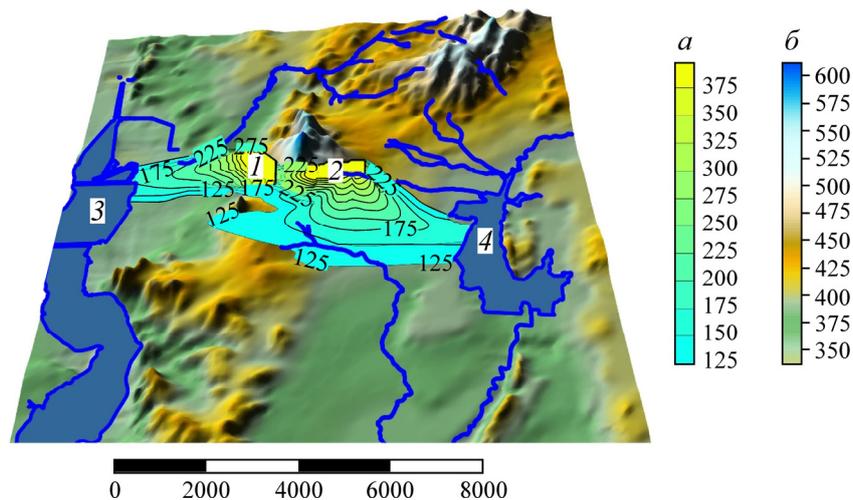


Схема прогнозного содержания в подземных водах консервативного компонента через 50 лет после полного прекращения водоотлива (второй сценарий): 1 — карьер Западный; 2 — карьер Восточный; 3 — Магнитогорское водохранилище; 4 — шлаохранилище; а — шкала концентраций, г/л; б — шкала высот, абс. отметки, м

РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕКУЛЬТИВАЦИИ

Для рекультивации Восточного карьера предлагается строительное направление с использованием принципов архитектурно-ландшафтного освоения подобного горно-техногенного рельефа. Для этого нарушенные земли необходимо привести в состояние, пригодное для строительства объектов разного функционального назначения.

Реализация проекта по ликвидации Восточного карьера с последующей рекультивацией земель позволит снизить площадь размещения отходов металлургического производства; уменьшить техногенную нагрузку на окружающую среду, что особенно актуально для г. Магнитогорска; воссоздать оптимально организованный и экологически сбалансированный устойчивый ландшафт; подготовить участок для последующего целевого использования.

Основные сложности, связанные с проведением рекультивации Восточного карьера, вызваны следующими обстоятельствами: большие территории (площадь рекультивации 102 га, площадь заполняемой карьерной выемки 81 га), наличие берм безопасности, подвергающихся самозаращению, сложный гористый рельеф местности, значительная глубина (130 м) и соответствующая обводненность, требующие постоянного откачивания воды.

Заполнение Восточного карьера закладочными смесями должно выполняться при условии осуществления водоотлива из Восточного и Западного карьеров: это обеспечит сохранение уровня подземных вод на отметках, исключая влияние на селитебную и промышленную зону в период проведения работ. В процессе рекультивации (в течение ~ 10 лет) глубина положения уровня воды в районе Восточного карьера определяется принятой технологией рекультивации, согласно которой должна быть обеспечена возможность складирования заполнителя в сухом состоянии. Засыпка рекультивационными материалами будет производиться слоями по 2 м с предварительным формированием гидроизолирующего экрана (из глины или геомембраны). Соответственно по мере заполнения выработанного пространства глубина дренирования и расход водоотлива могут уменьшаться вслед за повышением отметки дна рекультивируемого пространства.

С позиций гидрогеомиграции процесс рекультивации разбивается на три этапа. На начальном этапе уровень подземных вод должен поддерживаться ниже дна карьера, загрязнение подземных вод происходит в непосредственной близости от карьера. На втором этапе водоотлив может быть уменьшен (ориентировочно в 2 раза по сравнению с начальным этапом), при этом направление движения подземных вод и развитие области загрязнения принципиально изменится. На этом этапе необходимо предусмотреть расширение наблюдательной сети для обеспечения информацией о степени подтопления прилегающих территорий, а также возможных процессах и интенсивности загрязнения подземных вод в результате взаимодействия закладочных материалов с водой. На третьем этапе (после заполнения выработанного пространства примерно до уровня земной поверхности) водоотлив может быть прекращен, но только при условии, что по результатам мониторинга не будет зафиксировано подтопления прилегающих территорий и загрязнения подземных вод.

В соответствии с концепцией контролируемого загрязнения [20] предотвращение загрязнения подземных вод экономически более целесообразно, чем борьба с его последствиями.

ВЫВОДЫ

Опыт использования отходов горнодобывающего и перерабатывающего производства на Урале для рекультивации выработанного пространства свидетельствует о его эффективности и экологической безопасности при условии соблюдения технических требований.

При рекультивации Восточного карьера вода приобретет щелочную реакцию, рН повысится на 4–5 ед. (до 11–12); состав воды изменится с сульфатного магниево-кальциевого на хлоридный калиево-натриево-кальциевый; микрокомпонентный состав может обогатиться рядом ми-

нералов, в том числе можно ожидать повышения содержания алюминия, меди, цинка, стронция, ртути, свинца до показателей выше ПДК для водоемов рыбохозяйственного значения, однако этот процесс имеет локальный характер и не приведет к заметному загрязнению гидросферы.

В процессе рекультивации (в течение порядка 10 лет) глубина положения уровня воды под дном карьера определяется принятой технологией рекультивации, согласно которой должна быть обеспечена возможность складирования заполнителя (закладочной смеси) в сухом состоянии.

После заполнения выработанного пространства закладочными материалами водоотлив может быть прекращен при условии, что не будет зафиксировано подтопления прилегающих территорий и загрязнения подземных вод.

Рекультивация Восточного карьера горы Магнитной с использованием закладочных смесей на основе отходов производства ОАО «ММК» приведет к оздоровлению экологической обстановки, что особенно актуально для г. Магнитогорска, окружающая среда в котором характеризуется высокой техногенной нагрузкой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **ГОСТ 17.5.1.01-83.** Охрана природы. Рекультивация земель. Термины и определения. — Введ. 1984–01–07. — 8 с.
2. **Быстрова Т. Ю.** Парк Эмшер: принципы и приемы реабилитации промышленных территорий // Академ. вестн. УралНИИпроект РААСН. — 2014. — № 2. — С. 9–14.
3. **Славиковская Ю. О.** Эколого-экономические аспекты освоения минеральных ресурсов на урбанизированных территориях. — Екатеринбург: ИГД УрО РАН, 2012. — 208 с.
4. **ГОСТ 17.5.1.02-85.** Классификация нарушенных земель для рекультивации. — Введ. 1986–02–07. — 9 с.
5. **Рыбникова Л. С., Рыбников П. А.** Геофльтрационная модель массива горных пород в области влияния обрабатываемых и ликвидируемых рудников горноскладчатого Урала // Литосфера. — 2013. — № 3. — С. 130–136.
6. **Боговая И. О., Фурсова Л. М.** Ландшафтное искусство. — М.: Агропромиздат, 1988. — 223 с.
7. **Гринько Н. К., Грунь В. Д., Лунев В. Г.** Недра духовной культуры горного дела. — М.: Имидж-Пресс, 2011. — 369 с.
8. **Опарин В. Н., Ческидов В. И., Бобыльский А. С., Резник А. В.** К вопросу рационального недропользования при открытой разработке бурого углей месторождений Канско-Ачинского бассейна // ФТПРПИ. — 2012. — № 3. — С. 175–188.
9. **Зотеев В. Г., Костерова Т. К., Морозов М. Г., Рудницкая Н. В.** Обоснование технологии захоронения отходов обогащения медно-цинковых руд, обеспечивающей защиту окружающей среды и возможность их повторной переработки // ГИАБ. — 2004. — № 5. — С. 85–90.
10. **Трубецкой К. Н., Чантурия В. А., Каплунов Д. Р., Рыльникова М. Р.** Комплексное освоение месторождений и глубокая переработка минерального сырья. — М.: Наука, 2010. — 437 с.
11. **Лаптев М. В.** Использование хвостов обогащения для рекультивации карьера и изготовления закладочной смеси // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: тр. конгр. с междунар. участием. — Екатеринбург: УрО РАН, 2014. — С. 448–452.
12. **Крехов Е. Н., Емельянов А. С., Андросенко А. А., Гайдак Д. С.** Утилизация отходов обогатительной фабрики (хвостов обогащения) в выработанное пространство Учалинского карьера // Фундаментальные исследования и прикладные разработки процессов переработки и утилизации техногенных образований: тр. конгр. с междунар. участием. — Екатеринбург: УрО РАН, 2014. — С. 461–466.

13. **Калмыков В. Н., Зотеев О. В., Зубков Ан. А., Гоготин А. А., Зубков А. А.** Исследование физико-механических свойств отходов обогащения для разработки технологии формирования закладочного массива в выработанном пространстве карьера “Учалинский” // *Вестн. МГТУ*. — 2013. — № 1. — С. 11–19.
14. **Государственная программа** Челябинской области “Охрана окружающей среды Челябинской области” на 2014–2017 гг. Утверждена постановлением Правительства Челябинской области от 22 октября 2013 г. № 357-П. — 89 с.
15. **Воронов С. Г.** Оценка обеспеченности населения Челябинской области ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения (второй этап) / Челябин. гос. гидрогеол. предприятие. — Копейск: Челяб. геол. фонд, 2000.
16. **ГОСТ 17.5.1.03-86.** Охрана природы Земли. Классификация вскрышных и вмещающих пород для биологической рекультивации земель. — Введ. 1988–01–01. — 6 с.
17. **Антонинова Н. Ю., Шубина Л. А.** Использование техногенных отходов ГМК в природоохранных целях на предприятиях ГМК // *Экология и пром-сть России*. — 2015. — № 10. — С. 38–41.
18. **Нормативы** качества воды водных объектов рыбохозяйственного значения, в том числе нормативы ПДК вредных веществ в водах водных объектов рыбохозяйственного значения. — М.: Изд-во ВНИРО, 2011. — 257 с.
19. **Лукнер Л., Шестаков В. М.** Моделирование геофильтрации. — М.: Недра, 1976. — 407 с.
20. **Мироненко В. А., Румынин В. Г.** Проблемы гидрогеоэкологии. Т. 3 (кн. 1). Прикладные исследования. — М.: Изд-во МГГУ, 1999. — 312 с.
21. **McDonald M. G., Harbaugh A. W.** A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey, Reston, Virginia, Techniques of Water-Resources Investigations, Book 6, Chap. A1., 1988. — 586 p.
22. **Zheng C.** MT3D: A modular three-dimensional transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems: Report prepared at S. S. Papadopoulos & Associates, Inc for the U.S. Environmental Protection Agency, Ada, Okla, 1990. — 171 p.
23. **Рекомендации** по прогнозам подтопления промышленных площадок грунтовыми водами. — М.: Изд-во ВНИИ ВодГео, 1976. — 324 с.
24. **СП 2.1.7.1038-01.** Гигиенические требования к устройству и содержанию полигонов для твердых бытовых отходов. Зарегистрировано в Минюсте РФ 26 июля 2001 г., № 2826. — 6 с.

Поступила в редакцию 11/1 2016