

Мониторинг состояния недр в период горнопромышленной постэксплуатации на Урале (Дегтярский участок)

Светлана Николаевна ЕЛОХИНА^{1*},
Алексей Александрович КИНДЛЕР^{2**}

¹Уральский государственный горный университет, Россия, Екатеринбург

²Уральский региональный центр ГМСН – филиал ФГБУ «Гидроспецгеология», Россия, Екатеринбург

Аннотация

Цель работы: изучение состояния территории Дегтярского участка в период горнопромышленной постэксплуатации и методов оценки и учета текущего состояния данного объекта.

Актуальность работы. Участок постэксплуатации представляет собой территорию горнопромышленной разработки, включающую нарушенные и подработанные земли, на которых в текущее время горное производство остановлено и реализован определенный объем рекультивационных мероприятий. По многочисленным данным, полученным на Урале, на подобных участках происходит активизация опасных геологических процессов, поэтому на Дегтярском участке выполнены работы в рамках государственного мониторинга состояния недр. В статье приводится методика проведенных исследований, реализованная в течение последних 10 лет, а также обсуждаются полученные результаты (по состоянию на конец 2019 г.).

Методология проведения работы. Для оценки состояния недр территории Дегтярского участка, помимо анализа априорной информации, проведены периодические выезды на объект с визуальным наблюдением и фотодокументацией, в том числе дистанционной; батиметрическая съемка участков выхода рудничных вод (карьерная выемка) и демпферного створа (Ельчевский пруд-отстойник); отбор проб воды и донных отложений в контрольных гидростворах; замер водородного показателя водной среды на его площади; лабораторные исследования проб на специфические компоненты химического состава.

Результаты работы. Согласно полученным материалам, фиксируется опасный уровень геохимической, гидро- и геодинамической неравновесности на Дегтярском участке постэксплуатации. Предлагается продолжить периодические наблюдения на участке как объекте-аналоге, включая работы как дистанционного, так и геохимического характера в режиме не реже одного раза в пять лет.

Выводы. По комплексу показателей участок постэксплуатации предлагается классифицировать как опасный природно-техногенный объект, поэтому рекомендуется создание реестров и паспортов всех участков постэксплуатации на Урале.

Ключевые слова: участок горнопромышленной постэксплуатации, опасный природно-техногенный объект, мониторинг состояния недр, Урал.

Введение

Система государственного мониторинга состояния недр (ГМСН) Российской Федерации реализует государственную политику наблюдения, анализа и прогноза состояния подземных вод (загрязнения) и активности опасных геологических процессов под влиянием природных и техногенных факторов, продуцируемых, в первую очередь, системой недропользования [1].

Как известно, наиболее мощное техногенное воздействие на недра оказывает горнопромышленное производство [2, 3]. В разных климатических и геолого-минералогических условиях получена информация, что разработка рудных месторождений изменяет показатели компонентов природной среды, взаимосвязанные с состоянием недр: подкисление почвы, загрязнение почвенно-растительного слоя токсичными соединениями

(кобальтом, никелем и др.) [4], загрязнение водных экосистем, обогащение тяжелыми металлами (медь, свинец, цинк, и др.) [5, 6] и т. д. Накопление хвостов горного производства, помимо формирования техногенного рельефа земной поверхности, практически образует долговременные источники токсического воздействия, например, низкотемпературной ртутью, мышьяком, кадмием и свинцом [7, 8], которые могут проявиться уже после остановки горно-добычных работ в постэксплуатационный период, как и некоторые другие опасные геологические процессы. Участок постэксплуатации представляет собой территорию горнопромышленной разработки, включающую нарушенные и подработанные земли, на которых в текущее время горное производство остановлено и реализован

✉ elohina.s@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8641-5439>

** kindler@gmsn-ural.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1082-5164>

некоторый объем рекультивационных мероприятий.

На территории Урала имеется более сотни участков постэксплуатации с эпизодическими сведениями по токсичным и опасным последствиям горного производства [9, 10]. Особую социальную актуальность имеют участки вблизи крупных населенных пунктов и городов, строительство которых сопровождало разработку рудных богатств Урала и других объектов социально-экономической инфраструктуры (водозаборов, дорожной сети и т. п.). На Дегтярском участке постэксплуатации население города Дегтярска непосредственно находится в зоне воздействия горнопромышленного техногенеза, так же, как питьевой водоем города Екатеринбурга – Волчихинское водохранилище. Опыт ведения ГМСН и его результаты, своего рода производственный эксперимент, полезны для использования и решения данной проблемы на других подобных объектах.

Объект исследования

За 300-летний период горнопромышленного освоения Урала разведано и разработано более 200 месторождений рудных полезных ископаемых: медно- и медно-цинковых, железорудных, золоторудных, хромитовых, редкометалльных и др. [11]. В XX в. разведенные запасы руд значительной части месторождений уже выработаны (полностью или частично), а горнодобывающие предприятия закрыты. Нарушенные горными работами участки недр иногда просто заброшены и перешли в зону активного проявления природных факторов [10].

Однако имеются на Урале и работающие крупные горнодобывающие предприятия и комбинаты: Высокогорский, Качканарский, медные объекты Уральской горно-металлургической компании, Северо-Уральские бокситовые рудники и др. Их закрытие в будущем определяет увеличение количества участков горнопромышленной постэксплуатации.

Максимальное экологическое воздействие на взаимосвязанный поверхностный и подземный сток, лито- и биосферу несет вскрытие и разработка колчеданных месторождений медно-цинковой формации [12]. На таких объектах рудная минерализация представлена сульфидами меди, железа и цинка (пирит, халькопирит, сфалерит и т. п.) в максимальных значениях.

Ярким примером такого объекта служит Дегтярское медноколчеданное месторождение, когда-то одно из самых крупных на Урале и в России. Его участок непосредственно примыкает с востока к территории г. Дегтярска, расположенного на юге Свердловской области в глубокой заболоченной депрессии с абсолютными отметками 223–255 м.

Исследованием геологических особенностей Дегтярского месторождения, включая минерагенические аспекты, длительное время занимались М. Б. Бородаевская, С. Н. Иванов, Э. И. Кутарев, М. И. Меркулов, Д. К. Сулов, Т. Г. Тресвятская и др. В геолого-структурном отношении Дегтярское месторождение приурочено к тектонически напряженной, наиболее суженной части Тагильско-Магнитогорского мегасинклиория (Уральский платиноносный пояс). В ее средней части прослеживается Серовско-Маукский глубинный разлом. К востоку от него распространены отложения рудоносного комплекса контрастной базальт-липаритовой ассоциации,

датируемой нижним девонем. В зоне разлома развиты серпентиниты, мраморизованные известняки, углесто-кремнистые сланцы, туффиты, метагабброиды, долериты, пироксениты.

В районе широко развиты мезозойские коры выветривания, имеющие преимущественно глинистый состав. Площадные коры выветривания имеют мощность до 20 м. Линейные зоны выветривания, развитые по литологическим контактам и тектонически ослабленным зонам, прослеживаются дисперсными породами на глубины 100–150 м. Чехол рыхлых элювиально-делювиальных четвертичных отложений маломощный – обычно менее 10 м.

В гидрогеологическом отношении район месторождения расположен в пределах системы бассейнов грунтовых вод зон трещиноватости палеозоя, среди которых преобладают трещинные и трещинно-жильные. Водоносные зоны трещиноватости, как правило, гидравлически взаимосвязаны, имеют безнапорный характер. Водообильность пород в верхней зоне экзогенной трещиноватости невысокая, дебиты скважин не превышают 2–3 дм³/с.

Трещинно-жильные воды в пределах крупных тектонических нарушений вскрываются на глубинах до 200–400 м. Благодаря высокой водопроницаемости, линейные водоносные зоны выполняют роль естественных подземных дрен. В центральной части рассматриваемого месторождения прослеживается Дегтярская линейная водоносная зона, контролируемая региональным Серовско-Маукским поясом разломов (В. Ф. Морковкина, 1942), за счет подземных вод которой формировался практически весь водоприток в горные выработки закрытого Дегтярского рудника.

Дегтярское месторождение, открытое в 1888 г., отрабатывалось в период 1914–1994 г. с перерывом в период 1918–1926 гг., когда после революции 1917 г. рудник был разрушен и законсервирован, а шахты затоплены грунтовыми водами. До этого периода в северной части горы Лабаз-Камень (Лабаз) находились в эксплуатации два карьера, разрабатывавшие бурые железняки «железной шляпы». С углублением работ оказалось, что под бурым железняком залегает серный колчедан, представляющий разрушенную «голову» колчеданной залежи. Позже эти карьеры были почти полностью заполнены отвальным материалом последующих горных разработок.

Строительство шахт на коренное рудное тело было сопряжено с рядом трудностей. Первоначально неглубокие шахты были заложены на месте старых карьеров в северной и южной части горы Лабаз. Однако первоначально пройденный здесь ствол шахты «Капитальная-2» на глубине 19 м оказался в зоне специфических грунтов (пльвунов) и обвалился. Новый ствол заложили на 230 м западнее на расстоянии 330 м от рудного тела, в лежачем боку месторождения, что гарантировало защиту шахтного ствола и породы от разведения кислыми водами. Затем ствол и второй шахты, «Капитальная-1», перенесли на расстояние 260 м западнее рудного тела. При его проходке столкнулись с гидрогеологическими осложнениями, связанными со вскрытием крайне водоносных известняков в зоне Серовско-Маукского разлома. По этой причине до 1952 г. все горные работы проводились в верхних горизонтах 70–190 м и развивались в основном по площади.

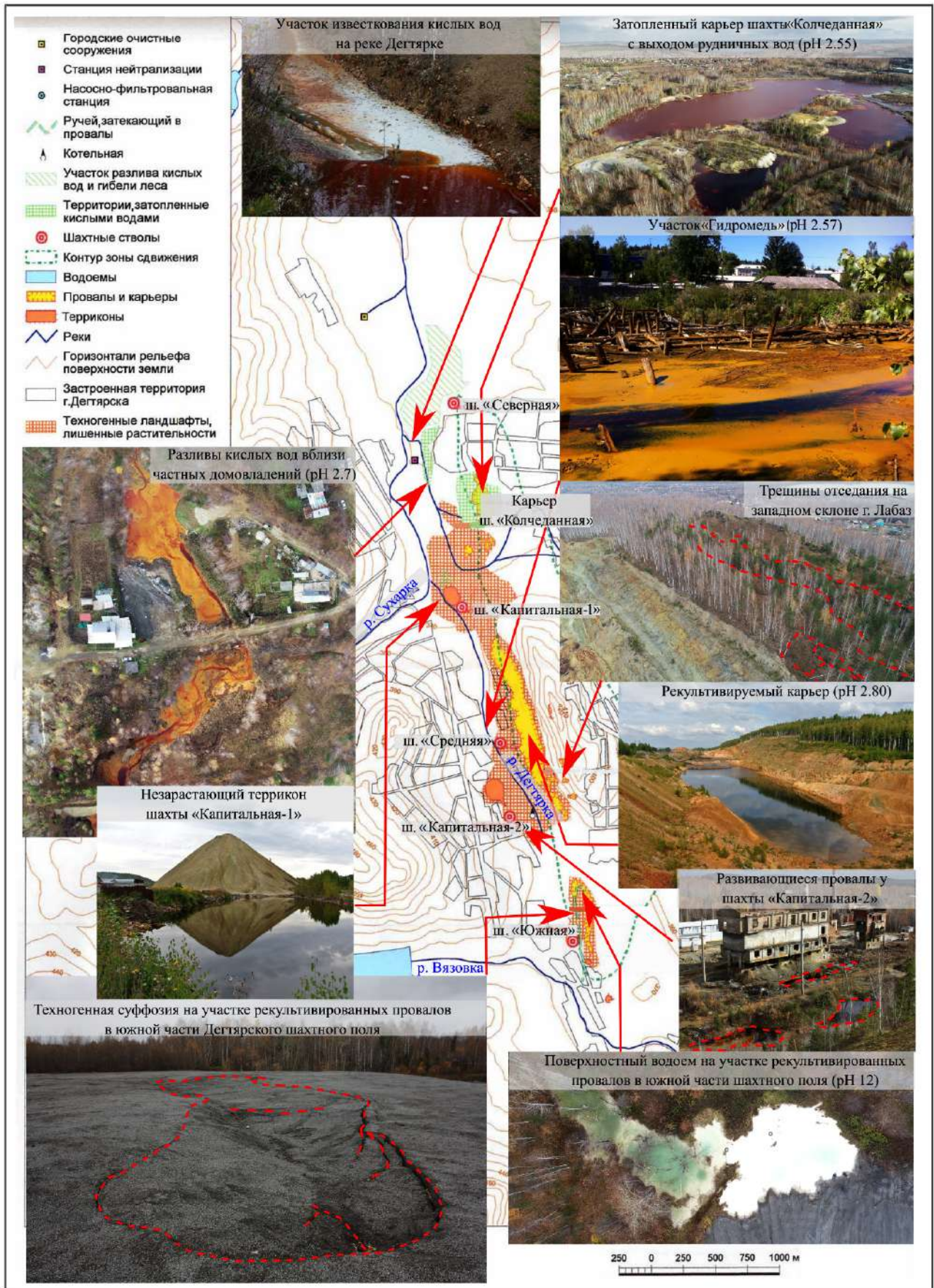


Рисунок 1. Схема расположения техногенных и природно-техногенных объектов на Дегтярском участке постэксплуатации и фотодокументация 2019 г.
 Figure 1. Layout of technogenic and natural-technogenic objects on the Degtyarskiy area of post-exploitation and photo documentation of 2019.

Только с 1952 г. интенсификация горных работ происходила их углублением.

К 1994 г., перед закрытием рудника, сохранились четыре шахтных ствола (рис. 1): шахты «Капитальная-1» (глубиной 468,7 м) и «Капитальная-2» (612 м), вентиляционные стволы шахт «Средняя» и «Южная» (глубиной по 250 м). Через каждые 60 м по глубине рудное тело вскрывается кваршлагами, переходящими в полевые штреки, из которых через каждые 150–200 м пройдены рудные штреки. В северной части месторождения располагался карьер (бывшая шахта «Колчеданная»), соединенный с подземными горизонтами.

Среднегодовая величина суммарного водопритока в шахты за период 1948–1988 гг. изменялась от 182 м³/ч до 424 м³/ч при среднемноголетнем значении за последние 10 лет 220 м³/ч. В структуре водоотлива существенная роль принадлежала поглощению транзитного речного стока: на юге – р. Вязовка, на севере – р. Исток, впадающая в р. Ельчевка, и ее левобережный приток р. Дегтярка.

С 1952 г. после подъема на поверхность вода из шахты «Капитальная-2» поступала в пруд-накопитель и далее на цементационную установку для извлечения меди (участок «Гидромедь») с последующим отведением в канализованное русло р. Дегтярки. Рудничные воды из шахты «Капитальная-1» отводились в русло р. Дегтярки без цементации. Затем сток р. Дегтярки обрабатывался известковым молоком и вместе со стоком в р. Исток направлялся в р. Ельчевку и замыкающий Ельчевский осветлительный пруд.

В условиях активизации процессов окисления остаточной сульфидной минерализации, неотработанных целиков рудного тела, а также подпитывания загрязненными атмосферными осадками, проходящими через слой отвальных пород, подземные (рудничные) воды на момент закрытия рудника и «захлопывания» депрессионной воронки (1999) приобрели сульфатно-хлоридно-гидрокарбонатный и хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатный состав с величиной сухого остатка от 5 до 12,6 г/л и более и аномально высоким содержанием железа (36,6 мг/л), меди (до 0,65 мг/л) и других элементов.

Методика и основные результаты наблюдений

В период 1999–2007 гг. контроль за состоянием горных объектов и рудничных вод производила служба Дегтярского рудника (до момента его банкротства в декабре 2010 г.), Свердловское региональное министерство экологии, отдел экологии Дегтярского муниципалитета, инвесторы в горное производство (карьерная добыча золота на западном склоне г. Лабаз), энтузиасты и активисты «зеленого» движения (Б. Г. Магидов, С. Н. Елохина, А. И. Вишняк, А. И. Заболоцкий и др.).

С 2012 г. на Дегтярском участке горнорудной постэксплуатации периодические наблюдения выполняются в рамках ведения ГМСН. За прошедший период организованы четыре экспедиции 2012, 2014, 2018, 2019 гг. с частично изменяющимся комплексом исследований, направленных на фиксацию текущего состояния и поисков оптимальной методики наблюдений (табл. 1).

Сбор и систематизация материалов предшествующих работ осуществлялись в Уральском территориальном фонде геологической информации, архивах Уралгидроэкспедиции и Дегтярского рудоуправления (последние две организации сейчас ликвидированы), на интернет-ресурсах (*uralmines.ru* и др.).

Установлено, что горнодобычные работы на Дегтярском руднике были прекращены в 1994 г. Отказ от дренажных мероприятий производился постепенно в течение года. В октябре 1998 г. произошел выход шахтных вод сообразно уклону подземного потока на северном фланге месторождения через выработки шахты «Колчеданная». При подъеме шахтных вод до отметок поверхности земли в мае 1999 г. сформировался их перелив из карьера «Колчеданный» в русло р. Исток. Автором выполнена первичная фиксация перелива кислых рудничных вод из карьера через дорожное полотно улицы Тракторная в русло р. Исток. На этот момент все открытые горные выработки уже были полностью затоплены (за исключением глиняного карьера на западном склоне г. Лабаз), приотвальные озера терриконов шахт «Капитальная-1» и «Капитальная-2» существовали.

Основное природоохранное мероприятие на участке постэксплуатации на сегодняшний день представлено

Таблица 1. Виды выполненных работ на Дегтярском участке.
Table 1. Types of work performed on Degtyarskiy area.

Виды работ	Год			
	2012	2014	2018	2019
Сбор и систематизация материалов предшествующих исследований	+	+	+	–
Визуальное маршрутное обследование поверхности земли	+	+	+	+
Фотодокументация с помощью беспилотного летательного аппарата и построение пространственных моделей и ортофотопланов	–	–	–	+
Замер величины pH на гидростворах	–	+	+	+
Отбор проб на химический анализ воды в реках Исток, Дегтярка, на карьере «Колчеданный», в приотвальном озере	+	+	–	–
Отбор донных отложений в поверхностных водных объектах (техногенных)	+	+	–	–
Батиметрическая съемка	–	+	–	–

нейтрализацией кислого стока рек Исток и Дегтярка перед их слиянием и впадением в р. Ельчевку. Для этого используется производство известкового молочка на заводе, сохранившемся с периода работы Дегтярского рудоуправления.

Визуальное маршрутное обследование поверхности земли выполнено в составе каждого из четырех циклов наблюдений. Маршруты выполнялись от долины р. Вязовки на южном фланге месторождения, далее на север вдоль долины р. Дегтярки, сток которой от створа шахты «Южная» и до слияния с р. Исток организован в земляном канале. Также осматривались наземные техногенные объекты, территория горы Лабаз. Далее маршрут обследования направлялся на север до створа с известкованием речных вод, с обязательным обследованием карьера «Колчеданный» и р. Исток: до и ниже карьера на протяжении всего участка нарушенных земель.

Как показали визуальные наблюдения, природные ландшафты и почвы на территории Дегтярского рудника под влиянием техногенных мероприятий на стадии горных работ интенсивно изменены. Через 10 лет после остановки работ (к 2012 г.) ландшафты, комплекс и активность протекающих природно-техногенных геологических процессов существенно не изменились. Например, на поверхности сохранились терриконы, заброшенные копры шахт, провалы, карьерные и подотвальные озера и иные техногенные объекты. Почвенный покров восстановился не повсеместно, а там, где он был сохранен, характеризуется малой мощностью (не более 10–15 см). Это связано с расчлененностью рельефа, густой сетью автодорог и железнодорожных путей, отвалов, терриконов, старых горных выработок и провалов, глубина которых достигает иногда нескольких десятков метров. По материалам инженерно-экологических изысканий А. И. Заболоцкого и К. А. Заболоцкого (2006), на большей части территории происходит формирование примитивного новообразованного профиля почв на перемещенных делювиальных и элювиальных глинах. Перемещенные почвы имеют молодой возраст и более легкий механический состав, следовательно, больше подвержены процессам эрозии и дефляции, так как растительный покров на них, как правило, имеет незначительное покрытие. В результате процессов самозарастания на нарушенной поверхности земли происходит формирование *вторичного леса*. Однако значительную часть площади занимают техногенные грунты, относящиеся к III классу опасности, непригодные для самозарастания (растительность отсутствует).

Интенсивная многолетняя горнодобывающая деятельность на рассматриваемой территории привела к активизации *геомеханических и гидродинамических процессов*, таких как сдвигение и обрушение горных пород, оползневые процессы на отвалах, затопление заброшенных открытых и подземных горных выработок, подтопление и заболачивание просевшей территории после заполнения воронки депрессии шахтного водоотлива. В текущий период на поверхности отвалов фиксируется активность процессов струйной эрозии, в бортах карьера – оползни, над подземными выработками – обрушения. Селитебная застройка города страдает от подтопления.

Фотодокументированы проявления вторичных процессов техногенной суффозии и заболачивания, например, на группе южных провалов. При закрытии рудника глубина провалов достигала 59,4 м. Их засыпка произведена отвальной породой с глиняного карьера и металлургическими шлаками в период 2010–2012 гг. [10]. В 2014 г. обнаружены крупные и мелкие групповые просадки с тенденцией к их слиянию. В 2019 г. просадки техногенной суффозии продолжают медленно расширяться. Здесь же после затопления подземных полостей и засыпки провальных воронок произошло частичное восстановление поверхностного водоема, вода в котором имеет аномальный щелочной состав (рис. 1). Севернее шахты «Капитальная-1» выполнена планировка поверхности незарастающих отвалов, а также отвод части стока р. Исток в карьер «Колчеданный», в емкость которого в 1999 г. произошел выход кислых шахтных вод. Некоторые другие планируемые мероприятия носили спорный характер (строительство опасных производств и т. п.) и не были реализованы.

Гидродинамическая ситуация Дегтярского участка постэксплуатации отличается перераспределением естественного водного баланса между поверхностным и подземным стоком в пользу последнего. Объем дренажных вод при работе рудника в среднем составлял около 5 тыс. м³/сут. Половина объема составляло поглощение поверхностных вод, включая транзитный сток рек Исток и Вязовка. Работами А. И. Вишняка (2005) оценен суммарный объем излива рудничных вод в количестве 2–4 тыс. м³/сут в период межени с возрастанием до 15 тыс. м³/сут в паводок.

В 2019 г. была проведена дистанционная аэрофотофиксация проявлений опасных ЭГП с помощью беспилотного летательного аппарата (БПЛА). Общий объем полученной с помощью БПЛА информации позволяет безопасно и с достаточной точностью определить глубину, площадь, общий объем отдельных проявлений, скорость их развития, углы склона, в том числе и на труднодоступных участках. Также необходимо учитывать достаточно высокую скорость проводимых исследований территории. Использование БПЛА позволяет построить морфологические профили и отображения рельефа территории с представлением одного и того же проявления под различными ракурсами на основе полученной 3D модели.

Для проведения данной работы использовался квадрокоптер DJI Phantom 4, максимальная полетная высота которого составляет 120 м. Разрешающая способность камеры в 20 мегапикселей позволяет с высокой точностью производить фотофиксацию объекта. Все снимки являются координатно привязанными (в том числе и по высоте). Возможно наложение их на различные карты или снимки прошлых лет, что особенно важно при оценке изменения размера отдельного проявления, комбинирование одного изображения из серии снимков, построение объемных моделей, построение изолиний рельефа, морфометрических профилей и др. Общая площадь охвата одного снимка будет зависеть от высоты съемки (табл. 2).

Одним из результатов обследования БПЛА на Дегтярском участке являются участки крупных провалов над старыми выработками на горе Лабаз (рис. 2), находящие свое подтверждение на снимках Google Earth (2006).



Рисунок 2. Провалы на горе Лабаз по состоянию на 2006 г. (красным контуром выделены зоны обрушений).
Figure 2. Sinkholes on Mount Labaz for 2006 year (zones of Sinkholes are highlighted in red).

Таблица 2. Площадь охвата территории при различной высоте.
Table 2. Coverage area at various heights.

Высота камеры над поверхностью земли, м	Ширина изображения проекции одного кадра на земле, м	Высота изображения проекции одного кадра на земле, м
120	210,0	157,500
70	122,5	91,875
30	52,5	39,375

Таблица 3. Геометрические параметры зон обрушений на горе Лабаз, м.
Table 3. Geometrical parameters of Sinkholes zones on Mount Labaz, m.

Номер провала (по рис. 2)	Длина максимальная	Ширина максимальная	Глубина максимальная
1	122	72	18
2	82	67	12

Контурсы провалов можно достаточно четко проследить и на сегодняшний день. БПЛА в данном случае использовался с целью определения геометрических параметров провалов. После математического моделирование в программе Agisoft Metashape Professional искомые параметры были получены (табл. 3), и могут использоваться при дальнейших наблюдениях.

Во многих случаях такие сведения сложно получить стандартными инструментальными методами не только ввиду большой протяженности или сложной формы проявления, но и ввиду опасности спуска в саму воронку, зону сдвижения, карьер (неустойчивые борты и др.).

Помимо данных проявлений на территории аэрофотофиксацией определены контурсы

многочисленных водоемов с кислыми и, напротив, со щелочными водами. Последние, помимо обнаружения на участке рекультивации южной группы провалов, установлены вблизи производства известкового молочка в результате периодического его разлива.

Замер величины рН (дающей представление о протекающих термодинамических процессах) на водных створах обычно выполнялся *in situ* лакмусовой бумагой. В 2014, 2018, 2019 гг. для уточнения ситуации был использован портативный рН-метр Hanna HI 9125. Согласно выполненным замерам, природный уровень окислительно-восстановительного потенциала нейтральный и фиксируется в р. Исток выше территории Дегтярского месторождения (рН 6,5–7,5). Наиболее кислые воды (рН

Таблица 4. Замер величины pH в створах (по годам).
Table 4. Measurement of pH in Sections (by year).

Описание гидроствора – точки наблюдения	Водородный показатель pH		
	2014	2018	2019
Подотвальные воды в районе шахты «Капитальная-2»	–	2,60	2,40
Река Дегтярка перед шахтой «Капитальная-2»	7,53	7,60	7,20
Река Дегтярка перед участком «Гидромедь»	2,60	2,47	2,40
Река Дегтярка на участке «Гидромедь»	2,57	2,57	2,57
Река Дегтярка в месте впадения р. Сухарки	4,40	5,70	5,30
Река Дегтярка перед входом на станцию нейтрализации	2,58	5,10	5,30
Река Исток перед карьером «Колчеданный»	7,26	–	–
Вода карьера «Колчеданный», включая частично сток р. Исток	2,50	2,40	2,55
Река Исток перед входом на станцию нейтрализации	4,86	2,39	2,70
Совместный сток р. Дегтярки и р. Исток после станции нейтрализации	12,29		5,70
Подотвальные воды у террикона шахты «Капитальная-1»	2,57	2,39	2,80
Воды карьера у горы Лабаз	2,85	2,75	2,80
Водоем у рекультивированных провалов Южной зоны сдвижения	–	–	12,00
Ельчевский осветлительный пруд	7,54	–	–

Таблица 5. Кратность превышения ПДК в створах на 2014 г.
Table 5. The multiplicity of exceeding the maximum permissible concentration in sections for 2014.

Описание точки наблюдения	Определяемая характеристика			
	Железо	Кадмий	Медь	Цинк
Река Дегтярка перед участком «Гидромедь»	3640,0	360,0	63,5	100,6
Река Дегтярка перед входом на станцию нейтрализации	963,3	27,0	2,7	19,3
Вода карьера «Колчеданный», включая частично сток р. Исток	2253,3	18,0	1,5	19,1
Река Исток перед входом на станцию нейтрализации	2,2	4,6	–	1,3
Подотвальные воды у террикона шахты «Капитальная-1»	1585,0	300,0	46,7	80,8
Воды карьера у горы Лабаз	300,0	3,6	–	3,1
Ельчевский осветлительный пруд	1,4	–	–	1,6

Таблица 6. Валовые и водорастворимые формы железа в донном осадке карьера «Колчеданный» и р. Дегтярка (2012–2014).
Table 6. Gross ratio and water-soluble forms of iron in the bottom sediment of the open pit mine Kolchedannaya and river Degtyarka (2012–2014).

Место отбора	Валовое содержание, г/кг		Водорастворимые формы, мг/дм ³
	2012 г.	2014 г.	2012 г.
Карьер «Колчеданный» (выход рудничных вод)	500	488	492
Река Дегтярка выше шахты «Капитальная-1»	126	156	4
Река Дегтярка перед станцией нейтрализации	168	176	18
Река Дегтярка после станции нейтрализации	22	–	7

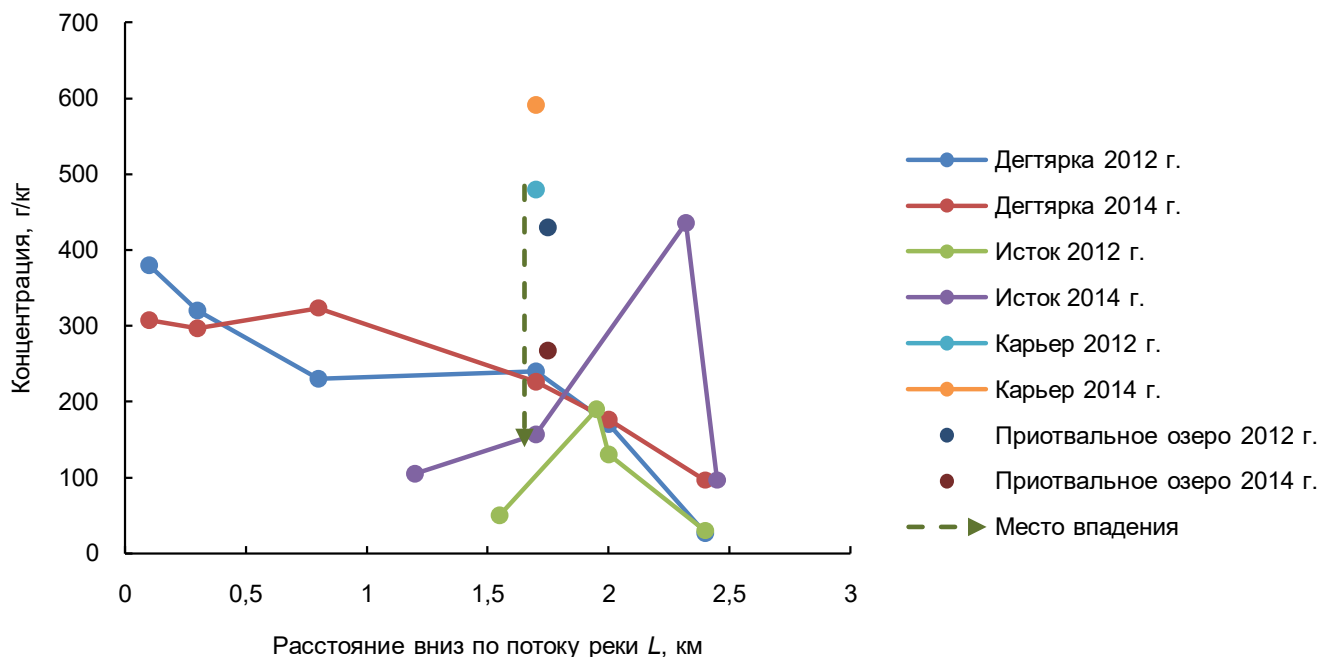


Рисунок 4. Продольный профиль содержания Fe в донных отложениях в зоне Дегтярского техногенеза.
 Figure 4. Longitudinal profile of Fe content in bottom sediments in the zone of Degtyarskiy technogenesis.

2–3) зафиксированы на р. Дегтярке (гидроствор на участке «Гидромедь») и в приотвальном озере (террикон шахты «Капитальная-1»). Рудничные воды также имели и имеют кислую реакцию. Щелочные воды (рН 10–12) образованы на поверхности земли на гидростворах в местах разливов извести и рекультивации группы провалов металлургическим шламом в южной зоне сдвижения рудника. Результаты замера рН среды в створах на каждый из периодов приведены в табл. 4.

Отбор проб на химический анализ воды производился дважды в 2012 и 2014 гг. на 10 створах рек Исток и Дегтярка, карьере «Колчеданный» (над шахтой «Колчеданная») и в приотвальном озере. Установлено, что ведущим техногенно-природным геохимическим процессом является химическое выветривание. Поверхностным и подземным стоком с участка месторождения происходит вынос токсичных компонентов из разрушенной и окисленной поверхности горных пород на отвалах и выработанных полостях рудника, отвальных пород, заполняющих некоторые карьерные выемки и формирующих грунтовые подушки дорожных покрытий. В основном это сульфидсодержащие отложения, из состава которых выносятся подвижные формы Cd, Cu, Zn, Fe, As, S и др., кратность превышения ПДК (для поверхностных водных объектов рыбохозяйственного назначения) по некоторым элементам приведена в табл. 5.

Наличие процесса в подземных полостях можно установить по количеству сульфатов и сухого остатка в изливающихся рудничных водах. Расчет выноса химических компонентов на изливе рудничных вод из карьера «Колчеданный» проводились в рамках работы А. И. Вишняка (2003–2005). Средний вынос сульфатов (SO₄²⁻) на август 2003 г. оценивался как 665 т/мес (содержание SO₄²⁻ на

09.08.2003 г. составляло 7110,40 мг/дм³) при расходе выхода рудничных вод 34,9 дм³/с. По результатам опробования на 28.08.2014 г. расчетный вынос составил 380 т/мес (содержание SO₄²⁻ – 4070,4 мг/дм³).

Расчет выноса сульфатов *M* производился по балансовой зависимости, где *Q* – расход сосредоточенного выхода рудничных вод в карьере «Колчеданный», *C*_{SO} – концентрация сульфатов:

$$M \text{ [т/мес]} = Q \text{ [дм}^3\text{/мес]} C_{SO} \text{ [т/дм}^3\text{]}.$$

Полученные данные соответствуют эмпирической геохимической модели формирования рудничных вод на Дегтярском руднике на пассивной стадии техногенеза, описанной в работе С. Н. Елохиной [10], по которой содержание растворенных сульфатов твердой фазы во времени уменьшается.

Основные геоэкологические проблемы на участке постэксплуатации связаны с кислым и агрессивным *поверхностным и подземным стоком*, обогащенным железом и тяжелыми металлами.

По данным А. И. Вишняка, среднегодовой вынос железа рудничным изливом с Дегтярского участка постэксплуатации составляет 1575 т/год и примерно соответствует объему выноса рудничным водоотливом, который дополнительно подвергался более полной химической обработке на цементационной установке (участок «Гидромедь»). Вынос наиболее токсичного элемента кадмия на тот же период составляет 0,2 т/год при концентрации 0,10–0,26 мг/дм³.

Отбор донных отложений в поверхностных водных объектах необходим для фиксации процессов вторичного минералообразования в речных водах Дегтярки и Истока. Точки отбора проб донных образований совмещались с точками отбора проб поверхностных вод. На основе

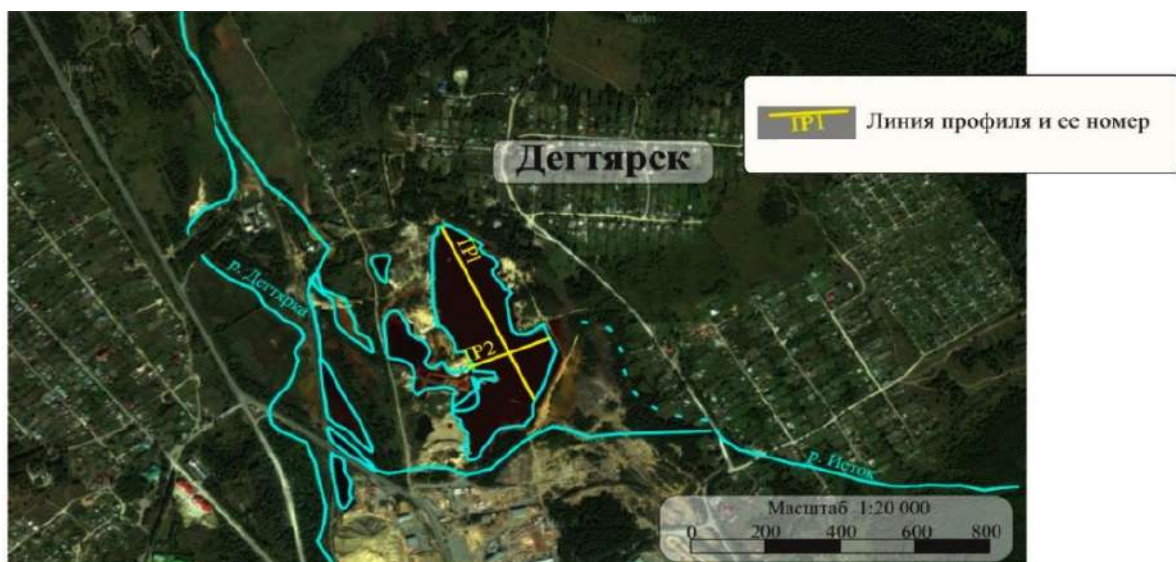
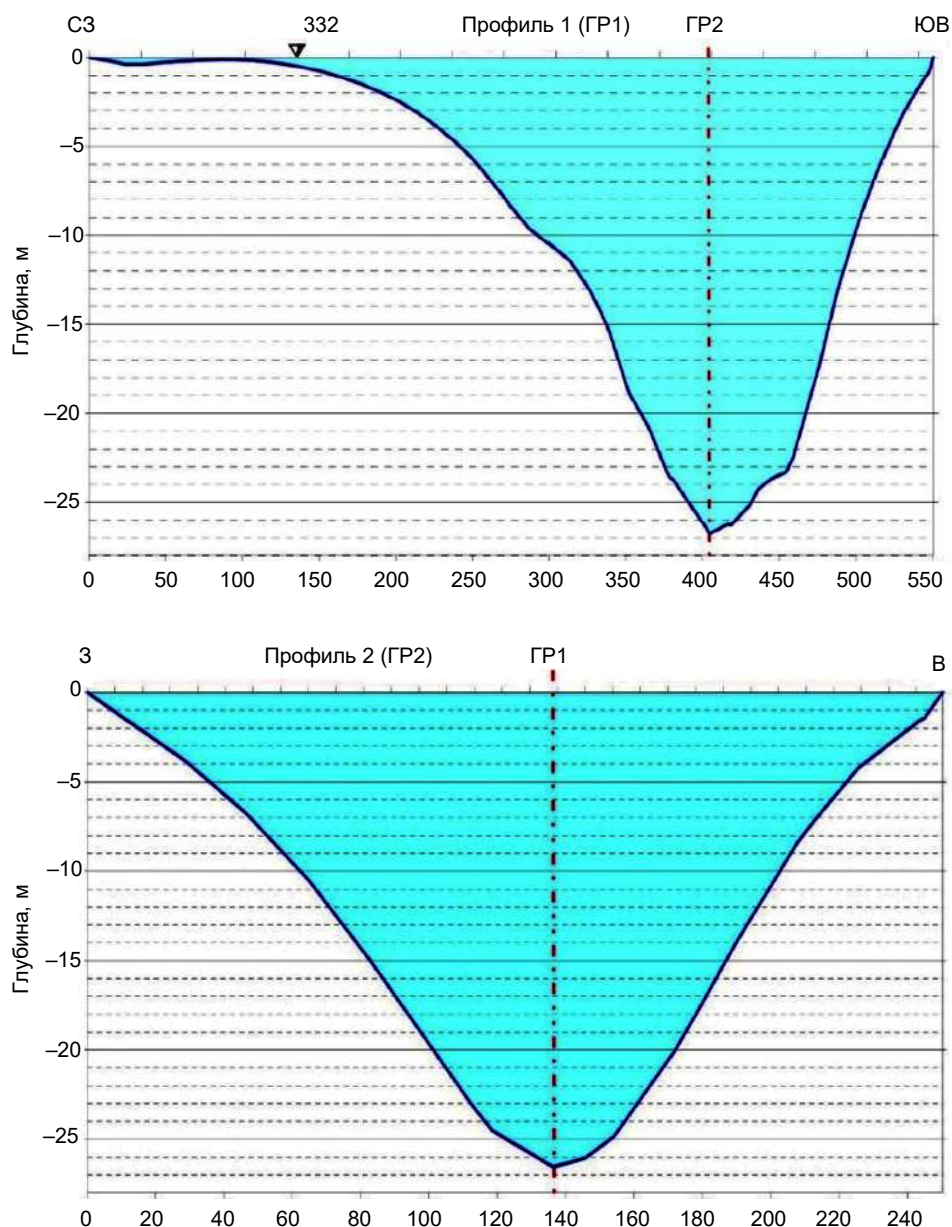


Рисунок 5. Результаты батиметрических исследований карьера «Колчеданный».
 Figure 5. The results of bathymetric studies of the quarry mine “Kolchedannaya”.

полученных данных составлен продольный профиль содержания железа в донных отложениях на изучаемой территории (рис. 4).

При выходе шахтных вод на поверхность земли в бортах карьерного озера, в русле рек Дегтярка и Исток после взаимодействия с атмосферными агентами в донных отложениях накапливается специфический серо-коричневый осадок, содержащий большое количество железа (табл. 6). Максимальное содержание элементов технофильной ассоциации (Ni, Cu, Zn, Al, Pb, Mn, Cr, Co, Cd, Fe, Mg, As) в донных отложениях наблюдается на участках бывшей плотины «Гидромедь» и в донных отложениях приотвального озера террикона шахты «Капитальная-1».

При реабилитации территории техногенеза донный осадок как источник вторичного загрязнения поверхностных вод должен быть нейтрализован или удален.

Батиметрическая съемка была проведена на карьере шахты «Колчеданная» и на Ельчевском пруду-отстойнике. Для карьера «Колчеданный» определен рельеф дна с максимальной глубиной 27 м (рис. 5). В Ельчевском пруду-отстойнике получены данные о неравномерном распределении накопленного осадка: техногенные отложения практически отсутствуют в северной части пруда, тогда как южная часть пруда практически полностью заполнена техногенными отложениями желтого цвета. Минералогический состав техногенных отложений на сегодняшний день не изучен.

Обсуждение результатов

Научастьях горнопромышленной постэксплуатации Урала ранее авторами выделены и описаны специфические природно-техногенные геологические процессы в формате пяти взаимосвязанных групп, унаследованных от периода эксплуатации [10, 13]. Процессы проявляются в морфометрии рельефа (так называемая группа ландшафтов); антропогенном литогенезе, протекающем особым образом в субаэральных, субаквальных и субтерральных условиях; аномальном состоянии подземных вод с особыми гидродинамическими, гидрохимическими и геохимическими условиями; неравновесном геодинамическом состоянии поверхности массива горных пород; нестационарных гидрогеодинамическом, геодинамическом, литодинамическом и геотермическом режимах подземного обводненного пространства (субтеррарий – пещер, техногенных подземных полостей) [13].

Возможность организации наблюдений за всем перечнем названных процессов в системе ГМСН в силу ряда причин весьма ограничена. Например, вся совокупность субтерральных процессов закрыта для исследования по причинам безопасности, согласно требованиям Ростехнадзора. Следовательно, для контроля за геоэкологической ситуацией на участке горнопромышленной постэксплуатации требуется выявлять связь (синергию) активности субтерральных процессов с другими опасными процессами, имеющими поверхностные формы проявления. Например, геохимические параметры рудничных (шахтных) вод на

выходе из затопленных горных выработок могут быть увязаны с процессами выноса минеральных частиц из подземных полостей, техногенной суффозией, интенсивностью образования донных отложений и т. п. Для этих целей незаменимо накопление динамических характеристик состояния массивов горных пород, поверхностных водных объектов на участке постэксплуатации, которое осуществляется в процессе ведения ГМСН.

Использование возможности дистанционной цифровой съемки открывает перспективы количественного мониторинга состояния ландшафтов. При этом в любом случае необходим геохимический контроль на опорных гидростворах за химическим составом как поверхностных вод, так и донных отложений. На Дегтярском участке целесообразно выполнять периодический отбор проб как минимум на 4 створах, включая фоновый на р. Исток, излив с карьера «Колчеданный», перед известкованием и перед впадением в р. Ельчевку. Периодичность отбора проб и их лабораторные исследования целесообразно рекомендовать один раз в 5 лет.

Выводы

Комплексный анализ компонентов геологической среды Дегтярского участка показал, что по истечении 25-летнего периода постэксплуатации его территория представляет собой экологически опасную зону, находящуюся в области питания источника питьевого водоснабжения г. Екатеринбург (Волчихинского водохранилища).

Несмотря на определенный объем рекультивационных мероприятий, территория сохраняет в себе опасный потенциал как с позиции активности провальных и иных геологических процессов или явлений, включая техногенную суффозию, так и загрязнения окружающей среды (подземных и поверхностных вод и т. п.). Поэтому территорию участка в нарушенных горными работами ландшафтах, как и любого другого участка постэксплуатации, целесообразно квалифицировать как *опасный природно-техногенный объект*, на котором в особых природно-техногенных условиях активность природных факторов проявляется специфическими разнообразиями и активностью.

Актуально создание реестров и паспортов всех участков постэксплуатации Урала, а также проведение систематических обследований их территории с целью установления темпов природно-техногенного преобразования и выявления *демпферных ландшафтных маркеров* горнорудного профиля. На Дегтярском участке таким является Ельчевский пруд-отстойник [9, 10]. Целесообразно широкое внедрение метода аналогии [14]. Формой хранения данных может служить разработанная авторами предварительная реляционная базы данных [15].

Рассчитывать на включение Дегтярского участка в национальный проект «Экология» пока не приходится из-за наличия на государственном балансе остаточных запасов полезных ископаемых на объекте.

ЛИТЕРАТУРА

1. Спектор С. В., Пурач С. Л., Платонова А. В., Лыгин А. М. Государственный мониторинг состояния недр – информационная основа государственного гидрогеологического картирования // Разведка и охрана недр. 2018. С 16–30.
2. Rösner T., van Schalkwyk A. The environmental impact of gold mine tailings footprints in the Johannesburg region, South Africa // Bulletin of Engineering Geology and the Environment. 2000. October. Vol. 59, issue 2. P. 137–148. <http://dx.doi.org/10.1007/s100640000037>
3. Omotehinse A. O., Ako B. D. The environmental implications of the exploration and exploitation of solid minerals in Nigeria with a special focus on Tin in Jos and Coal in Enugu // Journal of Sustainable Mining. 2019. February. Vol. 18, issue 1. P. 18–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsm.2018.12.001>
4. Salonen V.-P., Tuovinen N., Valpola S. History of Mine Drainage Impact on Lake Orijärvi Algal Communities, SW Finland // Journal of Paleolimnology. 2006. February. Vol. 35, issue 2. P. 289–303. <http://dx.doi.org/10.1007/s10933-005-0483-z>
5. Kulikova T., Hiller E., Jurkovič L., Filová L., Šottník P., Lacina P. Total mercury, chromium, nickel and other trace chemical element contents in soils at an old cinnabar mine site (Merník, Slovakia): anthropogenic versus natural sources of soil contamination // Environmental Monitoring and Assessment. 2019. April. Vol. 191, issue 5. Extend 263. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-019-7391-6>
6. Dragun Z., Tepić N., Ramani S., Krasnići N., Marijić V. F., Valić D., Kapetanović D., Erk M., Rebok K., Kostov V., Jordanova M. Mining waste as a cause of increased bioaccumulation of highly toxic metals in liver and gills of Vardar chub (*Squalius vardarensis* Karaman, 1928) // Environmental Pollution. 2019. April. Vol. 247. P. 564–576. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.068>
7. Mining and the Environment: International perspectives on public policy / ed. by Roderick G. Eggert. N. Y.: Routledge, 1994. 172 p.
8. Wong H. K. T., Gauthier A., Nriagu J. O. Dispersion and toxicity of metals from abandoned gold mine tailings at Goldenville, Nova Scotia, Canada // Science of The Total Environment. 1999. March. Vol. 228, issue 1. P. 35–47. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00021-2)
9. Вишняк А. И., Четверкин И. А. Новые гидрогеологические проблемы Уральского региона // Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы: тез. докл. междунар. симпоз. 2007. С. 42–43.
10. Елохина С. Н. Геоэкологические проблемы затопленных рудников Урала / под ред. О. Н. Грязнова. Екатеринбург: ООО «УИПЦ», 2013. 187 с.
11. Прокин В. А., Душин В. А. История изучения и освоения рудных месторождений Урала. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 2010. 222 с.
12. Емлин Э. Ф. Техногенез колчеданных месторождений Урала. Свердловск: Изд-во Урал. ун-та. 1991. 255 с.
13. Грязнов О. Н., Елохина С. Н. Геоэкологические проблемы горнопромышленного техногенеза на Урале // Изв. УГГУ. 2017. Вып. 2 (46). С. 28–33. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-28-33>
14. Ярл Л. А. Применение метода аналогии при прогнозе горно-геологических процессов и возникновении кислых вод при инженерно-геологической оценке условий разработки рудных месторождений // Геология и разведка. 1985. № 5. С. 76–83.
15. Елохина С. Н., Киндлер А. А. Выбор параметров контроля текущего состояния опасных геологических процессов на территориях горного техногенеза пассивной стадии // Материалы годичной сессии научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Сергеевские чтения (2–4 апр. 2019 г.). Пермь, 2019. Вып. 21. С. 405–411.

Статья поступила в редакцию 25 декабря 2019 года

Monitoring of the condition subsurface on the post mining period in the Ural region (Degtyarskiy land area)

Svetlana Nikolaevna ELOKHINA^{1*},
Aleksy Aleksandrovich KINDLER^{2**}

¹Ural State Mining University, Ekaterinburg, Russia

²Ural Regional Centre GMSN – Branch of FSBI “Hydrospeceology”, Ekaterinburg, Russia

Annotation

Objective of the work: to study the state of the territory of Degtyarskiy area during the period of mining post-exploitation and to study the methods for assessing and taking into account the current state of this object.

Relevance of the topic. The postmining land area is the territory of mining development, including disturbed and under-worked land, where mining production is currently stopped and a certain amount of reclamation activities are implemented. According to numerous Ural's data, hazardous geological processes are being activated in such land areas, so the Degtyarskiy section has been used as part of the state monitoring of the condition subsurface. The article presents the research methodology implemented over the past 10 years, and discusses the results obtained (as of 2019).

Methods of investigation. For assessment of subsoil in Degtyarskiy phase, in addition to the analysis of the prior information, conducted periodic visits to the site from visual observations with photographic documentation, including remote shooting of the territory; bathymetric plots areas of the mine water output (quarry excavation) and dentinho target (Elchevsky pond-sump); serial sampling of water and bottom sediments in the control hydro sections; measurement of the hydrogen index of the aquatic environment at the site; laboratory testing of samples for specific components of specific chemical composition.

The results of the work. According to obtained materials, dangerous level of the geochemical, hydro-and geodynamic disequilibrium is recorded at the Degtyarskiy post-exploitation site. It is proposed to continue periodic observations on the site as analog object, uncluding the works of both remode and geochemical nature in the mode at least once every five years.


Conclusions. According to the set of indicators, the post-exploitation site is proposed to be classified as a dangerous natural and man-made object, so it is recommended to create registers and passports for all Ural's postmining sites.

Keywords: postmining, a dangerous natural and man-made object, monitoring of subsurface conditions, Ural.


REFERENCE

1. Spektor S. V., Pugach S. L., Platonova A. V., Lygin A. M. 2018, *Gosudarstvennyy monitoring sostoyaniya neдр – informatsionnaya osnova gosudarstvennogo gidrogeologicheskogo kartirovaniya* [State monitoring of the state of the subsoil - an informational basis of state hydrogeological mapping], *Razvedka i okhrana neдр* [Prospect and protection of mineral resources], pp 16–30. (*In Russ.*)
2. Rösner T., van Schalkwyk A. 2000, The environmental impact of gold mine tailings footprints in the Johannesburg region, South Africa // *Bulletin of Engineering Geology and the Environment*. October. Vol. 59, issue 2. pp. 137–148. <http://dx.doi.org/10.1007/s100640000037>
3. Omotehinse A. O., Ako B. D. 2019, The environmental implications of the exploration and exploitation of solid minerals in Nigeria with a special focus on Tin in Jos and Coal in Enugu. *Journal of Sustainable Mining*. February. Vol. 18, issue 1. pp. 18–24. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsm.2018.12.001>
4. Salonen V.-P., Tuovinen N., Valpola S. 2006, History of Mine Drainage Impact on Lake Orijärvi Algal Communities, SW Finland. *Journal of Paleolimnology*. February. Vol. 35, issue 2. pp. 289–303. <http://dx.doi.org/10.1007/s10933-005-0483-z>
5. Kulikova T., Hiller E., Jurkovič L., Filová L., Šottník P., Lacina P. 2019, Total mercury, chromium, nickel and other trace chemical element contents in soils at an old cinnabar mine site (Merník, Slovakia): anthropogenic versus natural sources of soil contamination. *Environmental Monitoring and Assessment*. April. Vol. 191, issue 5. Extend 263. <http://dx.doi.org/10.1007/s10661-019-7391-6>
6. Dragun Z., Tepić N., Ramani S., Krasnići N., Marijić V. F., Valić D., Kapetanović D., Erk M., Rebok K., Kostov V., Jordanova M. Mining waste as a cause of increased bioaccumulation of highly toxic metals in liver and gills of Vardar chub (*Squalius vardarensis* Karaman, 1928). *Environmental Pollution*. 2019. April. Vol. 247. pp. 564–576. <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2019.01.068>
7. 1994, *Mining and the Environment: International perspectives on public policy* / ed. by Roderick G. Eggert. N. Y.: Routledge, 172 p.
8. Wong H. K. T., Gauthier A., Nriagu J. O. 1999, Dispersion and toxicity of metals from abandoned gold mine tailings at Goldenville, Nova Scotia, Canada. *Science of The Total Environment*. March. Vol. 228, issue 1. P. 35–47. [https://doi.org/10.1016/S0048-9697\(99\)00021-2](https://doi.org/10.1016/S0048-9697(99)00021-2)
9. Vishnyak A. I., Chetverkin I. A. 2007, New hydrogeological problems of the Ural region. The future of hydrogeology: current trends and prospects: abstracts of the international symposium. pp. 42–43.
10. Elokina S. N. 2013, *Geoekologicheskiye problemy zatoplennykh rudnikov Urala* [Geoecological problems of flooded mines of the Urals], ed. by O. N. Gryaznova. Ekaterinburg, 187 p.
11. Prokin V.A., Dushin V.A. 2010, *Istoriya izucheniya i osvoyeniya rudnykh mestorozhdeniy Urala* [History of the study and development of ore deposits in the Urals]. Ekaterinburg, 222 p.

✉ elohina.s@mail.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-8641-5439>

*kindler@gmsn-ural.ru

 <https://orcid.org/0000-0003-1082-5164>

12. Emlin E.F. 1991, *Tekhnogenez kolchedannykh mestorozhdeniy Urala* [Technogenesis of pyrite deposits in the Urals]. Sverdlovsk, 255 p.
13. Gryaznov O.N., Elokhina S.N. Geoecological problems of mining technogenesis in the Urals // News of URSMU. 2017. issue 2 (46). pp. 28–33. <https://doi.org/10.21440/2307-2091-2017-2-28-33>
14. Yarg L. A. 1985, Application of the method of analogy in the prediction of mining and geological processes and the occurrence of acidic waters in engineering and geological assessment of the conditions for the development of ore deposits. *Geologiya i razvedka* [Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration], No 5. pp. 76–83 (*In Russ.*).
15. Elokhina S. N., Kindler A. A. 2019, Choice of parameters for monitoring the current state of hazardous geological processes within the territories of passive stage mining technogenesis. Materials of the annual session of the RAS Scientific Council on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology. *Sergeyev Readings* (April 2–4, 2019). Perm. Issue 21. pp. 405–411.

The article was received on Desember 25, 2019