

УДК 622.7.017

ФОРМИРОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ЧЕЛЯБИНСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА НА ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ЭТАПЕ

© 2023 г. Л. С. Рыбникова^{1,*}, П. А. Рыбников^{1,**}, А. Ю. Смирнов^{1,***}, И. В. Галицкая^{2,****},
Г. И. Батрак^{2,3,*****}, О. В. Лысенко^{3,*****}, В. С. Пономарев^{3,*****}

¹Институт горного дела УрО РАН,
ул. Мамина-Сибиряка, 58, Екатеринбург, 620075 Россия

²Институт геоэкологии им. Е.М. Сергеева РАН,
Уланский пер., 13, стр. 2, Москва, 101000 Россия

³Федеральное государственное бюджетное учреждение по вопросам реорганизации
и ликвидации нерентабельных шахт и разрезов,
Огородный проезд, 5, стр. 6, Москва 127254, Россия

*E-mail: luserib@mail.ru

**E-mail: ribnikoff@yandex.ru

***E-mail: alexsm94@gmail.com

****E-mail: galgeoeny@mail.ru

*****E-mail: gib74@mail.ru

*****E-mail: lov@gursh.ru

*****E-mail: pvs@gursh.ru

Поступила в редакцию 10.01.2023 г.

После доработки 10.01.2023 г.

Принята к публикации 27.01.2023 г.

Завершение отработки месторождений полезных ископаемых приводит к необходимости разработки новых методов управления территориями, нарушенными в ходе горных работ. Закрытие горнодобывающих объектов, особенно имеющих длительную историю отработки, является причиной формирования сложной экологической обстановки. Освоение месторождений сопровождается дренажными мероприятиями, которые приводят к изменению баланса и структуры потоков поверхностных и подземных вод, к влиянию новых агентов на качественный состав гидросферы. Использование при отработке схем с обрушением кровли выработанного пространства провоцирует развитие геомеханических процессов, вследствие которых формируются зоны обрушения и сдвижения, сопровождающиеся нарушениями земной поверхности. Прекращение эксплуатации рудника означает остановку водоотлива, что приводит к постепенному заполнению депрессионной воронки, формированию участков подтопления и выходов шахтных вод на поверхность. Неустойчивые породы в бортах карьеров, на которых и при водоотливе были оползни, при подъеме уровня воды становятся особо опасными участками. Учитывая, что зачастую селитебная и промышленная застройка исторически располагается в непосредственной близости от рудников (иногда даже в пределах горного отвода), гидрогеоэкологические проблемы старопромышленных районов на постэксплуатационном этапе очень обостряются. При этом во многих случаях трудно определить, какие именно факторы: природные (особенности геологического строения, геоморфологические условия, водность периода) или техногенные (прекращение водоотлива), являются ответственными за подтопление территории, особенно на тех участках, которые находятся на значительном расстоянии от объектов завершённой отработки. Это порождает многочисленные спекуляции и приводит к нерациональным техническим решениям. На примере Челябинского угольного бассейна рассмотрены эколого-гидрогеологические проблемы, возникшие после завершения его отработки и прекращения водоотлива. Предложены мероприятия по снижению их негативного влияния на гидрогеоэкологические условия территории.

Ключевые слова: гидрогеологические условия, геоэкологические проблемы, водоотлив, дренаж, затопление, подтопление, угольные месторождения, оползень, утечки, водонесущие коммуникации, котловинно-бугристый рельеф

DOI: 10.31857/S0869780923020078, EDN: TWOEKS

ВВЕДЕНИЕ

В предыдущие десятилетия завершилась отработка многих месторождений полезных ископаемых месторождений как в мире, так и в России. Независимо от состояния горных работ наравне с задачами развития горной промышленности все более актуальными становятся не только проблемы ликвидации нерентабельных предприятий, но и вопросы управления опасностями в районах, где горнодобывающая деятельность уже не ведется. Это привело к необходимости предотвращения экологических рисков на территориях, нарушенных многолетними горными работами, проведение их реабилитации, организации процесса затопления и его мониторинга [4, 7, 8, 10, 11, 13, 15, 17, 25].

После завершения горнодобывающей деятельности с серьезными проблемами столкнулись старопромышленные районы Европы. Так, в 1992 г. после 800 лет эксплуатации были прекращены горные работы в регионах с большой плотностью отработанных угольных шахт и населения (Aachen, Германия и South-Limburg, Нидерланды), воронка депрессии площадью около 400 км² заполнилась за несколько лет, уровень подземных вод поднялся на 200–240 м [26].

В 2012 г. была прекращена добыча каменного угля на территории Saarland, Германия, насчитывающей 200-летнюю историю добычи. Завершена отработка Рурского каменноугольного бассейна, где уголь добывался с XII в. Обеспечение безопасного процесса затопления подземных выработок и ликвидации их негативных последствий требует больших финансовых затрат [22].

Триста лет угледобычи в бассейне Durham (Англия) привели к осушению водоносных горизонтов на огромных площадях. Прекращение водоотлива и заполнение депрессионной воронки могли спровоцировать многочисленные негативные последствия, в том числе: загрязнение питьевых водозаборов подземных вод; подтопление отвалов, отстойников; их активное выщелачивание и др. Для поддержания уровня шахтных вод ниже продуктивного водоносного горизонта (Basal Permian Sands), предотвращения их выхода на поверхность осуществляются откачка и очистка шахтных вод на специально построенном заводе производительностью около 15 тыс. м³/сут [27].

Отработанные горные объекты в США являются самыми крупными и дорогостоящими, на которых Агентство по охране окружающей среды (US EPA) проводит многолетние широкомасштабные реабилитационные работы за счет средств Суперфонда¹ [24].

¹ Закон о всесторонней ответственности и возмещении ущерба окружающей среде, известный также как Программа Суперфонда, был принят Конгрессом США в 1980 г.

В 1993–1994 гг. в России началась реструктуризация угольной отрасли, в процессе которой ликвидировано 203 угледобывающих предприятия, из них 188 шахт и 15 разрезов [9].

Вопреки ожидавшимся сценариям развития негативных последствий закрытия и затопления угольных шахт в различных угольных бассейнах России, многие вызванные ими явления оказались более длительными и нестабильными. В Кузнецком и Донецком угольных бассейнах значительные территории были подтоплены; загрязнены и выведены из строя питьевые водозаборы; наблюдаются выходы токсичных газов и просадки земной поверхности [1, 6, 12, 14]. После закрытия шахт Кизеловского бурогоугольного бассейна сформировалось 16 изливов кислых шахтных вод, которые без очистки поступают в бассейны рек Чусовая, Косьва, Яйва, Вильва, загрязнение прослеживается до Камского водохранилища [5, 16, 18].

Месторождения Челябинского бурогоугольного бассейна были открыты в 1832 г., их промышленная разработка началась в 1907 г. Пик угледобычи пришелся на 1960 годы, в конце 1980 годов начался процесс закрытия шахт, к настоящему времени работа всех шахт и разрезов прекращена. К началу 1990 годов наиболее крупными шахтами были в г. Копейск “Красная горнячка”, “Центральная”, “Комсомольская”, “Капитальная”; в г. Коркино — “Коркинская” и разрез “Коркинский”, в г. Еманжелинск — шахтоуправление “Куллярское”. Наиболее проблемными по эколого-гидрогеологическим проявлениям к настоящему времени являются участки в районах бывших ш. “Красная горнячка”, разрезов “Копейский” и “Коркинский”.

Исторически сложилось так, что города Копейск (население около 150 тыс. чел.), Коркино (35 тыс. чел.) выросли на базе поселков, располагавшихся возле угольных шахт и разрезов; жилые зоны складывались хаотично, тяготея к вводимым в эксплуатацию шахтам. В настоящее время угледобывающие предприятия, как особо убыточные, закрыты, а шахтерские поселки остались.

Суммарный среднегодовой водоотлив достигал 2363 м³/час при глубине отработки до 510 м. Прекращение водоотлива приводит к постепенному заполнению депрессионных воронок и сопровождается заполнением зон обрушения, подъемом уровня воды в разрезах, подтоплением населенных пунктов и объектов инфраструктуры.

Цель работы — анализ развития гидрогеологической ситуации в пределах Челябинского угольного бассейна после завершения отработки шахт и разрезов.

Таблица 1. Сведения о глубинах отработки и величине водоотлива

Шахта, разрез	Глубина действующего горизонта, м	Приток воды, от-до/средний, м ³ /час	Коэффициент водообильности, м ³ /т	Период эксплуатации, годы
“Красная горнячка”	400	282–405/350	5.7	1930–2003
“Центральная”	475	181–234/203	2.8	1932–2006
Копейский	75–130	35–90/63	1.0	1981–2004
“Капитальная”	460	120–137/131	1.0	1942–2009
“Комсомольская”	510	248–516/368	6.6	1952–2008
“Октябрьская”	265	160–238/187	8.3	1958–1996
“Калачевская”	100	96–175/114	6.0	1953–2002
“Коркинская”	480	71–145/109	1.4	1947–2013
Коркинский	453	85–137/99	0.5	1934–2017
“Батуринская”	240	210–261/236	5.3	1941–1997
Батуринский	153–189	315–468/416	6.9	1941–2001
“Куллярская”	330	50–147/91	3.8	1955–1997

ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Челябинский бурогольный бассейн (ЧУБ) находится на восточном склоне Урала, на западной окраине Западно-Сибирской низменности, занимает площадь 1300 км². Он протягивается суживающейся к югу полосой на расстояние более 150 км. Максимальная ширина угленосной структуры 14 км, глубина до 4 км [3].

До 2006 г. разработка месторождений велась ОАО “Челябинскуголь”. После его банкротства и ликвидации имущественный комплекс предприятия был выкуплен ОАО “Челябинская угольная компания”. Оставшиеся запасы угля на конец XX в. составляли 523 млн т.

Максимальная глубина отработки составляла до 510 м на ш. “Комсомольская”, максимальный водоотлив из нее был до 516 м³/час (табл. 1). Шахтные воды при отработке сбрасывались в озера Курлады, Третье, Курочкино, р. Чумляк, болото Уламово.

За период 2005–2021 гг. среднее количество осадков составило 460 мм/год, минимальное – 281 мм/год (2021 г.) и максимальное – 588 мм/год (2014 г.).

Рельеф района представляет собой слабо всхолмленную лесостепную равнину, граничащую на западе с пенеппеном восточного склона Урала и плавно понижающуюся в направлении региональных дрен. Равнина осложнена мелкими буграми и блюдцеобразными котловинами, что придает местности мелкобугристый котловинный характер.

Район относится к Иртышскому бассейновому округу. Особенности гидрографии – чрезвычайно редкая речная сеть и обилие бессточных

озерных котловин площадью от долей гектара до нескольких десятков квадратных километров (рис. 1). По северной окраине бассейна протекает р. Миасс (среднегодовой расход 18 м³/с), на юге р. Увелка (11 м³/с). Остальные речки имеют непостоянный сток и теряются при впадении в заболоченные озерные котловины.

Согласно тектонической схеме, исследуемый район находится в пределах Восточно-Уральского синклиория. Сильно метаморфизированные и дислоцированные палеозойские породы этой зоны в виде ступенчатой системы сбросов и уступов погружаются под покров отложений Западно-Сибирской низменности.

По геологическому строению Челябинский бассейн представляет собой грабен среди палеозойских пород, заполненный нижнемезозойскими угленосными отложениями. Западный борт крутой почти вертикальный, глубина грабена от 1700 до 3500 м. Восточный борт более пологий, его глубина от 500 до 1500 м.

Угленосными являются отложения верхнего отдела триасовой системы (калачевская, козыревская и коркинская свиты мощностью 1600–3500 м) и нижнего отдела юрской системы (сугоякская свита мощностью 450–770 м). В основании разреза каждой из свит залегают базальные безугольные горизонты, в составе которых преобладают аллювиально-пролювиальные песчано-конгломератовые отложения мощностью от 100 до 400 м. Выше залегают угленосные части свит, где преобладают болотно-озерные фации, содержащие пласты угля различной мощности.

В районе распространены подземные воды 2 типов: пластовые воды покровных отложений (наносов) четвертичного, неогенового, палеогено-

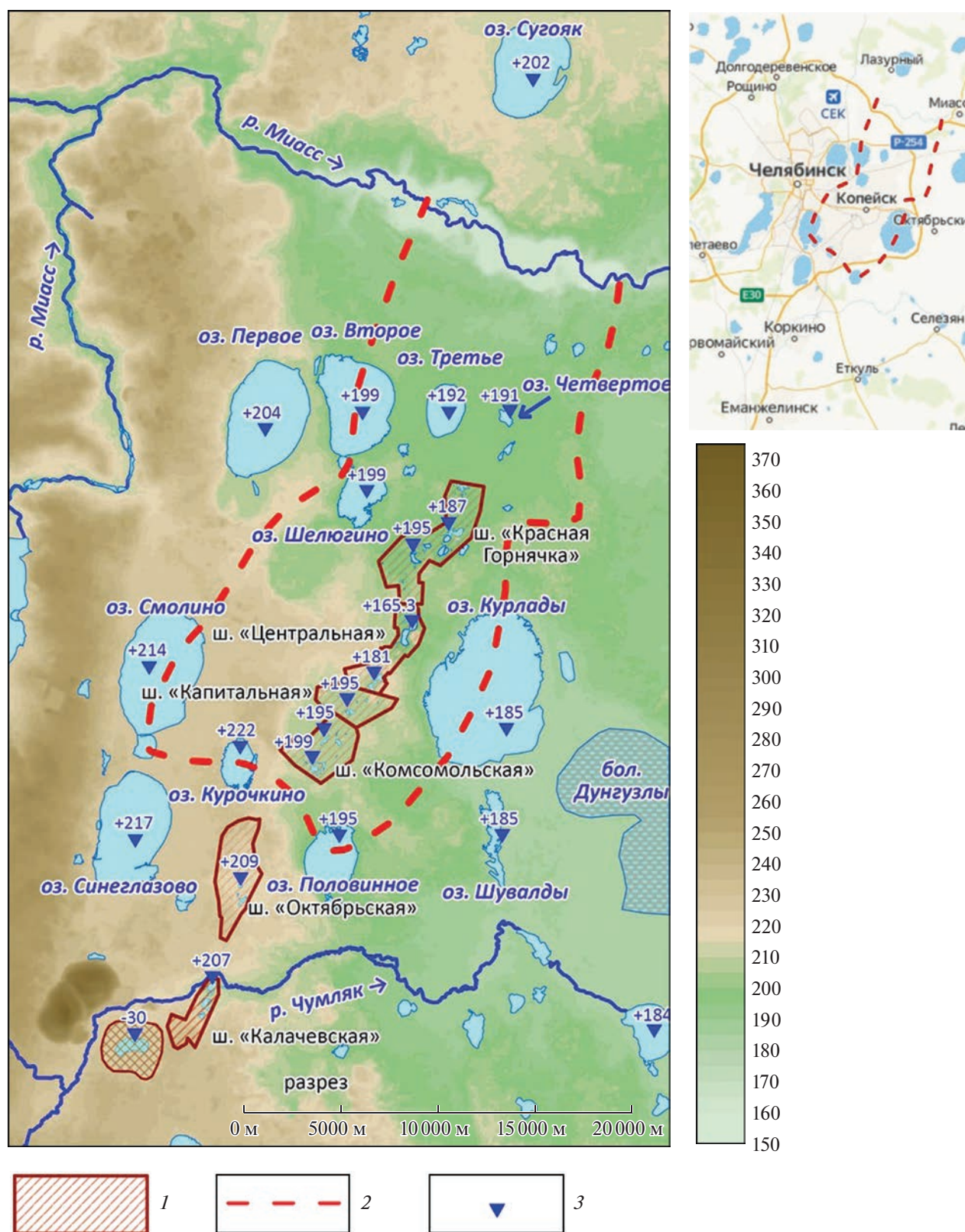


Рис. 1. Схема расположения шахтных полей и гидрографическая сеть района. 1 – горный отвод; 2 – граница водосборной площади шахт северной части ЧУБ (граница геофильтрационной модели); 3 – отметка уровня воды в водоемах.

нового, мелового возраста; трещинно-пластовые воды угленосной толщи юрского и верхнетриасового возраста.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Шахта “Красная горнячка”. Поверхность в границах горного отвода шахты “Красная горнячка” частично застроена частными жилыми домами поселков, здесь расположена селитебная застройка северо-восточной части г. Копейск. Севернее проходит автомобильная дорога Копейск-Вахрушево и Южно-Уральская железная дорога (рис. 2).

Водоотлив из ш. “Красная горнячка” был прекращен в июле 2003 г. Для предотвращения подтопления территории в 2004–2008 гг. был реализован ряд мероприятий: построены соединительная канава между озерами Третье и Четвертое (протяженностью 1.65 км) и водоотводной коллектор от оз. Четвертого до р. Миасс (диаметром 820 мм протяженностью 5 км); создана система дренажных канав, по которым вода поступает с затопленных участков в водоем карьера пласта VIII-2,3 (самую низкую часть горного отвода) и оттуда перекачивается в оз. Третье.

Начиная с 2004 г. на ряде угледобывающих предприятий, ликвидированных в рамках реструктуризации угольной промышленности, проводится мониторинг поверхностных и подземных вод, а также наблюдения за деформациями и сдвигами поверхности.

Проблемы подтопления северной части Копейского района, в том числе автомобильной и железной дорог, были связаны с подъемом уровня воды в озерах Третье и Четвертое. На протяжении многих десятилетий в оз. Третье сбрасывались шахтные воды (в год более 3 млн м³). Максимальный уровень воды в озерах Третье и Четвертое (194.2 м) наблюдался в 2002 г., тогда озера соединились.

К 2007 г. уровень воды в озерах понизился до абс. отм. 193 м, и проблема подтопления автомобильной и железной дорог была снята. В 2021 г. отметка уровня воды в оз. Третье составляла 190.9 м (проектная 192.6 м), в оз. Четвертое — 191.6 м (проектная 193.2 м) (рис. 3). Отметки воды в озерах на 1.6–1.7 м ниже проектных, и сброс воды из оз. Третье в оз. Четвертое не происходит. Площади озер существенно сократились, значительно ухудшилось качество воды в них.

Чтобы обеспечить наполняемость озер Третье и Четвертое, уровень воды в них нужно поднять до проектных отметок. Для этого необходимо 8.9 млн м³ воды (2.8 млн м³ для оз. Третье, и 6.1 млн м³ для оз. Четвертое). В настоящее время

в теплый период года откачивается порядка 600 тыс. м³, поэтому усыхание озер продолжится.

Уровень воды в карьере пласта VIII-2,3 достиг своего максимума (189.6 м) в весенний период 2019 г., была затоплена база отдыха и рыболовства, расположенная на берегу водоема (рис. 4). В июне 2019 г. начата откачка воды насосной станцией по водоводу в оз. Третье. К ноябрю 2019 г. уровень понизился на 3.5 м (до 186.1 м). Депрессионная воронка при откачке из карьера пласта VIII-2,3 имеет небольшие размеры. В наблюдательных скважинах на расстоянии более 1 км уровень подземных вод не реагирует на откачку и отражает естественный режим подземных вод.

Установившийся уровень воды в карьере VIII-2,3 при сохранении откачки в летний период составляет 187.5 м (сезонные колебания ± 1.0 м). Без такой откачки уровень стабилизируется на отметке 189.5 м.

На центральном и южном участках горного отвода процесс заполнения депрессионной воронки практически завершился (рис. 5). Глубина залегания уровня подземных вод изменяется 1.7 м от скв. 9-гн (на северной окраине пос. Новостройка) до 12.7 м в скв. 7-гн между озерами карьера пласта VIII-1,2 и Лесной склад.

Установившееся значение уровня воды в затопленных провалах и карьерах составляет от 192.2 м в провале шахты № 23 до 195.1 м в карьере пласта X (см. рис. 4).

На центральном и южном участках сохраняется стабильная гидрогеологическая обстановка. Для ее поддержания нет необходимости в создании новых систем водоотлива. Для исключения подтопления поверхности достаточно проводить надлежащее обслуживание дренажной системы.

Сочетание ряда факторов, таких как особенности геологического строения (наличие залегающей с поверхности толщи слабопроницаемых пород), геоморфологические условия (бугристо-впадинный котловинный тип рельефа) и повышенная водность периода (снеготаяние, обильные осадки), приводят формированию заболоченных участков, в том числе на территориях поселков. Размеры этих впадин от нескольких десятков до нескольких сот метров в диаметре, глубина от 1 до 6 м. Бугристо-котловинный рельеф аккумулирует в себя весь объем талых вод и атмосферных осадков и исключает их поверхностный сток. Так, например, на восточной окраине г. Копейск в районе пос. Горняк, в естественных понижениях развиты затопленные участки, которые расположены на водораздельных пространствах, находятся за пределами горного отвода, существовали и при работающем водоотливе (рис. 6). Местное население ошибочно связывает это с плохо проведенными работами по ликвидации шахт, считая, например, что: “...из-за расту-

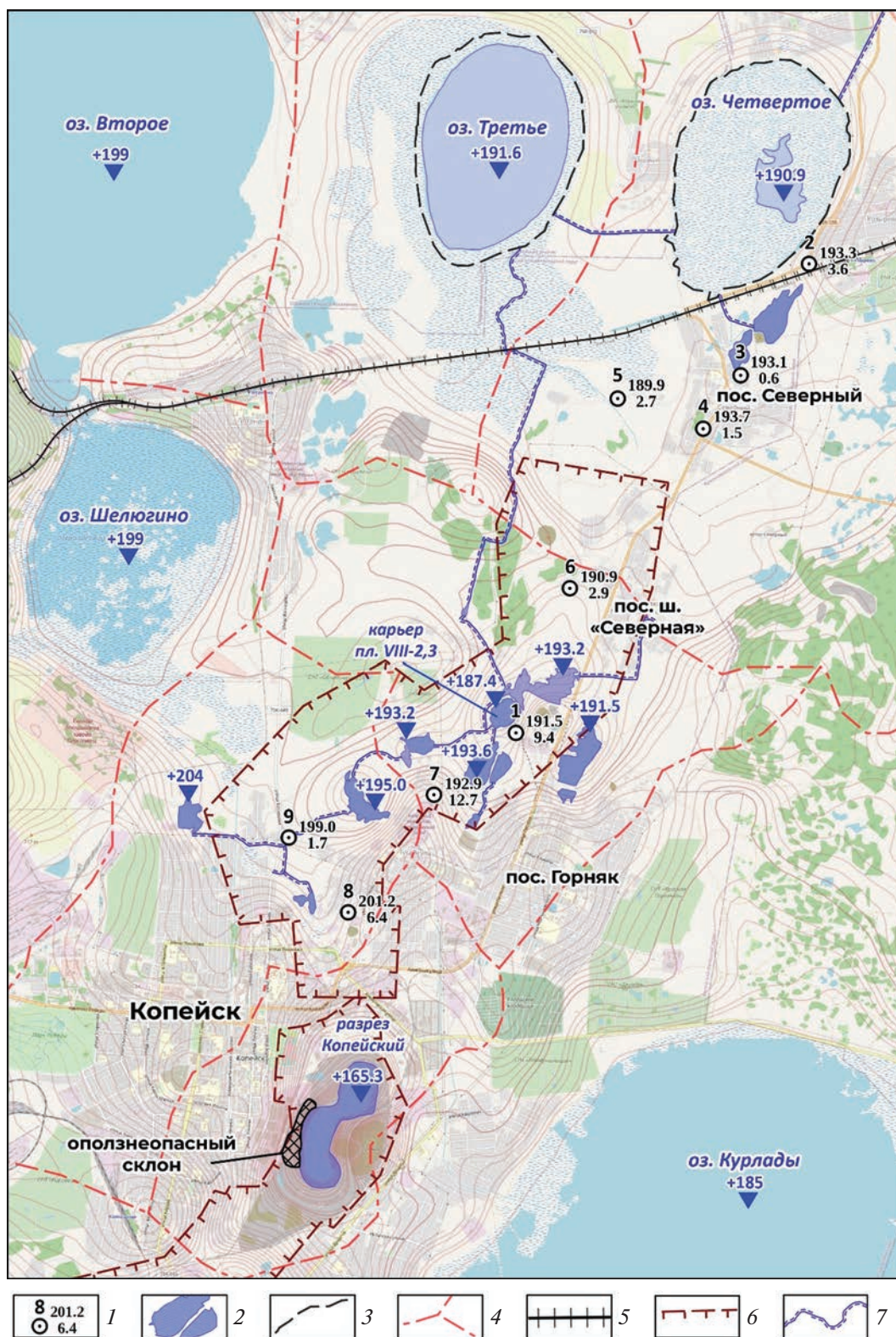


Рис. 2. Ситуационная схема и размещение техногенных объектов в районе ш. «Красная горнячка». 1 – наблюдательная скважина: сверху номер, справа: сверху абс. отм. уровня воды, внизу глубина до воды; 2 – затопленные карьеры и провалы; 3 – контур озер на 2003 г.; 4 – границы частных водосборов; 5 – железная дорога; 6 – граница горного отвода; 7 – дренажные каналы.

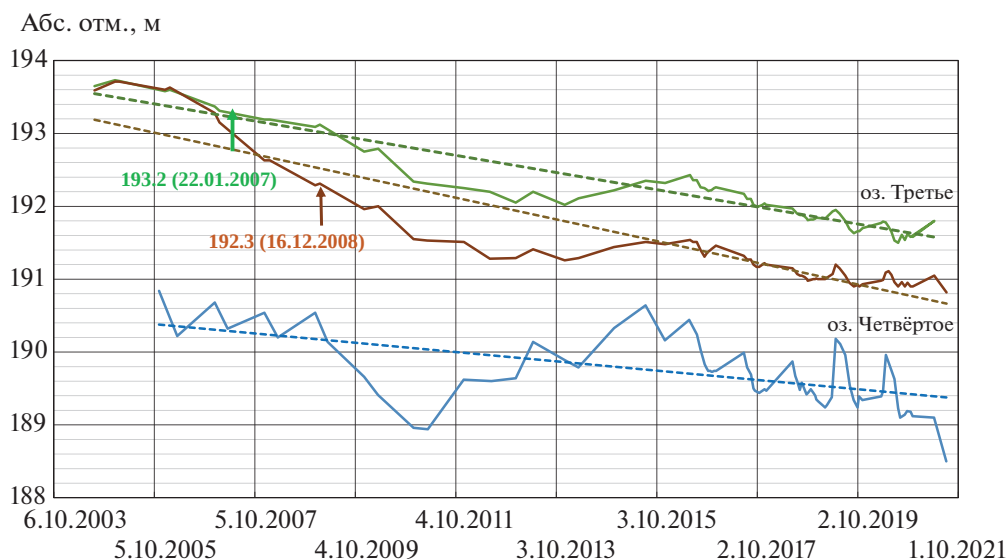


Рис. 3. Изменение уровней воды в озерах Третье, Четвёртое и в скв. № 5-гн.

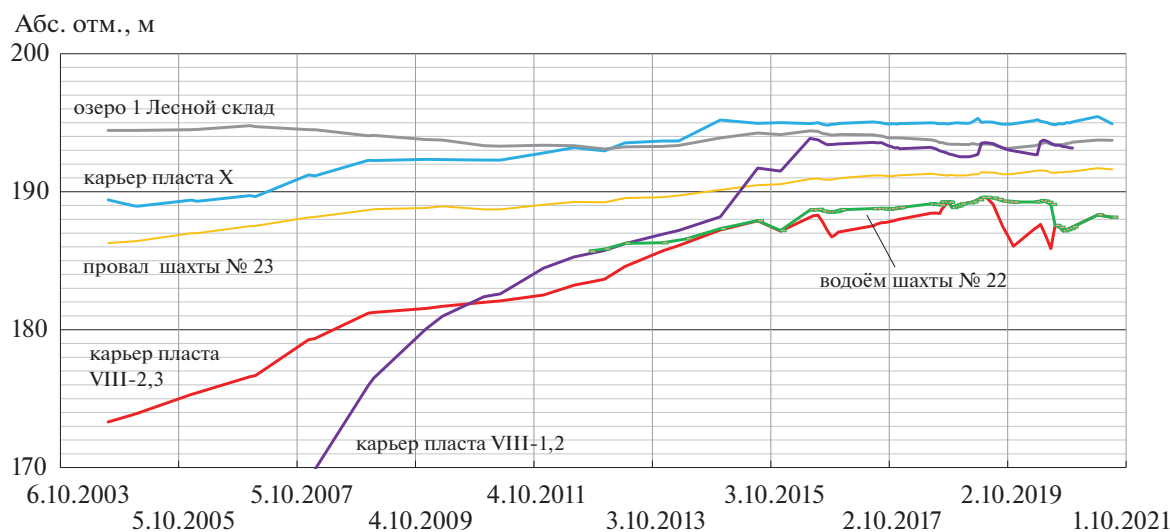


Рис. 4. Изменение уровней воды в карьерах и провалах.

щего уровня жидкости в выработке подтопленными оказались дома в поселке Горняк”^{2, 3}, хотя такие явления регулярно наблюдались и при работающих шахтах. Тогда в период снеготаяния и обильных осадков регулярно осуществлялась перекачка во-

² На ликвидацию подтопления в Копейске выделено 10 млн руб. 10.04.2019. <https://kr-gazeta.ru/obshchestvo/NalikvidatsiyupodtopleniyavKopeyskeydeleno10mlnrubley/>.

³ Челябинский актив Струкова угрожает работе завода с тысячами сотрудников. 09.03.2022. <https://pravdaurfo.ru/polnotekst/384028-chelyabinskij-aktiv-strukova-ugrozaet-rabote-zavoda-s-tysyachami-sotrudnikov-minekologii-rf-otkazalov-rekultivaczii-broshennyh-shaht/>.

ды в оз. Курлады, в настоящее время насосная установка не функционирует.

За период, прошедший после остановки шахтного водоотлива, количество и площадь заболоченных участков, формирующихся в естественных понижениях рельефа, не изменялись. Для предотвращения подтопления поселков в период снеготаяния и обильных осадков необходимо осуществлять откачку талых и дождевых вод из пониженных участков.

Разрез Копейский, шахта “Центральная”. Разрез Копейский затапливается с 2004 г., водоотлив из ш. “Центральная” прекращен в 2006 г. На за-

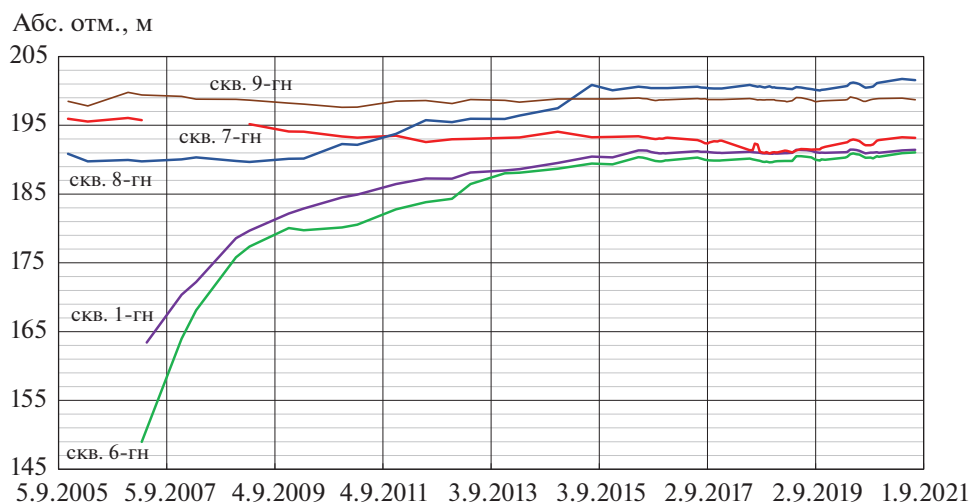


Рис. 5. Изменение уровней воды в скважинах в центральной (1-гн, 6-гн) и южной (7-гн, 8-гн, 9-гн) части шахтного поля “Красная горнячка”.

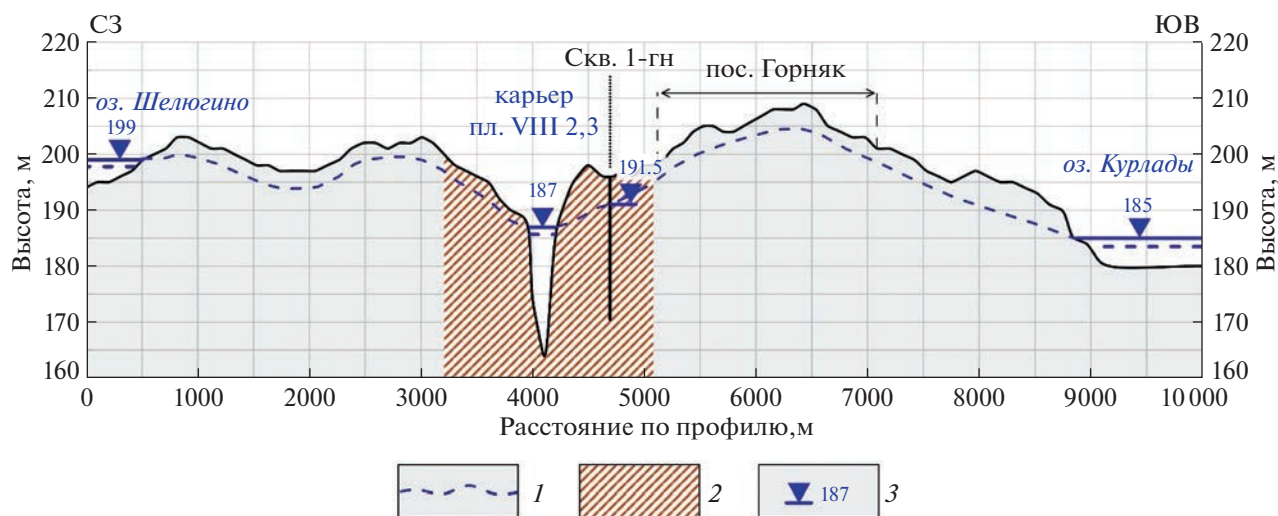


Рис. 6. Схематический разрез по линии оз. Шелюгино — оз. Курлады через озеро карьера пласта VIII-2, 3. 1 — уровень подземных вод; 2 — горный отвод ш. “Красная горнячка”; 3 — абсолютная отметка уровня воды.

падном борту разреза находятся промплощадка Копейского машиностроительного завода и селитебная территория г. Копейск. В процессе затопления на западном борту карьера произошло несколько оползней. После схода самого крупного оползня в 2015 г. дневная поверхность просела на 15 м вблизи территории Копейского машиностроительного завода. Весной 2019 г. откос оползневого участка был укреплен отсыпкой грунта. В настоящее время Уральский филиал ВНИМИ осуществляет геомеханический мониторинг; подвижки грунтовых реперов отсутствуют.

Подъем уровня воды в разрезе происходит значительно медленнее, чем на прибортовой полосе

и в стволе ш. “Центральная”, вследствие постоянного увеличения площади водного зеркала в формирующемся водоеме и за счет испарения, величина которого превышает в водном балансе величину выпадающих осадков.

Отметки дневной поверхности заводской территории повышаются от 203 м у бровки борта до 210 м. Глубина залегания уровня воды на середину 2021 г. варьировала от 15.8 до 20.7 м и устанавливалась на отметках 183.4–186.1 м. Подъем уровня подземных вод за период с апреля 2017 г. составил от 1.1 до 4.0 м. За этот же период уровень воды в карьере поднялся на 10.3 м от 158.5 м (12.07.2017) до 166.3 м (01.05.2021) (рис. 7). При этом в скв. № 2

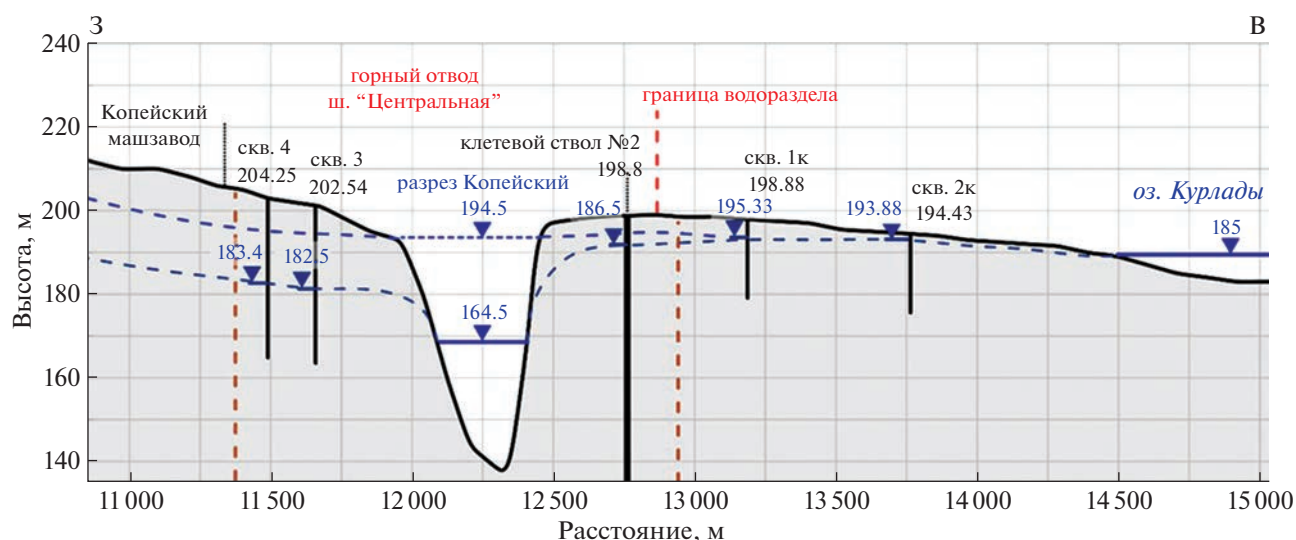


Рис. 7. Схематический разрез по линии Копейский машзавод – разрез Копейский – оз. Курлады.

уровень понизился на 1.0 м. Это произошло после остановки работы градири и прекращения утечек. Инфильтрация горячей воды, сбрасываемой на грунт, приводит к подтоплению территории и водонасыщению насыпной толщи на откосе борта, что может провоцировать дальнейшее развитие оползневых процессов. Необходимо полностью устранить утечки воды из водонесущих коммуникаций, прекратить сброс пароконденсата на оползневой участок.

Для оценки скорости затопления разреза Копейский была разработана геофильтрационная модель области его влияния. Границы модели определялись в соответствии с положением естественных водотоков и водоемов: на западе – оз. Смолино, на востоке – оз. Курлады, на севере – р. Миасс (см. рис. 1). Модель включала поля шахт “Красная горнячка”, “Центральная”, “Капитальная”, “Комсомольская”. Количество блоков по оси X 700, по оси Y 500, размер блока 50 × 50 м. Площадь модели 440 км². Численное фильтрационное моделирование выполнялось в программной среде Processing ModFlow 8 [23].

Модель двухпластовая: верхний пласт приурочен к наносам (эоцен-верхнемеловой водоносный горизонт), нижний к триас-юрским отложениям. Мощность первого пласта 50 м, второго 100 м. Коэффициенты фильтрации изменяются для верхнего пласта от 0.2 до 1 м/сут; для нижнего от 0.05 до 0.15 м/сут. Для корректного задания гипсометрии поверхности водоносных горизонтов использовалась цифровая модель рельефа. Величина модуля подземного стока принята равной 1.25 л/с с 1 км² на основании работ по оценке обеспеченности эксплуатационными запасами и ресурсами подземных вод населения Челябин-

ской области, обобщенных в дальнейшем для территории Уральского федерального округа и Российской Федерации [2].

Модель откалибрована по периоду отработки на момент стабильных шахтных водопритоков (решение в стационарной постановке). Для калибровки емкостных параметров, определяющих характер протекания нестационарного процесса затопления карьера, на модели был воспроизведен период затопления с 2010 по 2021 г.

Прогнозные задачи были направлены на оценку скорости затопления разреза “Копейский” при реализации 3 сценариев: 1) без проведения каких-либо мероприятий; 2) при проведении мероприятий по укреплению западного борта разреза (засыпка половины емкости разреза); 3) полная засыпка разреза (рис. 8а). Для определения влияния водности периода рассматривались 3 сценария (при условии засыпки половины емкости разреза): 1) 10 лет повышенной водности; 2) весь период затопления нормальной водности; 3) 10 лет низкой водности (рис. 8б).

Предельная величина затопления для всех сценариев одинаковая и составляет 194.5 м. Время затопления, отсчитываемое от 2021 г., составит 70 лет без проведения каких-либо мероприятий и 5 лет при полной засыпке разреза.

При проведении мероприятий по укреплению западного борта разреза (50% заполнения выработанного пространства) отметка воды в разрезе “Копейский” 194.5 м с вероятностью 70% будет достигнута через 25 лет. При сочетании неблагоприятных факторов (ряд лет высокой водности) эта отметка будет достигнута через 6 лет. В ситуации, если будет череда лет очень низкой водности

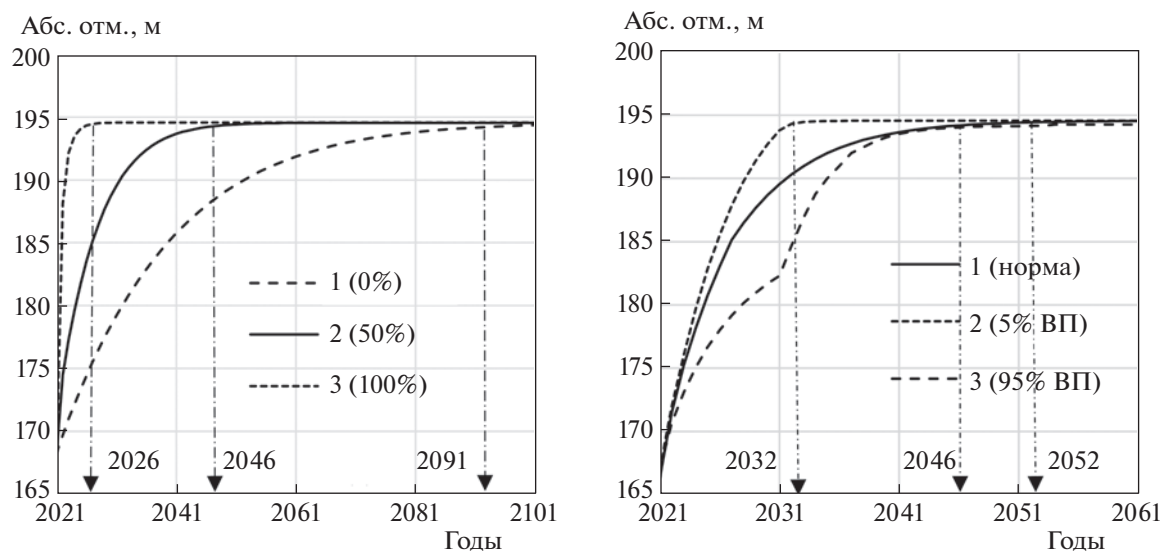


Рис. 8. Прогноз затопления Копейского разреза для разных сценариев, учитывающих: а — изменение степени заполнения выработанного пространства (1 — без засыпки, 2 — засыпка 50%, 3 — полная засыпка 100%); б — изменение водности (1 — нормальная водность, 2 — многоводный период 5% вероятность превышения (ВП) в течение 10 лет, 3 — маловодный период 95% ВП в течение 10 лет). Цифра у стрелки — год достижения предельной отметки.

(как, например, 2021 г.), затопление будет продолжаться 31 год.

Для исключения подтопления объектов поверхности на берегу оз. Курлады, расположенных на абсолютных отметках 193.0–195.0 м, необходимо поддержание уровня воды в затопленном разрезе не выше абсолютной отметки 190.0 м. Для этого необходимо откачивать порядка 1 млн м³ воды в год, реализовав следующие мероприятия: 1) оборудование плавучей насосной станции производительностью 220 м³/час в теплый период; 2) оборудование погружного водоотливного комплекса с производительностью 130 м³/час (для справки: расход водоотлива из шахты и разреза составлял 266 м³/час). Вода по напорному водоводу поднимается и следует до отстойника шахтных вод, использовавшегося при ведении добычных работ; сброс производится в дренажную канаву, идущую к оз. Курлады (в нее производился сброс шахтных вод при работающем водоотливе).

При условии ликвидации утечек из водонесущих коммуникаций и прекращении сброса воды на оползневой склон угрозы подтопления территории машзавода в настоящее время и в дальнейшей перспективе не существует [19].

Территория г. Копейск располагается на еще более высоких отметках, поэтому подтопление города никак не связано с затоплением разреза, а вызвано техногенными утечками из водонесущих коммуникаций. Общий объем подачи воды в Копейском городском поселении составляет 15.2 млн м³/год. Сетевые потери достигают 5.8 млн м³ (38%), что превышает суммарный водоотлив

шахт “Красная горнячка” и “Центральная”. Большой объем потерь воды вызван ветхостью сетей водоснабжения, износ которых больше 80% [21].

Шахты “Капитальная”, “Подозерная”, “Комсомольская”. К настоящему времени заполнение депрессионной воронки от шахтного водоотлива шахт “Капитальная”, “Подозерная”, “Комсомольская” практически завершилось. Новые участки подтопления за последние годы не обнаружены. В настоящее время и в дальнейшей перспективе подтопление территории поселков Бажово и Зуевка в результате прекращения шахтного водоотлива маловероятно. Организация водоотлива и проведение специальных мероприятий на площади горного отвода шахт “Капитальная”, “Подозерная” не требуется.

В южной части шахтного поля ш. “Комсомольская” проходит автомобильная дорога Бажово-Старокамышинск, в 300 м южнее которой расположен карьер шахты 45. Рельеф территории имеет наклон от карьера в сторону дороги. Отметка поверхности воды в карьере превышает высотную отметку поверхности дорожного покрытия автомобильной дороги. Для обеспечения безопасной эксплуатации автомобильной дороги необходимо проложить дренажные канавы, соединяющие затопленные карьеры и понижения, и организовать спуск воды из карьера в существующую дренажную канаву и далее в оз. Курлады. При сезонной работе водоотлива в теплый период его производительность должна быть 68 м³/час.

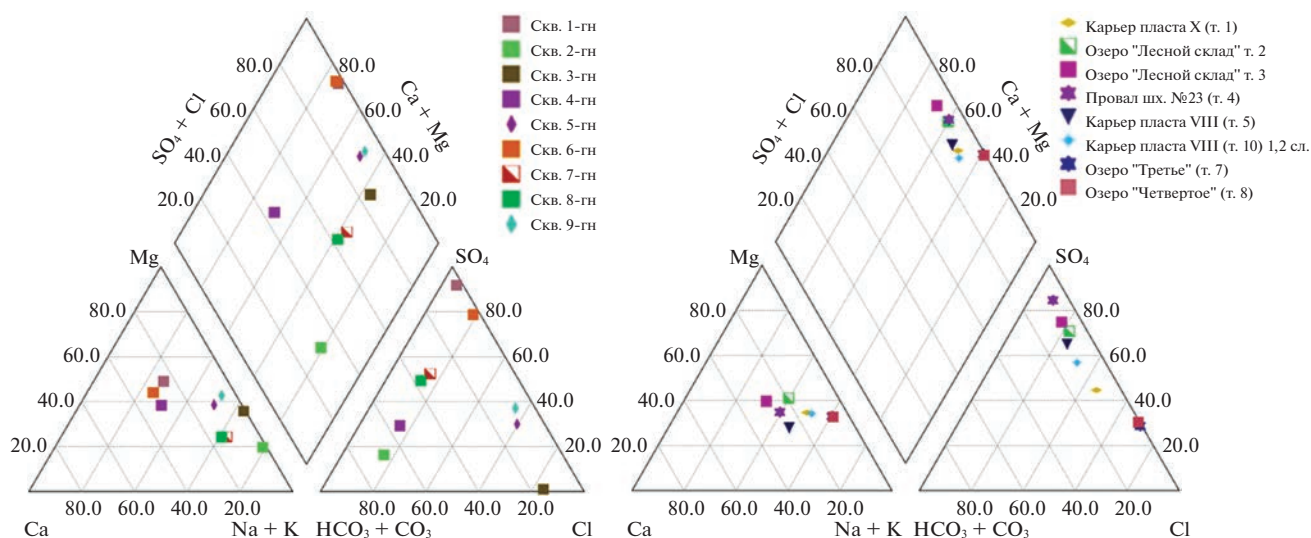


Рис. 9. Диаграмма Пайпера – состав подземных вод (а) и вод озер и затопленных карьеров (б).

Шахты “Октябрьская” и “Калачевская”. К настоящему времени заполнение депрессионной воронки от шахтного водоотлива ш. “Октябрьская” и “Калачевская” завершилось. Новые участки подтопления за последние годы не обнаружены, подтопление территории поселков Октябрьский и Роза маловероятно. Организация водоотлива и проведение специальных мероприятий не требуются.

Разрез Коркинский. Коркинский разрез – самый глубокий угольный разрез в Евразии, его глубина 493 м, длина по поверхности более 3 км, ширина свыше 2.5 км. За время разработки карьера в течение 70 лет было извлечено около 250 млн т угля и 1.5 млрд т грунта, объем выработки около 3 млрд м³. Разрез прекратил свою работу 20.11.2017 г. (эксплуатация началась в 1934 г.). Кроме открытых работ на Коркинском месторождении велись и подземные работы на ш. “Коркинская”. На 2005 г. промышленные запасы угля до глубины 630 м составляли 33 млн т, что могло обеспечить работой разрез на 23 года. Для этого надо было провести разнос бортов разреза, переселить жителей, перенести промплощадку и Коркинский экскаваторно-вагоноремонтный завод. Но активизировалось сдвижение бортов разреза (первый крупный оползень на северо-западном борту произошел в 1945 г.), стволы ш. “Коркинская” были признаны аварийными, начали разрушаться здания. Было принято решение о поэтапном закрытии разреза и переселении части жителей пос. Роза и г. Коркино. В бортах разреза регулярно фиксировались эндогенные пожары, что влияло не только на экологию г. Коркино, но и весь регион, включая г. Челябинск, страдал во время

попутных ветров от смога и едкого запаха горелого.

Для реализации проекта рекультивации Коркинского разреза создано ООО “Промрекультивация” (учредитель АО “Томинский ГОК”, входящее в группу Русской медной компании). Проект предусматривает заполнение горной выработки и ликвидацию зон самовозгорания закладочным материалом на основе хвостов обоганительной фабрики Томинского ГОКа, которые доставляются в разрез по трубопроводу протяженностью около 14 км [20]. За 5 лет было локализовано 556 тыс. м² зон самовозгорания. В результате выбросы снизились в 26 раз: с 950 т в 2017 г. до 36 т в 2021 г.⁴

Заполнение отработанной выработки закладочным материалом планируется завершить к 2045 г. К этому времени при отметке уровня воды +155 м в разрезе будет находиться 479 млн м³ закладочной смеси и 212 млн м³ воды⁵. Отметка затопления Коркинского разреза составит не более +210 м (судя по расположенной северо-западнее ш. “Калачевская”). При водопитоках подземных вод около 200 м³/час (см. табл. 1) время затопления разреза от отметки +155 м (площадь водной поверхности 4.7 км²) до отметки +220 м (площадь 7.4 км²) составит не менее 200 лет.

⁴ Выбросы на Коркинском угольном разрезе сократились в 26 раз. 10.11.2022 г. https://dostup1.ru/economics/Vybrosty-na-Korkinskom-ugolnom-razreze-sokratilis-v-26-raz_155972.html.

⁵ Проект ликвидации Коркинского угольного разреза. 27.11.2018. <https://www.youtube.com/@RussianCopperCompany>.

Состояние барьерных целиков и гидроизоляция перемычек между шахтами

Между горными выработками шахт “Красная горнячка” (№ 20) и “Центральная” (7/8 и 4/6) существует гидравлическая взаимосвязь по пласту XI. В период работы шахты № 20 в сторону шахты “Центральная” отмечался незначительный (до 50 м³/час) переток воды через старые горные выработки шахты № 7/8. В настоящее время горные выработки по пласту XI шахты № 7/8 затоплены до отн. 183.5 м. Отметка затопления шахты № 20 выше — 190 м, соответственно, со стороны шахты № 20 возможны перетоки воды в сторону ш. “Центральная” через старые горные выработки шахты № 7/8.

С поля ш. “Центральная” через барьерный целик в районе Северо-Камышинского нарушения возможно незначительное поступление воды на ш. “Капитальная”.

С ш. “Капитальная” на ш. “Комсомольская” через прорезку целика Ж-3 возможно незначительное по величине поступление воды. На ш. “Комсомольская” возможны незначительные по величине водопитоки и с ш. “Подозерная” через междушахтный целик.

В настоящее время достигнутые отметки затопления по всей площади шахтных полей от ш. “Красная горнячка” до ш. “Комсомольская” составляют около 195 м. Прогнозная отметка затопления разреза Копейский 194.5 м.

Шахтные поля ш. “Октябрьская” и ш. “Калачевская” не “сбиты” между собой, расположены в другой площади водосбора, находятся на более высоких гипсометрических отметках и имеют уровень затопления 210 м.

Прогноз развития гидрогеохимической ситуации

На основании анализа трендов изменения минерализации и компонентного состава подземных вод в пределах горных отводов можно сделать вывод о постепенной стабилизации химического состава: максимальные значения минерализации подземных вод не превысят 3.0–3.7 г/дм³, сульфат-иона — 1.5–2.0 г/дм³, общей жесткости — 30 мг-экв/дм³ (рис. 9а). В поверхностных водах затопленных провалов, карьеров и разрезов ожидаемые значения показателей составят: минерализация 3.2–4.8 г/дм³, концентрация сульфат-иона 1.3–3.0 г/дм³, хлорид-иона до 0.5 г/дм³ (рис. 9б). Воды останутся очень жесткими (до 40 мг-экв/дм³), нейтральными или слабощелочными.

Наиболее сложная гидрохимическая ситуация сложилась в озерах Третье и Четвертое, питание которых осуществлялось за счет шахтного водоотлива. Воды озер характеризуются очень высо-

кой минерализацией (до 50 г/дм³), тип вод — хлоридный натриевый. Прослеживаются достаточно ясные тенденции увеличения минерализации, содержания сульфатов, хлоридов, натрия, магния, бора, лития, а в оз. Четвертое также увеличения содержания свинца, бария, алюминия, железа и ряда других микрокомпонентов. При дальнейшем испарении будет продолжаться концентрирование вод, сопровождаемое осаждением солей.

За длительный период эксплуатации питьевых водозаборов подземных вод не отмечено существенных изменений химического состава подземных вод, что свидетельствует об отсутствии влияния шахтных вод ликвидированных шахт.

Влияние затопления “Коркинского” разреза на подземные воды водозаборов также не прогнозируется. Прогнозное положение уровня воды в техногенном водоеме разреза после завершения его рекультивации в ближайшие три столетия будет находиться на отметках не выше +210 м, а вокруг разреза будет сохраняться депрессионная воронка. Это полностью исключает поступление воды из техногенного водоема “Коркинского” разреза в водоносные горизонты и ее подтягивание к подземным водозаборам.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Для предотвращения заболачивания северной части г. Копейск и поселков в начале 2000-х годов построена уникальная система водоотведения, не имеющая аналогов в России. Через насосную станцию и 20-километровую систему канав и отстойников вода, которая скапливается на территориях, нарушенных горными выработками, откачивается в р. Миасс. При надлежащем обслуживании дренажной системы и поддержании уровня воды в озере карьера пласта VIII-2,3 на уровне 180 м (в соответствии с проектом ликвидации ш. “Красная горнячка”) риск развития подтопления в результате прекращения водоотлива отсутствует.

2. Разрез “Копейский” до предельной отметки +194.5 м будет затопливаться до 2091 г. Для исключения подтопления объектов на его восточном борту целесообразно предусмотреть поддержание уровня воды в затопленном разрезе не выше абсолютной отметки 190.0 м. Горнопромышленная деятельность явилась не единственной и, более того, не основной причиной развития негативных гидрогеологических процессов подтопления на прилегающей территории и обводнения оползневого склона. При условии ликвидации утечек и прекращении сброса воды на оползневой склон угроза подтопления территории Копейского машинного завода маловероятна. Территория г. Копейск располагается на еще более высоких отметках, поэтому подтопление города

никак не связано с затоплением разреза, а вызвано техногенными утечками из водонесущих коммуникаций.

3. Рекультивация крупнейшего в Евразии “Коркинского” разреза осуществляется путем заполнения горной выработки закладочным материалом на основе хвостов обогатительной фабрики Томинского ГОКа, которые доставляются в разрез по трубопроводу. Заполнение отработанной выработки закладочным материалом планируется завершить к 2045 г. при отметке уровня воды +155 м. Окончательное затопление до отметки +210 м произойдет не раньше 2250 г.

4. Выявлены закономерности техногенного преобразования химического состава подземных и поверхностных вод после закрытия шахт. В подземных водах установлена стабилизация химического состава по наиболее значимым загрязняющим компонентам. В поверхностных водах выявлена дифференциация направленности процесса изменения химсостава: в техногенных водоемах в пределах бышей депрессионной воронки отмечена стабилизация на уровне регионального фона, в водоемах искусственного и смешенного генезиса прогнозируется ухудшение химического состава за счет испарительного концентрирования.

5. В результате всестороннего изучения и анализа гидрогеоэкологической ситуации на территории Челябинского угольного бассейна на качественном и частично на количественном уровнях выявлен вклад природной и техногенной составляющих в формирование экзогенных геологических процессов на городской территории. Доказано, что причиной подтопления городской территории является геолого-геоморфологическое строение территории, выражающееся в наличии озер естественного происхождения и слабой дренированности территории.

6. Сочетание особенностей геологического строения с геоморфологическими условиями, гидрометеорологическими факторами и способом отработки приводит к формированию новых гидрогеоэкологических условий на постэксплуатационном этапе, продолжительность которого составляет десятки и даже сотни лет: с одной стороны, это образование техногенных водоемов, подтопление территорий и развитие оползневых процессов вследствие заполнения депрессионной воронки; с другой — высыхание озер, существовавших за счет шахтного водоотлива, и радикальное ухудшение качества воды в них.

Разделы статьи, связанные с методикой геофильтрационного моделирования, подготовлены в рамках выполнения государственного задания ИГД УрО РАН № 075-00412-22 ПР. Тема 2 (2022–2024) “Разработка геоинформационных технологий оценки защищенности горнопромышленных территорий и прогноза развития негативных процес-

сов в недропользовании” (FUWE-2022-0002) г. р. № 1021062010532-7-1.5.1 и при финансовой поддержке гранта ИАС РНФ “Проведение фундаментальных научных исследований и поисковых научных исследований малыми отдельными научными группами” (тема № 22-27-20140).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барсуков И.В., Морин С.В. Экологические последствия затопления горных выработок на угольных месторождениях Урала // Изв. Вузов. Горный журнал. 2007. № 3. С. 64–71.
2. Боровский Б.В., Хачиян Т.П., Язвин А.Л. и др. Карта ресурсного потенциала пресных подземных вод России. Масштаб 1: 5 000 000. М.: ЗАО “ГИДЭК”, 2012.
3. Гидрогеология СССР. Т. XIV. Урал. Уральское территориальное геологическое управление. Редактор В.Ф. Прейс. М.: Недра, 1972. 648 с.
4. Гуман О.М., Петрова И.Г., Лапин С.Э. Особенности экологического мониторинга вблизи угольных шахт (на примере шахты “Центральная” Копейского района Челябинского угольного бассейна) // Геология и геофизика. 2001. № 13. С. 223–227.
5. Имайкин А.К., Имайкин К.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений. Пермь: ПГНИУ, 2013. 112 с.
6. Лангольф Э.Л., Лудзиш В.С., Лазаревич Т.И., Поляков А.Н. Актуальные проблемы освоения площадей горных отводов после затопления шахт Кузбасса // Маркшейдерский вестник. 2007. № 4. С. 45–48.
7. Методические указания по оценке гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт, обоснованию мероприятий по управлению режимом подземных вод и обеспечению экологической безопасности. М.: ИПКОН РАН, 1997. 24 с.
8. Методическое руководство по проектированию горно-экологического мониторинга при ликвидации шахт угольной отрасли РФ. М.: МЭ РФ, 2001. 79 с.
9. Моисеенков А.В. ФГБУ “ГУРШ” — двадцать лет спустя // Уголь. 2018. № 2. С. 36–39.
10. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х томах. Т. 3 (книга 1). Прикладные исследования. М.: МГГУ, 1999. 313 с.
11. Мироненко В.А., Румынин В.Г. Проблемы гидрогеоэкологии. В 3-х томах. Т. 3 (книга 2). Прикладные исследования. М.: МГГУ, 1999. 504 с.
12. Морин С.В., Барсуков И.В. Вопросы оценки сдвижений и деформаций земной поверхности на ранее подработанных территориях угольных шахт // Сб. науч. тр. ВНИМИ. СПб. 2012. С. 237–245.
13. Норватов Ю.А., Петрова И.Б. Методическое руководство по прогнозу гидрогеологических условий ликвидации угольных шахт и обоснованию мероприятий, обеспечивающих предотвращение негативных экологических последствий. СПб.: ВНИМИ, 2008. 79 с.
14. Об экологических последствиях выполнения комплекса мероприятий по завершению реструктуризации угольной промышленности Восточного Донбасса на 2006–2010 годы. URL:

- <http://www.donland.ru/Default.aspx?pageid=88038> (дата обращения: 12.12.2022).
15. Отраслевая инструкция о порядке ликвидации и консервации предприятий по добыче угля (сланца). М.: Минтопэнерго. 1997. 16 с.
 16. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Гидрогеологические исследования в горном деле на постэксплуатационном этапе // *Геоэкология*. 2018. № 4. С. 25–39.
 17. Рыбникова Л.С., Рыбников П.А. Закономерности формирования качества подземных вод на отработанных медноколчеданных рудниках Левихинского рудного поля (Средний Урал, Россия) // *Геохимия*. 2019. Т. 64. № 3. С. 282–299.
 18. Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., Максимович Н.Г., Деменев А.Д. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Россия) // *ГИАБ*. 2020. № 3.1. С. 488–500.
 19. СП 104.13330.2016. Инженерная защита территории от затопления и подтопления. Актуализированная редакция СНиП 2.06.15–85.
 20. Соколовский А.В., Лапаев В.Н., Темникова М.С., Гордеев А.И. Технологические особенности ликвидации разреза “Коркинский” // *Уголь*. 2018. № 3 (1104). С. 91–95.
 21. Схема водоснабжения и водоотведения муниципального образования “Копейский городской округ” Челябинской области до 2038 года. Копейск, 2018. 393 с. URL: <http://www.akgo74.ru>
 22. Элементы и аспекты постэксплуатационного периода горных предприятий / К. Мельхерс К., Кречманн Ю., Гёрке-Маллет П., Кляйнеберг К., Тюленев М. // *Вестник Кузбасского государственного технического университета*. 2015. № 6 (112). С. 3–13.
 23. Anderson M.P., Woessner W.W. and Hunt R.J. Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport. Academic Press; Second Edition. 2015. 564 p.
 24. Global Acid Rock Drainage Guide. The International Network for Acid Prevention (INAP). 2014. 473 p.
 25. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia) // *Mine Water and the Environment*. 2020. P. 464–472.
 26. Wolkersdorfer C. Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment. Springer, 2008. 465 p.
 27. Younger P.L., Jenkins D.A., Rees B., Robinson J. et al. Mine waters in Wales: pollution, risk management and remediation. Urban geology in Wales. National Museums and Galleries of Wales Geological Series. 2004. № 23. P. 138–154.

FORMATION OF HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE CHELYABINSK COAL BASIN AT THE POST-OPERATIONAL STAGE

L. S. Rybnikova^{a, #}, P. A. Rybnikov^{a, ##}, A. Yu. Smirnov^{a, ###}, I. V. Galitskaya^{b, ####},
G. I. Batrak^{b, c, #####}, O. V. Lysenko^{c, #####}, and V. S. Ponomarev^{c, #####}

^a*Institute of Mining, Ural Branch RAS,
ul. Mamina-Sibiryaka 58, Yekaterinburg, 620075 Russia*

^b*Sergeev Institute of Environmental Geoscience RAS,
Ulansky per., 13, str. 2, Moscow, 101000 Russia*

^c*Federal State Budgetary Institution for Reorganization and Liquidation of Unprofitable Mines and Quarries;
Ogorodny proezd, 5/6, Moscow, 127254 Russia*

[#]*E-mail: luserib@mail.ru*

^{##}*E-mail: ribnikoff@yandex.ru*

^{###}*E-mail: alexsm94@gmail.com*

^{####}*E-mail: galgeoenv@mail.ru*

^{#####}*E-mail: gib74@mail.ru*

^{#####}*E-mail: lov@gursh.ru*

^{#####}*E-mail: pvs@gursh.ru*

Completion of the development of mineral deposits requires the development of new methods for managing areas disturbed by mining. The closure of mining facilities, especially those with a long history of mining forms a difficult environmental situation. This is determined by several factors. The development of deposits is accompanied by drainage measures changing the balance and structure of surface and groundwater flows, and new chemical agents are involved in the formation of the qualitative composition of the hydrosphere. The use of mined-out space during the development of schemes with roof collapse induces geomechanical processes forming the zones of collapse and displacement accompanied by disturbances of the Earth's surface. The cessation of mine operation means the stop of drainage, which leads to the gradual filling of the depression funnel, the formation of flooding areas and mine water outlets to the surface. Unstable rocks in the quarry sides, on which there were landslides even during drainage, become especially dangerous areas when the water level rises. Taking in consideration that residential and industrial buildings are often historically located in close proximity to mines (sometimes even within the mining allotment), the hydrogeoeological problems of old industrial areas at the post-operational stage become very acute. At the same time, in many cases it is

difficult to determine, which factors, natural (features of the geological structure, geomorphological conditions, water content of the period) or technogenic (cessation of drainage) are responsible for territory flooding, especially in the areas distant from the objects of completed mining. This gives rise to numerous speculations and leads to irrational technical solutions. By the example of the Chelyabinsk coal basin, the ecological and hydrogeological problems are considered that arise after mining completion and drainage termination. The measures for reducing their negative impact on the hydrogeoecological conditions of the territory are proposed.

Keywords: hydrogeological conditions, geoecological problems, dewatering, drainage, flooding, water-table uprising, coal deposits, landslide, leaks, water-bearing communications, hollow-hummocky relief

REFERENCES

1. Barsukov, I.V., Morin, S.V. *Ekologicheskie posledstviya zatopeniya gornyykh vyrabotok na ugol'nykh mestorozhdeniyakh Urala* [Ecological consequences of flooding of mine workings in the coal deposits of the Urals]. *Izvestiya vuzov. Gornyi zhurnal*, 2007, no. 3, pp. 64–71. (in Russian).
2. Borevskii, B.V., Khachiyan, T.P., Yazvin, A.L. *Karta resursnogo potentsiala presnykh podzemnykh vod Rossii. Masshtab 1: 5000000* [Map of the resource potential of fresh underground waters in Russia. Scale 1: 5000000]. Moscow, ZAO "GIDEK", 2012.
3. *Gidrogeologiya SSSR. T. XIV. Ural* [Hydrogeology of the USSR. Vol. XIV. Urals]. V.F. Preis, Ed. Moscow, Nedra Publ., 1972, 648 p. (in Russian).
4. Guman, O.M., Petrova, I.G., Lapin, S.E. *Osobennosti ekologicheskogo monitoringa vblizi ugol'nykh shakht (na primere shakhty "Tsentral'naya" Kopeiskogo raiona Chelyabinskogo ugol'nogo basseina)* [Peculiarities of environmental monitoring near coal mines (by the example of "Tsentral'naya" mine in the Kopeysky district of the Chelyabinsk coal basin)]. *Geologiya i Geofizika*, 2001, no. 13, pp. 223–227. (in Russian)
5. Imaikin, A.K., Imaikin, K.K. *Gidrogeologicheskie usloviya Kizelovskogo ugol'nogo basseina vo vremya i posle okonchaniya ego ekspluatatsii, prognoz ikh izmenenii* [Hydrogeological conditions of the Kizelovsky coal basin during and after the end of its operation, forecast of their changes]. Perm, PGNIU, 2013, 112 p. (in Russian)]
6. Langolf, E.L., Ludzish, V.S., Lazarevich, T.I., Polyakov, A.N. *Aktual'nye problemy osvoeniya ploshchadei gornyykh otvodov posle zatopeniya shakht Kuzbassa* [Actual problems of development of mining allotments after flooding of Kuzbass mines]. *Marksheiderskii vestnik*, 2007, no. 4, pp. 45–48. (in Russian)
7. *Metodicheskie ukazaniya po otsenke gidrogeologicheskikh uslovii likvidatsii ugol'nykh shakht, obosnovaniyu merorpiyatii po upravleniyu rezhimom podzemnykh vod i obespecheniyu ekologicheskoi bezopasnosti* [Guidelines for the assessment of hydrogeological conditions for the liquidation of coal mines, the rationale for measures to manage the groundwater regime and ensure environmental safety]. Moscow, IPKON RAN, 1997, 24 p. (in Russian)]
8. *Metodicheskoe rukovodstvo po proektirovaniyu gorno-ekologicheskogo monitoringa pri likvidatsii shakht ugol'noi otrasli RF* [Guidelines for the design of mining and environmental monitoring during the liquidation of mines in the coal industry of the Russian Federation]. Moscow, Ministry of Energy of the Russian Federation, 2001, 79 p. (in Russian)]
9. Moiseenkov, A.V. *FGBU "GURSH" - dvadtsat' let spustya* [State institution for the reorganization and liquidation of unprofitable mines and open-casts - twenty years later]. *Coal*, 2018, no. 2, pp. 36–39. (in Russian)]
10. Mironenko, V.A., Rumynin, V.G. *Problemy gidrogeologii* [Problems of hydrogeoecology]. Vol. 3 (book 1). Applied research. Moscow, MGGU Publ., 1999, 313 p. (in Russian)
11. Mironenko, V.A., Rumynin, V.G. *Problemy gidrogeologii* [Problems of hydrogeoecology]. Vol. 3 (book 2). Applied research. Moscow, MGGU Publ., 1999, 504 p. (in Russian)
12. Morin, S.V., Barsukov, I.V. *Voprosy otsenki sdvizenii i deformatsii zemnoi poverkhnosti na ranee podrabotannykh territoriyakh ugol'nykh shakht* [Issues of assessing displacements and deformations of the Earth's surface in previously undermined areas of coal mines]. Collection of scientific papers VNIMI. St. Petersburg, 2012, pp. 237–245. (in Russian)
13. Norvatov, Yu.A., Petrova, I.B. *Metodicheskoe rukovodstvo po prognozu gidrogeologicheskikh uslovii likvidatsii ugol'nykh shakht i obosnovaniyu meropriyatii, obespechivayushchikh predotvrashchenie negativnykh ekologicheskikh posledstviy* [Methodological guidance on the forecast of hydrogeological conditions for the liquidation of coal mines and the rationale for measures to prevent negative environmental consequences]. St. Petersburg, VNIMI Publ., 2008, 79 p. (in Russian).
14. *Ob ekologicheskikh posledstviyakh vypolneniya kompleksa merorpiyatii po zaversheniyu restrukturalizatsii ugol'noi promyshlennosti Vostochnogo Donbassa na 2006–2010 gody* [On the environmental consequences of the implementation of a set of measures to complete the restructuring of the coal industry in the Eastern Donbass for 2006–2010]. URL: <http://www.donland.ru/Default.aspx?pageid=88038> (date of access: 12/12/2022). (in Russian).
15. *Otraslevaya instruktsiya o poriadke likvidatsii i konservatsii predpriyatii po dobyche uglya (slantsa)* [Instructions on the procedure for the liquidation and conservation of enterprises for the extraction of coal (shale)]. Moscow, Mintopenergo, 1997, 16 p. (in Russian).
16. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. *Gidrogeologicheskie issledovaniya v gornom dele na postekspluatatsionnom etape* [Hydrogeological research in mining at the post-operational stage]. *Geoekologiya*, 2018, no. 4, pp. 25–39. (in Russian)

17. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. *Zakonomernosti formirovaniya kachestva podzemnykh vod na otrabotannykh mednokolchedannykh rudnikakh Levikhinskogo rudnogo polya (Srednii Ural, Rossiya)* [Regularities in the evolution of groundwater quality at abandoned copper sulfide mines at the Levikha ore field, Central Urals, Russia]. *Geokhimiya*, 2019, vol. 64, no. 3, pp. 282–299. (in Russian)
18. Rybnikov, P.A., Rybnikova, L.S., Maksimovich, N.G., Demenev, A.D. *Issledovanie gidrogeologicheskikh uslovii ugol'nykh mestorozhdenii na postekspluatatsionnom etape s ispol'zovaniem gidrodinamicheskogo modelirovaniya (na primere Kizelovskogo ugol'nogo basseina, Zapadnyi Ural, Rossiya)* [Study of the hydrogeological conditions of coal deposits at the post-operational stage using hydrodynamic modeling (on the example of the Kizel coal basin, Western Urals, Russia)]. *GIAB*, 2020, no. 3.1, pp. 488–500. <https://doi.org/10.25018/0236-1493-2020-31-0-488-500> (in Russian)
19. *SP 104.13330.2016. Inzhenernaya zashchita territorii ot zatopleniya i podtopleniya* [Set of Rules 104.13330.2016. Engineering protection of the territory from flooding and flooding. Updated version of Building regulations No. 2.06.15–85]. (in Russian)
20. Sokolovskii, A.V., Lapaev, V.N., Temnikova, M.S., Gordeev, A.I. *Tekhnologicheskie osobennosti likvidatsii razreza "Korkinskii"* [Technological features of the liquidation of the Korkinsky open pit mine]. *Ugol'*, 2018, no. 3 (1104), pp. 91–95. (in Russian)
21. *Skhema vodosnabzheniya i vodootvedeniya munitsipal'nogo obrazovaniya "Kopeiskii gorodskoi okrug" Chelyabinskoi oblasti do 2038 goda* [Pattern of water supply and sanitation of the Kopeiski municipal district, Chelyabinsk region, until 2038]. Kopeisk, 2018, 393 p. (in Russian)
22. *Elementy i aspekty postekspluatatsionnogo perioda gornykh predpriyatii* [Elements and aspects of the post-operational period of mining enterprises] / Tyulenev M.A., Melkhers K., Krechman Yu., Gerke-Malette P., Kleineberg K. *Vestnik Kuzbasskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta*, 2015, no. 6 (112), pp. 3–13. (in Russian)
23. Anderson, M.P., Woessner, W.W. and Hunt, R.J. *Applied Groundwater Modeling Simulation of Flow and Advective Transport*. Academic Press; Second Edition, 2015, 564 p.
24. *Global Acid Rock Drainage Guide. The International Network for Acid Prevention (INAP)*, 2014, 473 p.
25. Rybnikova, L.S., Rybnikov, P.A. *Pit Lake and Drinking Water Intake: Example of Coexistence (Middle Urals, Russia)* // *Mine Water and the Environment*, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10230-020-00691-w>. 464–472.
26. Wolkersdorfer, C. *Water management at abandoned flooded underground mines. Fundamentals. Tracer tests. Modelling. Water treatment*. Springer, 2008, 465 p.
27. Younger, P.L., Jenkins, D.A., Rees, B., Robinson J., et al. *Mine waters in Wales: pollution, risk management and remediation. Urban geology in Wales. National Museums and Galleries of Wales Geological Series*, 2004, no. 23, pp. 138–154.