

УДК 556.3.04

## ИЗМЕНЕНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ ШУМИХИНСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ УГЛЯ (ПРЕДУРАЛЬЕ) ПОД ВЛИЯНИЕМ ПОДЗЕМНЫХ ГОРНЫХ РАБОТ

Имайкин Александр Камильевич<sup>1</sup>,  
imaykin@mail.ru

Имайкин Камиль Касимович<sup>1</sup>,  
imaykin@mail.ru

<sup>1</sup> Пермский государственный национальный исследовательский университет,  
Россия, 614068, г. Пермь, ул. Генкеля, 4.

**Актуальность.** Выявлены и рассмотрены большие изменения гидрогеологических условий Шумихинского месторождения угля во время работы и после ликвидации шахты. Установлено загрязнение подземных и поверхностных вод со стороны техногенного горизонта кислых шахтных вод и кислыми подотвальными водами, определены сроки окончания затопления шахты и объемы излива шахтных вод на поверхность. Работа будет полезна при разработке природоохранных мероприятий.

**Цель:** изучение гидродинамического режима подземных и шахтных вод во время работы и после ликвидации шахты; исследование химического состава шахтных вод, подотвальных вод и загрязненных подземных вод.

**Методы:** изучение опубликованных источников, анализ фондовых геологических материалов, данных гидрогеологического мониторинга, полевые работы, выполненные авторами на шахтном поле, работа с планами горных работ.

**Результаты.** Построен гидрогеологический разрез Шумихинского месторождения угля, отражающий гидрогеологические условия на момент максимального развития горных работ и спустя 20 лет после их прекращения. Построены совмещенные графики изменения уровней подземных и шахтных вод, а также притоков шахтных вод. Выявлены причины и характер изменения гидрогеологических условий в районе шахтного поля, сделан прогноз их изменения.

**Выводы.** Горные работы шахты «Шумихинская» оказали большое негативное влияние на гидрогеологические условия Шумихинского месторождения. Ликвидация шахты не привела к полному восстановлению гидродинамического режима подземных вод, вызвала образование техногенного горизонта шахтных вод и усиление загрязнения подземных вод. При сохранении скорости подъема шахтных вод ожидается начало их излива на поверхность через шурф 19 в 2026 г.

### Ключевые слова:

Кизеловский угольный бассейн, Шумихинское месторождение, подземные воды, шахтные воды, подотвальные воды, гидрогеологический прогноз.

### Введение

Статья основана на данных гидрогеологического мониторинга, проводимого Уральским центром (далее – фонд социально-экологического мониторинга углепромышленных территорий), и фондовых геологических материалах по Шумихинскому месторождению. В работе использованы также данные, полученные авторами в результате исследований района поля шахты «Шумихинская» в августе 2016 г.

Шумихинское месторождение угля входит в состав Кизеловского каменноугольного бассейна, расположенного в восточной части Пермского края (рис. 1). Запасы месторождения отрабатывались в 1968–2000 гг. одноименной шахтой. Месторождение в геоморфологическом отношении находится между крупными реками Пермского края – Косью и Усьвой, отметки урезов воды в реках равны, соответственно, 163 и 202 м. Промплощадка шахты и породный отвал расположены на водоразделе указанных рек. В состав гидрографической сети входят малые реки – Шумиха и Хорошовка, а также Сухой лог и Паленка (рис. 2, 3). Шахтные воды сбрасывались в р. Шумиху, сюда же попадала основная часть подотвальных вод породного отвала (рис. 3) до образования карстовой воронки в русле указанного водотока у северной части отвала. Карстовая воронка была обнаружена авторами в августе 2016 г.; с учетом данных космосъемки ее возникновение отнесено к 2015 г.

### Методика исследования

В геолого-структурном отношении шахтное поле месторождения приурочено к средней и южной частям Шумихинской синклинали на площади Западно-Уральской зоны складчатости. Границами месторождения являются: на севере р. Косьва, на юге дизъюнктивное нарушение амплитудой до 100 м, расположенное между осью Шумихинской синклинали и осью Центральной Кизеловской антиклинали, на востоке и западе выходы угленосной толщи. Геологический разрез месторождения сложен в основном породами  $C_1$ , согласно залегающими на отложениях  $D_3$  и перекрытыми четвертичными образованиями; лишь на ограниченной площади встречаются отложения  $C_2$  [1] (рис. 2–4). Нижний карбон включает: турнейский –  $C_{1t}$ , визейский –  $C_{1v}$ , и серпуховский –  $C_{1s}$  ярусы. Турнейский ярус сложен известняками, алевролитами, аргиллитами и песчаниками общей мощностью 300 м. Нижняя и средняя части визейского яруса являются угленосной толщей –  $hC_{1v1+2}$ , сложенной песчаниками, алевролитами, аргиллитами и пластами каменного угля общей мощностью 190 м, верхняя его часть –  $C_{1v3}$ , и серпуховский ярус –  $C_{1s}$  сложен закарстованными известняками и доломитами средней мощностью 340 м. Средний карбон представлен карбонатными породами башкирского яруса мощностью 50 м и глинисто-карбонатными породами московского яруса мощностью до 170 м. Угли Кизеловского бассейна, включая угли рассматриваемого месторожде-

ния, отличаются высоким содержанием пиритной серы, составляющим в среднем 6,5 % [2, 3]. Четвертичные отложения представлены в основном суглинками и глинами мощностью от 1–5 до 150 м, на площади 20 га они перекрыты плоским отвалом пород с включениями угля, выданными из шахты на поверхность при ведении гор-

ных работ. Высота отвала до 12 м. Карст проявляется в виде многочисленных воронок [4–6], последними полностью поглощается сток р. Сухой лог. Новая карстовая воронка полностью поглощает поверхностный сток с прилегающей территории и основную часть подотвальных вод (рис. 3, 4).

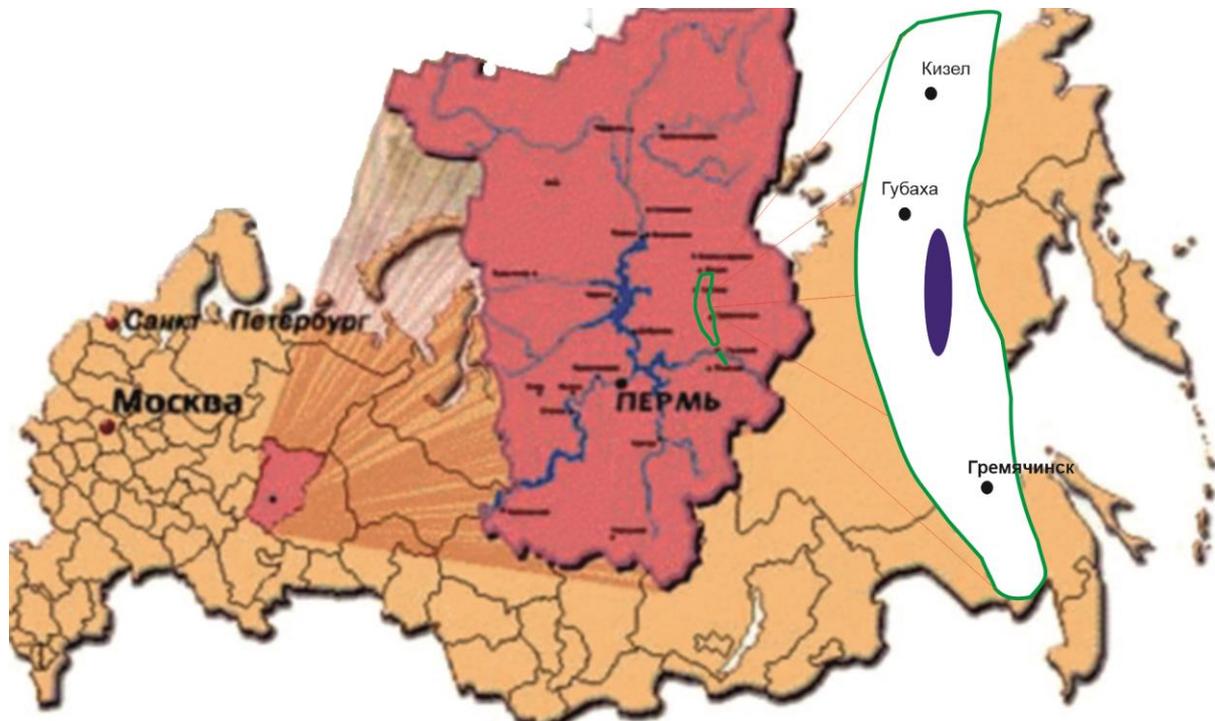


Рис. 1. Обзорная схема расположения Шумихинского месторождения угля  
 Fig. 1. Overview diagram of the Shumikhinskoe coal deposit location

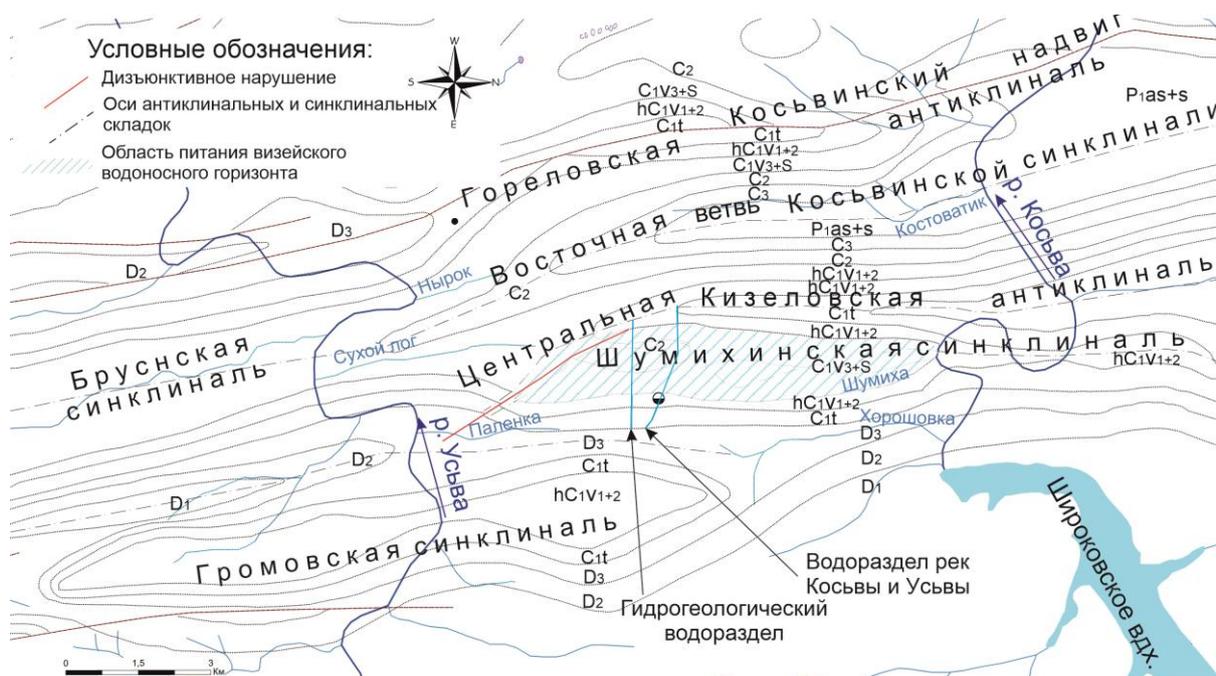


Рис. 2. Геологическая карта Кизеловского угольного бассейна в районе Шумихинской синклинали  
 Fig. 2. Geological map of the Kizelovsky coal basin in the Shumikhinskaya syncline

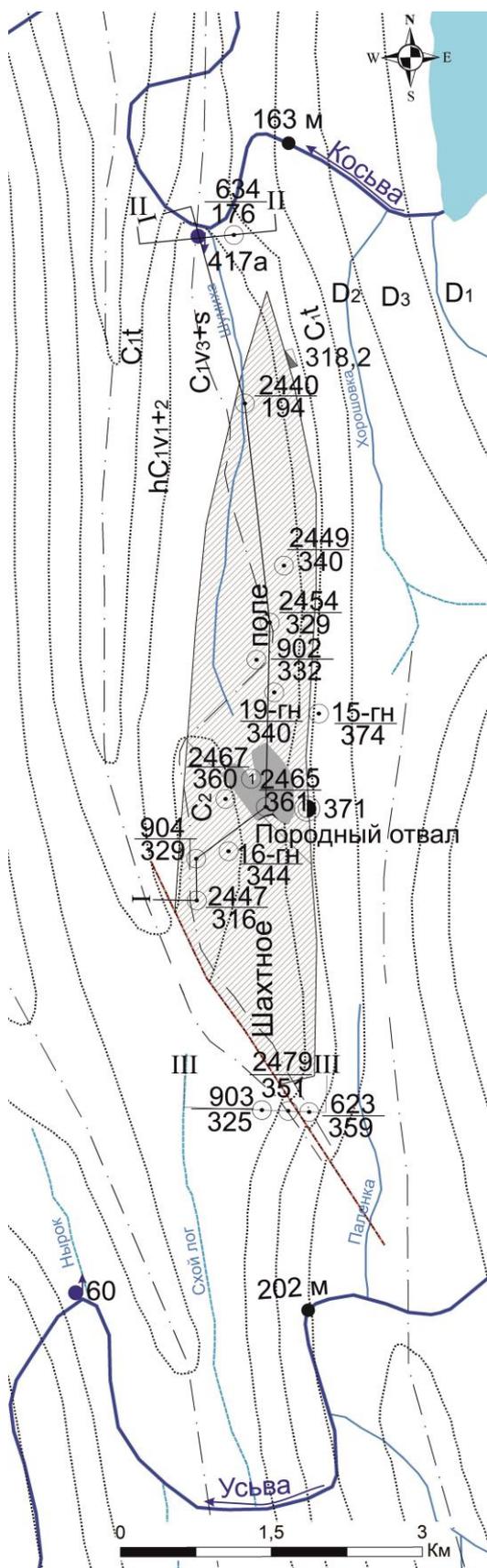


Рис. 3. Геологическая карта Шумихинского месторождения угля. Условные обозначения к рис. 3, 4 приведены на рис. 5

Fig. 3. Geological map of the Shumikhinskoe coal deposit. The notations to Fig. 3, 4 are given in Fig. 5

На шахтном поле выделяются: визейский горизонт трещинно-карстовых вод карбонатных отложений визейского, серпуховского и башкирского ярусов, комплекс трещинно-пластовых вод угленосной толщи и комплекс трещинно-пластовых и трещинно-карстовых вод турнейского яруса и верхнего девона [7–11]. Нижний из водоносных комплексов далее рассматривается лишь в составе турнейского яруса, т. к. подземные воды девонских отложений не испытывали воздействия горных работ и на шахтном поле не изучались. Вследствие высокой закарстованности и большой мощности карбонатных пород и хороших условий питания наибольшей водообильностью отличается визейский водоносный горизонт, являющийся и наиболее изученным. До работы шахты движение подземных вод горизонта происходило от гидрогеологического водораздела, находящегося в 0,7 км южнее породного отвала, к естественным областям разгрузки: на юго-запад на площадь восточной ветви Косьвинской синклинали и далее к р. Усьве и на север, к источнику 417-а на левом берегу р. Косьвы (рис. 2–4) [12]. При этом уровни подземных вод постепенно понижались от 304–316 м на водоразделе до отметок уреза воды в реках. Разгрузка подземных вод угленосной толщи происходила, вероятно, непосредственно в реки или очень рассредоточено, т. к. источников этих вод по берегам рек не обнаружено. К турнейским отложениям приурочен небольшой источник с дебитом 0,2 л/с на левом берегу р. Косьвы и источник с дебитом 1,5–2 л/с на правом берегу р. Косьвы. Отдельные данные о естественных уровнях подземных вод в обоих комплексах свидетельствуют о том, что они находились выше трещинно-карстовых вод визейского горизонта вследствие более высокого положения в рельефе выходов отложений угленосной толщи и турнейского яруса относительно выходов отложений визейского яруса (рис. 5).

Шахтное поле приурочено к восточному крылу и приосевой части Шумихинской синклинали. Горные работы велись на I, промежуточном, II и III горизонтах, отметка нижнего равна (-)230 м. Вынимались пласты 13 и 11 мощностью от 0,7 до 3 м, первый из них являлся верхним в разрезе. Управление кровлей велось полным обрушением [13]. Мощность междупластья на северном крыле шахты составляет 20–25 м, на южном крыле угольные пласты являются сближенными. Расстояние от пласта 13 до нижней границы карбонатной части визейского яруса равно 100 м, от пласта 11 до кровли турнейского яруса – около 60 м. Фактически нормальная мощность пород, отделяющих пласт 13 от визейского водоносного горизонта, достигает 130 м, т. к. нижняя пачка карбонатных пород визейского яруса представлена битуминозными незакарстованными известняками. Первый горизонт характеризуется крутым, вертикальным и обратным залеганием пластов, промежуточный горизонт – крутым залеганием пластов. Северное крыло II горизонта отличается пологим залеганием пластов в условиях приосевой части Шумихинской синклинали, на южном крыле горизонта имеет место крутое и наклонное залегание пластов. В этих условиях распространение

техногенных водопроницаемых трещин в кровельных породах вынутых пластов было минимальным на I горизонте и максимальным на северном крыле II го-

ризонта. В то же время дренирующему влиянию очистных работ I горизонта подвергались верхние водоносные горизонты турнейского яруса.

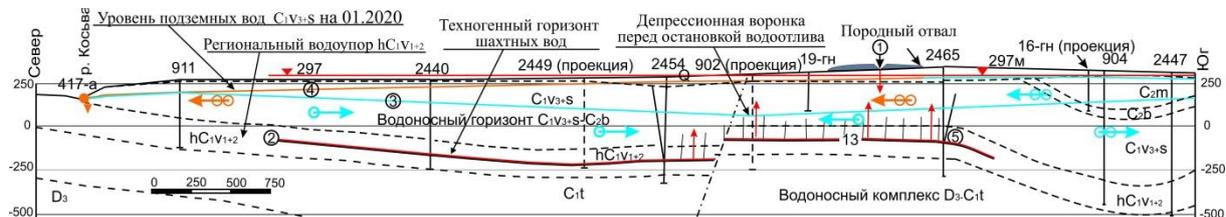
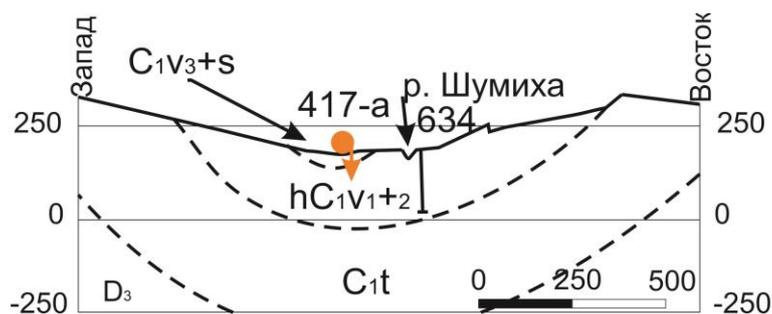


Рис. 4. Гидрогеологический разрез I-I Шумихинского месторождения угля от р. Косвы до скважины 2447

Fig. 4. Hydrogeological section I-I of the Shumikhinskoe coal deposit from the Kosva river to well 2447



Примечание: 1. Отметка устья скв.634-175,8 м, у ист. 417а-166 м, у Р. Шумихи 167 м. 2. Расстояние между скважиной и источником 210 м.

Условные обозначения:

- ⊙  $\frac{2449}{340}$  - Разведочная скважина; сверху номер, внизу отметка устья
- ⊙  $\frac{19-гн}{340}$  - Наблюдательная скважина
- ⊙ 374,5 - Клетевой ствол, справа отметка его устья
- ▾ 318,2 - Шурф 19, справа отметка его устья
- ▼ 297 - Уровень шахтных вод на 01.2020
- ▭<sub>13</sub> - Угольный пласт 13 и зона распространения техногенных трещин, достигших визейского водоносного горизонта
- ① - Новая карстовая воронка
- ② - Северная граница горных работ
- ③ - Уровень подземных вод  $C_{1v3+s}$  на 04.2000 г.
- ④ - Уровень подземных вод  $C_{1v3+s}$  на 01.2020 г.
- ⑤ - Нижняя граница ведения горных работ
- ←⊗← - Направление движения загрязненных подземных вод  $C_{1v3+s}$  на 01.2020 г.
- ←⊗← - Направление движения чистых подземных вод  $C_{1v3+s}$  на 01.2020 г.
- ←⊗← - Направление движения чистых подземных вод  $C_{1v3+s}$  на 04.2000 г.
- ↑↓ - Загрязнение подземных вод  $C_{1v3+s}$  шахтными и подотвальными водами

Рис. 5. Геологический разрез II-II по северной границе Шумихинского месторождения

Fig. 5. Geological section II-II along the northern boundary of the Shumikhinskoe field

Во время строительства шахты с 1958 по 1968 гг. и в первые годы добычи угля до 1973 г. шахтный приток формировался за счет подземных вод угленосной толщи, его средняя величина, за редким исключением, не превышала 100 м<sup>3</sup>/час. Существенный рост среднего притока шахтных вод произошел в 1973 г. вследствие прорыва в июле того года подземных вод угленосной толщи и турнейского яруса с притоком до 1500 м<sup>3</sup>/час из зоны тектонического нарушения в полевой штрек 102 южного крыла шахты (рис. 6). Лишь быстрое снижение объема подземных вод, поступающих из зоны прорыва, спасло шахту от затопления. Формирование шахтных вод до 1983 г. происходило в основном за счет подземных вод угленосной толщи и турнейского яруса, в конце данного периода в обводнении шахты небольшое участие стал принимать визейский водоносный горизонт на самом северном участке промгоризонта, где в условиях некоторого выполаживания вынимались пласты 13 и 11 суммарной мощностью до 3–4 м. Рост обводненности шахты происходил постепенно по мере увеличения площади выработанного пространства. Ситуация с притоками шахтных вод резко изменилась с началом выемки в 1984 г. пласта 13 мощностью до 2–2,5 м на II горизонте в условиях пологого, до горизонтального,

залегания пластов. Техногенные водопродвижающие трещины в кровельных породах отработанного пласта достигли визейского водоносного горизонта, и уже в 1985 г. приток шахтных вод увеличился с 250 до 429 м<sup>3</sup>/ч, а в следующем году достиг 518 м<sup>3</sup>/ч. В 1990 г. подработка незатампонированной разведочной скважины 902 вызвала рост среднего притока шахтных вод до 555 м<sup>3</sup>/ч, максимального до 802 м<sup>3</sup>/ч. В последующем высокая обводненность шахты сохранялась до ее закрытия в 2000 г. После остановки в апреле 2000 г. шахтного водоотлива происходило затопление шахты поступающими в нее подземными водами с образованием на отработанной площади шахтного поля техногенного горизонта шахтных вод мощностью, определяемой вынимаемой мощностью пластов и высотой зоны обрушения кровельных пород над выработанным пространством, равной 3–6 мощностям вынутых пластов [14]. На северном крыле II горизонта мощность техногенного водоносного горизонта достигает 15–18 м. В июле 2014 г. начался излив шахтных вод на поверхность с дебитом от 4 до 10 м<sup>3</sup>/ч через разведочную скважину 634, расположенную на левом берегу р. Косьвы, в 75 м от ее русла и в 1450 м от северной границы горных работ шахты (рис. 3–5). Ранее скважина не фонтанировала.

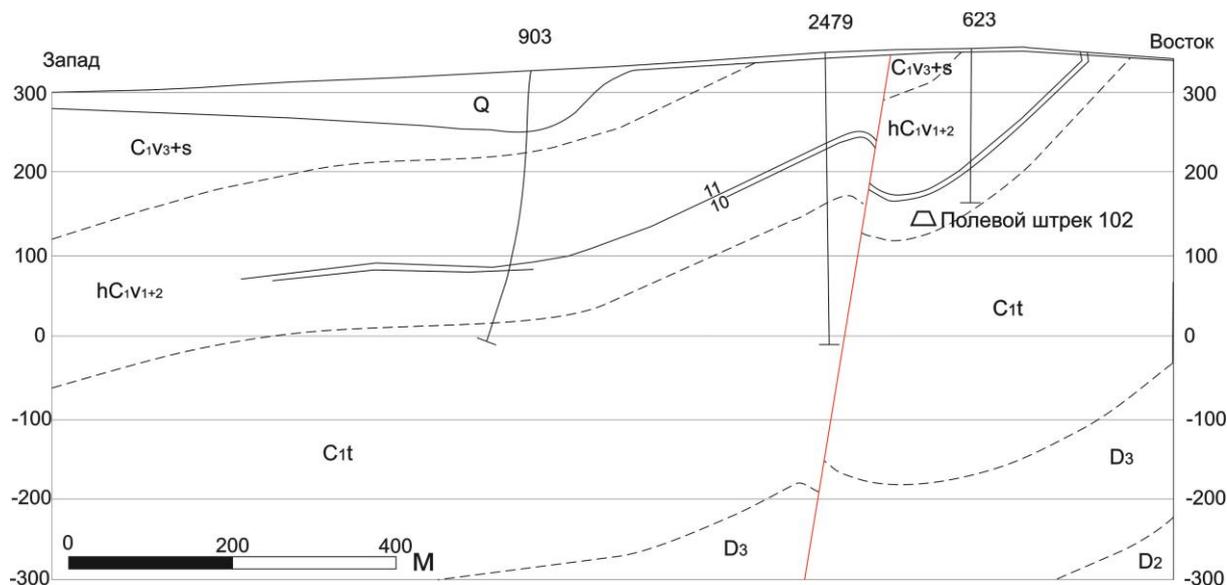


Рис. 6. Геологический разрез III-III по южной границе Шумихинского месторождения  
 Fig. 6. Geological section III-III along the southern boundary of the Shumikhinskoe field

### Результаты исследования

Сдвигание горных пород в выработанное пространство угольных пластов сопровождалось образованием водопродвижающих трещин в кровельных породах и нарушением естественных водоупоров, вследствие этого горные выработки становились новыми дренами подземных вод. Хорошим каналом поступления трещинно-карстовых вод в шахту являлась незатампонированная скважина 902 после её подработки по пласту 13. В результате активного дренирования подземных вод произошли большие негативные изменения гидрогеологических условий Шумихинского

месторождения. На совмещенных графиках изменения во времени притоков шахтных вод и уровней подземных вод визейского горизонта прослеживается хорошая связь между уровнями этих вод и величиной шахтных водопритокков (рис. 7). Уровни рассматриваемых вод во время работы шахты контролировались по наблюдательным скважинам 2467 и 2449, расположенным, соответственно, в средней и северной частях шахтного поля (рис. 3, 4). Они до 1981 г. испытывали лишь сезонные колебания, что свидетельствует об отсутствии участия трещинно-карстовых вод визейского горизонта в формировании шахтных водопритокков. К 1985 г. произошло небольшое сниже-

ние уровней подземных вод визейского горизонта вследствие дренирующего влияния горных работ на промгорizontе. Активное участие с 1984 г. данного водоносного горизонта в обводнении II горизонта шахты привело к отмеченному выше большому росту величины шахтных водопритоков и сопровождалось быстрым снижением уровней подземных вод, фиксировавшимся по скважинам до окончания наблюдений по ним (рис. 7). Учитывая сохранение больших притоков шахтных вод, обусловленных поступлением трещинно-карстовых вод по техногенным трещинам и подработанной скважине 902, вплоть до остановки водоотлива, предполагается, что скорость снижения уровней подземных вод также сохранилась на уровне, наблюдавшемся по скважине 2467 в 1986–1990 гг., до момента прекращения откачки воды из шахты. При этом уровень вод визейского горизонта по скважине 2449 снижался к началу 1996 г. до подошвы водоносного горизонта, имеющей здесь отметку 80 м, а по скважине 2467 – до отметки 115 м к началу 2000 г. Ко времени остановки шахтного водоотлива депрессионная воронка достигла максимальных размеров. Кардинально изменилось направление потока подземных вод визейского горизонта, вместо движения к естественным дренам – источнику 417-а на севере и р. Усьве на юге, трещинно-карстовые воды с большей части Шумихинской синклинали устремились к зоне их активного дренирования горными работами (рис. 4). Вне зоны дренирующего влияния горных работ осталась самая северная площадь распространения визейского горизонта, с которой подземные воды продолжали разгружаться через источник 417-а, но дебит последнего в 2000 г. составил всего 24 м<sup>3</sup>/ч (табл. 1). Водоносный комплекс угленосной толщи испытал наиболее сильное воздействие от ведения горных работ. Отдельные водоносные горизонты, разделенные в естественных условиях глинистыми породами и пластами угля, оказались гидравлически связанными водопроводящими трещинами, образовавшимися вследствие сдвижения горных пород в выработанное пространство. На северном крыле II горизонта водопроводящие трещины, а также ствол незатампонированной скважины 902 связали водоносный комплекс угленосной толщи с визейским водоносным горизонтом, а на северном крыле I горизонта, в условиях вертикального и опрокинутого залегания пластов, получили гидравлическую связь подземные воды угленосной толщи и верхних водоносных горизонтов турнейского яруса. Наблюдения за уровнем режимом подземных вод угленосной толщи во время работы шахты не проводились, однако из практики Кизеловского бассейна известно, что на площади отработки угольных пластов водоносный комплекс угленосной толщи дренировался практически до нижней отметки ведения горных работ, т. е. для условий шах. «Шумихинская» до отметки III горизонта (–)230 м.

Остановка шахтного водоотлива повлекла затопление горных выработок с образованием техногенного горизонта шахтных вод и восстановление уровней подземных вод, подвергшихся дренирующему влиянию шахты. Затопление горных выработок в услови-

ях высокой обводненности кизеловских шахт происходило быстро, особенно в начальный период, так, за первые полгода после остановки водоотлива крупнейшей в Кизеловском бассейне шах. им. Ленина уровень шахтных вод поднялся на 546 м [12]. Исходя из приведенных данных можно полагать, что уже в конце 2000 г. шахтные воды в горных выработках шахты «Шумихинская» приблизились к уровням трещинно-карстовых вод визейского горизонта и началось восстановление последних. Старые наблюдательные скважины к началу затопления шахты были выведены из строя, а новые еще не пробурены, поэтому наблюдения за восстановлением уровней подземных вод и уровнями шахтных вод в горных выработках стали проводиться с большим опозданием.

В 2003 г. на визейский водоносный горизонт были пробурены наблюдательные скважины: 19-гн в северной части шахтного поля и 16-гн в южной части, в этом же году в северной части шахтного поля в отложениях угленосной толщи и верхней части турнейского яруса была пробурена скважина 15-гн, которая использовалась для наблюдений за уровнем шахтных вод в горных выработках (рис. 3). При отчетной глубине скважин 200 м, предположительно из-за некачественно выполненных работ по их бурению и оборудованию, фактические замеры уровней по ним начались лишь в 2007–2008 гг., когда глубины залегания подземных вод уменьшились до 104–109 м, а шахтных вод до 143 м (рис. 7). Затопление горных выработок происходило в основном за счет трещинно-карстовых вод визейского горизонта, поэтому их уровень несколько превышал уровень затопления шахты до их приближения к естественному положению (рис. 7). На завершающем этапе восстановления динамического режима визейского водоносного горизонта все большая часть его ресурсов шла не на восстановление статических запасов данного горизонта, затопление горных выработок и пополнение запасов вод угленосной толщи, а направлялась к естественным областям разгрузки – источнику 417-а и р. Усьве. В данных условиях подъем уровней шахтных вод техногенного горизонта, подземных вод угленосной толщи и верхней части турнейского яруса шел быстрее и с 2016 г. эти воды по своему положению оказались выше уровня трещинно-карстовых вод визейского горизонта. По состоянию на начало 2020 г. уровень подземных вод визейского горизонта в северной части Шумихинской синклинали практически восстановился, при сохранении тренда, наблюдавшегося последние 4 года, уровень этих вод достигнет естественного положения в южной части синклинали через 10–13 лет, а шахтные воды техногенного горизонта через 6 лет поднимутся до устья самого северного шурфа 19, занимающего с отметкой 318,2 м наиболее низкое положение в рельефе из всех горных выработок шахты, и начнут изливаться на поверхность (рис. 3). Уровень шахтных вод при этом стабилизируется на отметке, близкой к отметке излива, на всем протяжении шахтного поля вследствие свободной гидравлической связи шахтных вод по выработанному пространству.

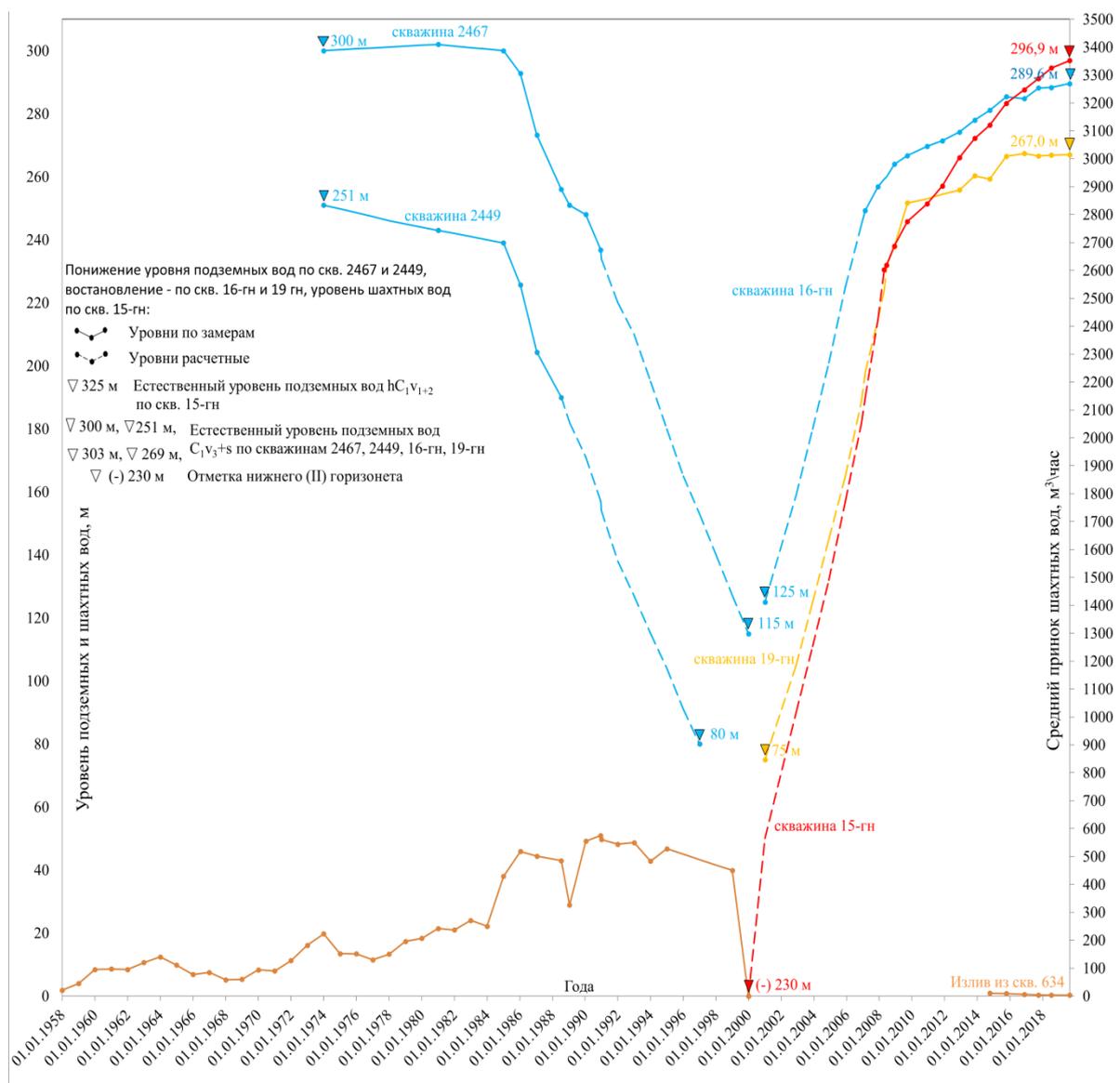


Рис. 7. Изменение уровней подземных вод  $C_{1V_{3+s}}$  и  $hC_{1V_{1+2}}$  и притоков шахтных вод во время работы и после закрытия шахты «Шумихинская»

Fig. 7. Variation of underground water level  $C_{1V_{3+s}}$  and  $hC_{1V_{1+2}}$  and mine water influxes at the working time and after the closure of mine «Shumikhinskaya»

В северной части шахтного поля уровень шахтных вод находится на десятки метров выше уровня подземных вод визейского горизонта; таким образом, создались условия для перетока шахтных вод в визейский водоносный горизонт. Уровень подземных вод угленосной толщи, связанных на шахтном поле с техногенным водоносным горизонтом, будет определяться отметками шахтных вод 318,2–319 м и не достигнет своих естественных отметок – до 350 м на широте гидрогеологического водораздела подземных вод. Ресурсы подземных вод угленосной толщи, а следовательно, и техногенного горизонта шахтных вод на поле шахты «Шумихинская» весьма ограничены небольшой площадью области питания этих вод и ее расположением на водоразделах местных малых рек (рис. 2, 3). Часть ресурсов техногенного горизонта шахтных вод разгружается через скважину 634, часть перетекает в визейский водоносный горизонт.

Дебит излива шахтных вод из шурфа 19 в этих условиях ожидается в среднем небольшим, до  $10 \text{ м}^3/\text{ч}$ , однако в период весеннего паводка он может многократно увеличиваться. Имеющиеся данные позволяют приблизительно оценить ресурсы визейского горизонта по дебиту источника 417-а. Уровни подземных вод горизонта на данной территории к 2010 г. в основном восстановились, то же самое можно сказать и о дебите источника 417-а. В период 2010–2020 гг. средний дебит последнего в летний меженьный период составлял  $70 \text{ м}^3/\text{час}$ , максимальный, связанный с весенним паводком, –  $312 \text{ м}^3/\text{час}$ , зимой наблюдения не проводились. Полагая, что дебит источника, близкий к среднему, наблюдается в течение 11 месяцев, а максимальный всего 1 месяц, среднегодовой дебит источника, характеризующий ресурсы визейского горизонта, можно оценить в  $90 \text{ м}^3/\text{час}$ . При площади питания источника 417-а равной  $7,04 \text{ км}^2$  модуль подзем-

ного стока территории определяется приблизительно в  $12,8 \text{ м}^3/\text{ч} \cdot \text{км}^2$ , или  $3,6 \text{ л/с} \cdot \text{км}^2$ .

Подземные воды, поступающие в шахты Кизеловского бассейна, являются пресными и характеризуются нейтральной и слабощелочной реакцией [15, 16]. Окисление пирита, содержащегося в углях, приводит к образованию кислых шахтных вод с низкими значениями pH, повышенной минерализацией и высоким содержанием Fe, Al и ряда микроэлементов, многократно превышающим ПДК для вод питьевого и рыбохозяйственного назначения [3, 15–18]. Подобные изменения химического состава и свойств дождевых и талых вод происходят в недрах породных отвалов шахт с образованием кислых подотвальных вод. Зачастую содержание загрязняющих веществ в подотвальных водах больше, чем в шахтных водах, особенно это выражается в более высокой относительно Fe концентрации Al. Подобная картина наблюдается и на Шумихинском месторождении. Данные о химическом составе подземных, шахтных и подотвальных вод, включая основные результаты гидрохимического опробования, выполненного авторами в августе 2016 г., приведены в таблице.

Приведенные в таблице данные свидетельствуют о том, что в результате поступления в визейский горизонт шахтных и подотвальных вод трещинно-карстовые воды испытали сильное загрязнение, приводившее к многократному превышению ПДК для вод питьевого и рыбохозяйственного назначения по наиболее характерным для шахтных и подотвальных вод веществам: Fe, Al, Mn, Ni, Co, Li, Be. После 2010 г. происходило постепенное снижение уровня

загрязнения визейского горизонта, связанное, в частности, с большим уменьшением концентрации загрязняющих веществ в подотвальных водах. Однако качество вод источника 417-а все еще значительно хуже качества этих вод в естественных условиях, что выражается результатами химанализа вод источника 60 (рис. 3). Через этот источник происходит разгрузка визейского горизонта с южной части восточной ветви Косьвинской синклинали и, вероятно, южной части Шумихинской синклинал. Шахтные воды шах. «Шумихинская» по своим свойствам и химическому составу являются типичными для Кизеловского бассейна. Концентрация загрязняющих веществ в шахтных водах, изливающихся из скважины 634, выше, чем в шахтных водах при работе шахты, и имеет тенденцию к росту. Наиболее высокой является концентрация загрязняющих веществ в подотвальных водах, которые, как и объем этих вод, зависит от сезона года, количества и интенсивности осадков, продолжительности складирования породы в отвале. За период наблюдения произошло большое снижение содержания загрязняющих веществ в подотвальных водах – так, величина сухого остатка уменьшилась с 41,5 до  $5,1 \text{ г/дм}^3$ . Во время эксплуатации месторождения откачиваемые на поверхность шахтные воды сбрасывались в р. Шумиху, загрязняя её, последняя в свою очередь загрязняла р. Косьву. После ликвидации шахты и затопления горных выработок образовался техногенный горизонт шахтных вод и произошло загрязнение шахтными и подотвальными водами визейского водоносного горизонта. Подверглись загрязнению и подземные воды самой угленосной толщи.

**Таблица.** Химический состав и дебиты подземных, шахтных и подотвальных вод

**Table.** Chemical composition and yields of groundwater, mine water and underspoil waters

Опробуемые воды. Место отбора пробы Tested water Place of sampling	Дебиты источников воды, м <sup>3</sup> /ч Flow rates of water sources, m <sup>3</sup> /hour	Дата замера и опробования Date of measuring and testing	pH	Содержание, мг/дм <sup>3</sup> Concerning, mg/dm <sup>3</sup>												
				Сухой остаток Dry residue	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Ca	Mg	Fe	Al	Mn	Ni	Co	Li	Be	
2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	
Подземные. Источник 417-а Underground feeder 417-а	24	29.08.00	6,77	511	76	288,0	96,0	21,8	0,26	0,32	0,191	0,038	0,015	0,065	0,0001	
	312	01.06.10	2,7	1392	–	862	71,9	18,5	132,5	72,38	0,687	0,160	0,081	0,703	0,0096	
	80	12.08.10	3,2	836	–	578	84,2	24,8	41,65	54,35	0,550	0,101	0,051	0,477	0,0057	
	74	18.08.16	4,09	610	–	452	111	32	10,5	32,5	0,42	0,06	0,03	0,14	0,0025	
Источник 60 Feeder 60	56	24.07.20	6,9	432	119	214	59	24	11,0	0,63	0,58	0,12	0,021	0,036	0,0004	
	200	19.09.02	7,66	152	159	9,6	42	9,1	0,19	0,28	0,008	0,003	0,002	0,003	0,0001	
Шахтные. Общий слив шахтных вод шах. «Шумихинская» на поверхность Mine waters. General dis- charge of mine water from the mine. «Shumikhinskaya» to the surface	207	15.06.1989	2,7	1680	–	1037	92,2	21,9	215,0	62,9	н/оп	н/оп	н/оп	н/оп	н/оп	
	5	11.07.14	6,1	2400	41	1230	153	33,7	582	0,08	3,16	0,127	0,143	0,082	0,0004	
	3	18.08.16	5,28	3494	–	2358	175	60	865	0,2	4,96	0,28	0,26	0,05	0,002	
	4	14.07.20	4,2	5824	–	3601	192	92	1810	10,0	11,0	2,4	0,65	0,12	0,029	
Подотвальные. Породный отвал шах. «Шумихинская» Underburden. The rock dump of the mine. «Shumikhinskaya»	31	10.10.02	2,08	41458	–	20378	125	176	4253	1713	12,7	5,46	2,10	12,2	0,262	
	7	31.08.09	2,1	32902	–	18499	385	293	3122	1852	19,4	2,76	1,27	13,15	0,1739	
	2	18.08.16	2,39	5687	–	4032	219	42	1374	223	4,4	1,10	0,51	1,60	0,040	
	7	23.09.19	2,6	5140	–	2340	243	75	99	370	4,1	0,51	0,25	4,1	0,016	

Образование кислых шахтных вод с высокой концентрацией железа не является особенностью Кизеловского бассейна, этот процесс происходит и на других угольных месторождениях, где они формировались как при добыче угля, так и после закрытия шахт [19–23]. В Великобритании, на Йоркширском месторождении угля, изливающиеся на поверхность из затопленных горных выработок кислые шахтные воды содержат до  $100 \text{ мг/дм}^3$  железа [24], схожая ситуация и на угольных месторождениях Шотландии [25]. В Японии, на острове Кюсю, спустя 60 лет после прекращения эксплуатации угольного бассейна концентрация железа в выходящих на поверхность кислых шахтных водах достигает  $119 \text{ мг/дм}^3$ , сульфатов –  $1430 \text{ мг/дм}^3$  [26]. В США в Питсбургском угольном бассейне после его закрытия концентрации железа превышали  $1 \text{ г/дм}^3$  [27].

К сожалению, рамки статьи не позволяют с достаточной полнотой рассмотреть вопросы формирования и изменения во времени и пространстве химического состава шахтных и подотвальных вод, загрязнения ими подземных вод Шумихинского месторождения. Авторы полагают необходимым вернуться к рассмотрению затронутой в статье темы после начала разлива шахтных вод техногенного горизонта на поверхность через шурф 19.

#### Выводы

Приведенные в статье данные позволяют сделать следующие основные выводы:

- Горные работы шахты «Шумихинская» оказали большое негативное воздействие на гидрогеологические условия Шумихинского месторождения угля во время отработки его запасов и продолжают его оказывать в постэксплуатационный период.
- Во время работы шахты произошли большие нарушения гидродинамического режима водоносных горизонтов, выразившиеся в изменении направления движения подземных вод, возникновении гидравлической связи между водоносными горизонтами из-за нарушения водоупоров, понижении уровней подземных вод, достигших 225 м для визейского водоносного горизонта и 580 м для угленосной толщи.
- За прошедшие 20 лет после остановки шахтного водоотлива уровни и направление движения подземных вод визейского горизонта практически восстановились. В затопленных горных выработках отработанной части шахтного поля образовался техногенный горизонт шахтных вод, ожидается, что через 6 лет эти воды поднимутся до отметки 318,2 м и начнут изливаться на поверхность через устье шурфа 19. Средний дебит разлива шахтных

вод предположительно не превысит  $10 \text{ м}^3/\text{час}$ , однако в весенний период он может многократно увеличиваться за счет попадания в горные выработки талых вод. Уровень подземных вод угленосной толщи будет определяться уровнем шахтных вод – 318,2–319 м, и поэтому не достигнет своего естественного положения – 350 м, на широте гидрогеологического водораздела. С 2014 г. частичная разгрузка шахтных вод со средним дебитом  $5 \text{ м}^3/\text{час}$  происходит через разведочную скважину 634.

- Химический состав подземных вод визейского горизонта и угленосной толщи после ликвидации шахты ухудшился. Уровень шахтных вод техногенного горизонта на большей части шахтного поля превышает уровень вод визейского горизонта, поэтому происходит загрязнение последнего шахтными водами по техногенным трещинам и скважине 902. Кроме этого, данный водоносный горизонт загрязняется подотвальными водами через карстовую воронку, возникшую в 2015 г. Подземные воды визейского горизонта в естественном состоянии имеют хорошее качество и широко используются на территории Кизеловского бассейна для питьевого водоснабжения; в районе Шумихинского месторождения они являются загрязнителем р. Косьвы [28, 29], в которую впадают после выхода на поверхность в виде источника 417-а [30–33].
- На основании данных, имеющихся по наиболее старым шахтам Кизеловского бассейна, можно полагать, что образование кислых шахтных вод в горных выработках шахты «Шумихинская» будет происходить в течение сотен лет. Для улучшения геологической ситуации в районе Шумихинского месторождения необходимо в первую очередь провести рекультивацию породного отвала и ликвидировать карстовую воронку, поглощающую подотвальные воды.
- Следует продолжить гидрогеологический мониторинг. Необходимо также, с учетом результатов выполнения первоочередных природоохранных мероприятий и новых данных по объему и химическому составу шахтных вод, полученных после начала их разлива на поверхность из шурфа 19, разработать и осуществить дополнительные природоохранные работы.

*Исследования выполнены при финансовой поддержке Пермского научно-образовательного центра «Рациональное недропользование», 2022 г.*

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Снитко Г.П., Гай В.В. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:200000. Издание второе. Серия Пермская. Лист О-40-Х (Кизел). Объяснительная записка. – М.: Московский филиал ФГБУ «ВСЕГЕИ», 2017. – 167 с.
2. Геология месторождений угля и горючих сланцев СССР. Т. 4. Угольные бассейны и месторождения Урала. – М.: Изд-во «Недра», 1967. – 476 с.
3. Клер В.Р., Ненахова В.Ф., Сапрыкин Ф.Я. Металлогения и геохимия угленосных и сланцесодержащих толщ СССР. Закономерности концентрации элементов и методы их изучения. – М.: Изд-во «Наука», 1988. – 256 с.
4. Катаев В.Н., Золотарев Д.Р., Ермолович И.Г. Особенности развития карста в Кизеловском угольном бассейне // Геология и полезные ископаемые западного Урала. – 2019. – № 39. – С. 236–337.
5. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием

- гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Косся) / П.А. Рыбников, Л.С. Рыбникова, Н.Г. Максимович, А.Д. Деменев // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). – 2020. – № 3-1. – С. 475–487.
6. Максимович Н.Г., Мешерякова О.Ю. Влияние карста на формирование экологической обстановки на территории Кизеловского угольного бассейна // III Крымские карстологические чтения: Материалы международной научно-практической конференции. – Симферополь, 2021. – С. 76–80.
  7. Печеркин И.А. Подземные и шахтные воды Кизеловского каменноугольного бассейна: дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Пермь, 1955. – 313 с.
  8. Кудряшов А.И., Осовецкий Б.М. Минерально-сырьевые ресурсы Пермского края. – Пермь: Изд-во «Книжная площадь», 2006. – 463 с.
  9. Копылов И.С. Геоэкология, гидрогеология и инженерная геология Пермского края. – Пермь: ИЦ Пермского государственного национального исследовательского университета, 2021. – 502 с.
  10. Копылов И.С. Гидрогеологическая карта и подземные воды Кизеловского угольного бассейна // Геоэкология, инженерная геодинамика, геологическая безопасность. Печеркинские чтения: сборник научных статей по материалам Международной научно-практической конференции. – Пермь, 2021. – С. 92–101.
  11. Оборин В.В., Копылов И.С. Обоснование гидрогеологического доизучения и геоэкологического картирования масштаба 1:200000 листа 0-40-х (Кизеловская площадь) // Геология и полезные ископаемые западного Урала. – 2020. – № 40. – С. 3–11.
  12. Имайкин А.К. Негативные геоэкологические последствия подземной добычи угля шахтой «Шумихинская» в Кизеловском угольном бассейне и рекомендации по снижению их воздействия на окружающую природную среду // Сергеевские чтения. Международный год планеты Земля: задачи геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. Вып. 10: материалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии. – Москва, 2008. – С. 213–215.
  13. Управление кровлей и крепление в очистных забоях на угольных пластах с углом падения до 35°. Руководство КД 12.01.01.503-2001. – Киев: Минтопэнерго Украины, ДонУГИ, 2002. – 141 с.
  14. Синопян Р.Р. Маркшейдерское дело. – М.: Изд-во «Недра», 1982. – 303 с.
  15. Имайкин А.К. Оценка и прогноз гидрогеологических условий территории Кизеловского угольного бассейна после закрытия шахт: автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. – Пермь, 2012. – 22 с.
  16. Имайкин А.К., Имайкин К.К. Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений. – Пермь: Изд-во ПГНИУ, 2013. – 112 с.
  17. Baker V.J., Banfield J.F. Microbial communities in acid mine drainage // FEMS Microbiology Ecology. – 2003. – V. 44. – P. 139–152.
  18. Microbial oxidation of pyrite: experiments using microorganisms from an extreme acidic environment / K.J. Edwards., M.O. Schrenk, R. Hamers, J.F. Banfield // American Mineralogist – 1998. – V. 83. – P. 1444–1453.
  19. Burrell R., Whitworth K. The influence of mine water recovery on surface on gas and water discharges in the Yorkshire Coalfield // Mine Water and the Environment: Proc. of 7th International Mine Water Association Congress. – Katowice, Ustron, Poland, 2000. – P. 81–90.
  20. Donovan J.J., Leavitt B.R., Werner E. Long-term changes in water chemistry as a result of mine flooding in closed mines of the Pittsburgh coal basin, USA // Sixth International Conference Acid Rock Drainage. – Cairns, Queensland, USA, 2003. – P. 869–875.
  21. Health impacts of coal and coal use: possible solutions / R. Finkelman, W. Orem, V. Castranova, C.A. Taty, H.E. Belkin, B. Zheng, H.E. Lerch, S.V. Maharaj, A.L. Bates //
  22. International Journal of Coal Geology. – 2009. – V. 50. – P. 425–443.
  23. Finkelman R., Stracher G. B. Environmental and health impacts of coal fires // Coal and peat fires: a global perspective. – Amsterdam: Elsevier, 2011. – P. 115–125.
  24. Orem W.H., Finkelman R.B. Coal formation and geochemistry // Treatise on Geochemistry. – 2003. – V. 7. – P. 191–222.
  25. Younger P.L., Bradley K.F. Application of geochemical mineral exploration techniques to the cataloguing of problematic discharges from abandoned mines in North-East England // 5th International Mine Water Congress. – Nottingham, 1994. – P. 857–871.
  26. The environmental legacy of historic mining activities in the Almond River catchments, Scotland / S. Haunch, A. MacDonald, N. Brown, C. McDermott // Mine Water – Managing the Challenge. – Aachen, Germany: IMWA, 2011. – P. 581–586.
  27. Okamoto M., Kobayashi T., Sakamoto M. Physical properties of sediments deposited in the mine water from a closed coal mine // Engineering geology for tomorrow's cities: Proc. of the 10th Congress of the International Association for Engineering geology and the Environment. – Nottingham UK, 2006. – CD-ROM.
  28. Long-term changes in water chemistry as a result of mine flooding in closed mines of the Pittsburgh coal basin, USA / J.J. Donovan, B.R. Leavitt, A.J. Morris, E. Werner // 6th ICARD. – Cairns Australia, 2003. – P. 869–875.
  29. Меньшикова Е.А., Ушакова Е.С., Блинов С.М. Геохимическая специфика загрязнения рек в зоне влияния Кизеловского угольного бассейна // Экологическая безопасность в условиях антропогенной трансформации природной среды: сборник материалов всероссийской школы-семинара, посвященной памяти Н.Ф. Реймерса и Ф.П. Штильмарка. – Пермь, 2021. – С. 269–273.
  30. Репин И.С., Андреева Е.Д. Влияние разработки Кизеловского угольного бассейна на экологическое состояние бассейна реки Косвы // Природа и общество: в поисках гармонии. – 2020. – № 6. – С. 114–126.
  31. Powell J.D. Origin and influence of coal mine drainage on streams of the United States // Environmental Geology and Water Sciences. – 1988. – V. 11. – P. 141–152.
  32. Acid-base accounting: a geochemical tool for management of acid drainage in coal mines / S. Siddharth, A. Jamal, B.B. Dhar, R. Shukla // Mine Water Environ. – 2002. – V. 21. – P. 106–110.
  33. Tao X., Wu P., Tang C. Effect of acid mine drainage on a karst basin: a case study on the high-As coal mining area in Guizhou province, China // Environmental Earth Sciences. – 2012. – V. 65. – P. 631–638.
  34. Wright I.A., Paciuszkiewicz K., Belmer N. Increased water pollution after closure of Australia's longest operating underground coal mine a 13-month study of mine drainage, water chemistry and river ecology water // Air Soil Pollut. – 2018. – V. 229: 55. URL: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3718-0> (15.11.2021).

Поступила: 20.11.2021 г.

#### Информация об авторах

**Имайкин А.К.**, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник научно-исследовательской лаборатории экологической геологии Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

**Имайкин К.К.**, ведущий инженер научно-исследовательской лаборатории геологии техногенных процессов Естественного института Пермского государственного национального исследовательского университета.

UDC 556.3.04

## CHANGES IN HYDROGEOLOGICAL CONDITIONS OF THE SHUMIKHINSKY COAL DEPOSIT (PRE-URALS) AS A RESULT OF UNDERGROUND MINING

Alexander K. Imaykin<sup>1</sup>,  
imaykin@mail.ru

Kamil K. Imaykin<sup>1</sup>,  
imaykin@mail.ru

<sup>1</sup> Perm State National Research University,  
4, Genkel street, Perm, 614068, Russia.

**The relevance.** Major changes in the hydrogeological conditions of the Shumikhinsky coal deposit during operation and after liquidation of the mine are identified and considered. Contamination of ground and surface waters by the technogenic horizon of acid mine waters and underspoil waters were established, the terms of termination of mine flooding and the volume of mine water outflow to the surface were determined. The work will be useful in the development of environmental protection measures.

**Research objective:** to study the hydrodynamic regime of groundwater and mine water during operation and after abandonment of the mine; investigation of chemical composition of mine water, underspoil waters and contaminated groundwater.

**Methods:** a review of general published sources, analysis of stock-keeping geological materials, hydrogeological monitoring data, field works performed by the authors in the mine field, and work with mine work plans.

**Results.** A hydro-geological section of the Shumikhinskoe coal deposit, reflecting the hydro-geological conditions at the time of maximum development of mining operations and 20 years after their termination, was constructed. Combined graphs of changes in groundwater and mine water levels, as well as mine water inflows, were plotted. The causes and nature of changes in the hydrogeological conditions in the area of the mine field were identified, and a forecast of their changes was made.

**Conclusions.** Mining works of mine «Shumihinskaya» had a great negative effect on the hydrogeological conditions of Shumihinskoe deposit. Mine liquidation did not result in full recovery of groundwater hydrodynamic conditions and caused formation of anthropogenic mine water table and increased groundwater pollution. If the rate of mine water rise remains unchanged, it is expected to be released to the surface through Pit 19 after 6 years.

### Key words:

Kizelovsky coal basin, Shumikhinskoe deposit, groundwater, mine water, underspoil waters, hydrogeological forecast.

### REFERENCES

1. Snitko G.P., Guy V.V. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiyskoy Federatsii. Masshtab 1:200000. Izdanie vtoroe. Seriya Permskaya. List O-40-X (Kizel). Obyasnitelnaya zapiska* [State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:200,000. Second edition. Permskaya series. Sheet O-40-X (Kizel). Explanatory note]. Moscow, Moscow branch of FGBU VSEGEI, 2017. 167 p.
2. *Geologiya mestorozhdeniy uglya i goryuchikh slantsev SSSR* [Geology of Coal and Oil Shale Deposits of the USSR]. Vol. 4. Coal Basins and Deposits of the Urals. Moscow, Nedra Publ., 1967. 476 p.
3. Clair V.R., Nenakhova V.F., Saprykin F.Ya. *Metallogeniya i geokhimiya uglensnykh i slantsevnykh tolshch SSSR. Zakonomernosti kontsentratsiy elementov i metody ikh izucheniya* [Metallogeny and geochemistry of coal and shale-bearing strata of the USSR. Regularities of the element concentrations and methods of their studies]. Moscow, Nauka Publ., 1988. 256 p.
4. Kataev V.N., Zolotarev D.R., Ermolovich I.G. Features of karst development in Kizelovsky coal basin. *Geologiya i poleznye iskopaemye zapadnogo Urala*, 2019 no. 39, pp. 236–337. In Rus.
5. Rybnikov P.A., Rybnikova L.S., Maksimovich N.G., Demenev A.D. Investigation of hydrogeological conditions of coal deposits at the post-operational stage using hydrodynamic modeling (on the example of the Kizel coal basin, Western Urals, Russia). *Mining information and analytical bulletin (scientific and technical journal)*, 2020, vol. 3-1, pp. 475–487. In Rus.
6. Maksimovich N.G., Meshcheryakova O.Yu. Vliyanie karsta na formirovanie ekologicheskoy obstanovki na territorii Kizelovskogo ugolnogo basseyna [Impact of karst on the formation of environmental conditions in the Kizelovsky coal basin]. *Materialy mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii III Krymskie karstologicheskie chteniya* [Proceedings of the International Scientific and Practical Conference III Crimean karstological readings]. Simferopol, 2021. pp. 76–80.
7. Pecherkin I.A. *Podzemnye i shakhtnye vody Kizelovskogo kamennougolnogo basseyna*. Diss. Kand. nauk [Underground and mine waters of the Kizelovsky coal basin. Cand. Diss.]. Perm, 1955. 313 p.
8. Kudryashov A.I., Osovetsky B.M. *Mineralno-syryevye resursy Permskogo kraya* [Mineral and raw material resources of Perm Krai]. Perm, Book Square Publ., 2006. 463 p.
9. Kopylov I.S. *Geokologiya, gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya Permskogo kraya* [Geocology, Hydrogeology and Engineering Geology of Perm Region]. Perm, Perm State National Research University Publ., 2021. 502 p.
10. Kopylov I.S. *Gidrogeologicheskaya karta i podzemnye vody Kizelovskogo ugolnogo basseyna* [Hydrogeological map and underground waters of Kizelovsky coal basin]. *Geokologiya, inzhenernaya geodinamika, geologicheskaya bezopasnost. Pecherkinskie chteniya. Sbornik nauchnykh statey po materialam Mezhdunarodnoy nauchno-prakticheskoy konferentsii* [Geocology, engineering geodynamics, geological safety. Pecherkinskie readings. Book of scientific papers on the proceedings of International Scientific Conference]. Perm, 2021. pp. 92–101.
11. Oborin V.V., Kopylov I.S. Substantiation of hydrogeological pre-exploration and geo-ecological mapping at 1:200000 scale of sheet O-40-x (Kizelovskaya area). *Geologiya i poleznye iskopaemye zapadnogo Urala*, 2020, vol. 40, pp. 3–11. In Rus.
12. Imaykin A.K. Negativnye geokologicheskie posledstviya podzemnoy dobychi uglya shakhtoy «Shumikhinskaya» v Kizelovskom ugolnom basseyne i rekomendatsii po snizheniyu ikh vozdeystviya na okruzhayushchuyu prirodnyuyu sredu [Negative geo-ecological consequences of underground coal mining by Shumikhinskaya mine in Kizelovsky coal basin and recommendations on reduction of their impact on environment]. *Sergeevskie chteniya. Mezhdunarodny god planety Zemlya: zadachi geologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii. Vypusk 10: materialy godichnoy sessii Nauchnogo soveta RAN po problemam geologii, inzhenernoy geologii i gidrogeologii* [Sergeev readings. International Year of Planet Earth: problems of geocology, engineering geology and hydrogeology. Vol. 10:

- Materials of annual session of RAS Scientific Council on problems of geoecology, engineering geology and hydrogeology]. Moscow, 2008. pp. 213–215.
13. *Upravlenie krovley i kreplenie v ochistnykh zaboyakh na ugolnykh plastakh s uglom padeniya do 35°. Rukovodstvo KD 12.01.01.503-2001* [Roofing management and fastening in the working face at coal seams with a dip angle up to 35°. Guidance KD 12.01.01.503. – 2001]. Kyiv, Ministry of Fuel and Energy of Ukraine, Don UHI, 2002. 141 p.
  14. Sinonyan R.R. *Markshederskoe delo* [Mine surveying]. Moscow, Nedra Publ., 1982. 303 p.
  15. Imaykin A.K. *Otsenka i prognoz gidrogeologicheskikh usloviy territorii Kizelovskogo ugolnogo basseyna posle zakrytiya shakht*. Avtoreferat Dis. Kand. nauk [Assessment and forecast of hydrogeological conditions of Kizelovsky coal basin territory after mine closure. Cand. Diss. Abstract]. Perm, 2012. 22 p.
  16. Imaykin A.K., Imaykin K.K. *Gidrogeologicheskie usloviya Kizelovskogo ugolnogo basseyna v protsesse i posle ekspluatatsii, Prognoz ikh izmeneniya* [Hydrogeological conditions of Kizelovsky coal basin during and after its operation, Forecast of their changes]. Perm, PGNIU Publ., 2013. 112 p.
  17. Baker B.J., Banfield J.F. Microbial communities in acid mine drainage. *FEMS Microbiology Ecology*, 2003, vol. 44, pp. 139–152.
  18. Edwards K.J., Schrenk M.O., Hamers R., Banfield J.F. Microbial oxidation of pyrite: experiments using microorganisms from an extreme acidic environment. *American Mineralogist*, 1998, vol. 83, pp. 1444–1453.
  19. Burrell R., Whitworth K. The influence of mine water recovery on surface on gas and water discharges in the Yorkshire Coalfield. *Mine Water and the Environment. Proceedings of 7th International Mine Water Association Congress*. Katowice, Ustron, Poland, 2000. pp. 81–90.
  20. Donovan J.J., Leavitt B.R., Werner E. Long-term changes in water chemistry as a result of mine flooding in closed mines of the Pittsburgh coal basin, USA. *Sixth International Conference Acid Rock Drainage*. Cairns, Queensland, USA, 2003. pp. 869–875.
  21. Finkelman R., Orem W., Castranova V., Taty C.A., Belkin H.E., Zheng B., Lerch H.E., Maharaj S.V., Bates A.L. Health impacts of coal and coal use: possible solutions. *International Journal of Coal Geology*, 2002, vol. 50, pp. 425–443.
  22. Finkelman R., Stracher G.B. Environmental and health impacts of coal fires. *Coal and peat fires: a global perspective*. Amsterdam, Elsevier, 2011. pp. 115–125.
  23. Orem W.H., Finkelman R.B. Coal formation and geochemistry. *Treatise on Geochemistry*, 2003, vol. 7, pp. 191–222.
  24. Younger P.L., Bradley K.F. Application of geochemical mineral exploration techniques to the cataloguing of problematic discharges from abandoned mines in North-East England. *5th International Mine Water Congress*, Nottingham, 1994. pp. 857–871.
  25. Haunch S., MacDonald A., Brown N., McDermott C. The environmental legacy of historic mining activities in the Almond river catchments, Scotland. *Mine Water – Managing the Challenges*. Aachen, Germany, IMWA Publ., 2011. pp. 581–586.
  26. Okamoto M., Kobayashi T., Sakamoto M. Physical properties of sediments deposited in the mine water from a closed coal mine. *Engineering geology for tomorrow's cities. Proceedings of the 10th Congress of the International Association for Engineering Geology and the Environment*. Nottingham UK, 2006. CD-ROM.
  27. Donovan J.J., Leavitt B R, Morris A.J., Werner E. Long-term changes in water chemistry as a result of mine flooding in closed mines of the Pittsburgh coal basin, USA. *6th ICARD*. Cairns Australia, 2003. pp. 869–875.
  28. Menshikova E.A., Ushakova E.S., Blinov S.M. Geokhimicheskaya spetsifika zagryazneniya rek v zone vliyaniya Kizelovskogo ugolnogo basseyna [Geochemical specificity of river pollution in zone of influence of Kizelovsky coal basin]. *Ekologicheskaya bezopasnost v usloviyakh antropogennoy transformatsii prirodnoy sredy. Sbornik materialov vsrossiyskoy shkoly-seminara, posvyashchennoy pamyati N.F. Rejmersa i F.R. Shtilmarka* [Ecological safety in conditions of anthropogenic transformation of natural environment: collection of materials of All-Russian School-Seminar devoted to memory of N.F. Reimers and F.R. Stilmark]. Perm, 2021. pp. 269–273.
  29. Repin I.S., Andreeva E.D. Impact of Kizelovsky coal basin development on the ecological state of the Kosva river basin. *Priroda i obshchestvo: v poiskah garmonii*, 2020, no. 6, pp. 114–126. In Rus.
  30. Powell J.D. Origin and influence of coal mine drainage on streams of the United States. *Environmental Geology and Water Sciences*, 1988, vol. 11, pp. 141–152.
  31. Siddharth S., Jamal A., Dhar B.B., Shukla R. Acid-base accounting: a geochemical tool for managem of acid drainage in coal mines. *Mine Water Environ*, 2002, vol. 21, pp. 106–110.
  32. Tao X., Wu P., Tang C. et al. Effect of acid mine drainage on a karst basin: a case study on the high-As coal mining area in Guizhou province, China. *Environmental Earth Sciences*, 2012, vol. 65, p. 631–638.
  33. Wright I.A., Paciuszkiewicz K., Belmer N. Increased water pollution after closure of Australia's longest operating underground coal mine a 13-month study of mine drainage, water chemistry and river ecology water. *Air Soil Pollut*, 2018, vol. 229: 55. Available at: <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3718-0> (accessed 15 November 2021).

Received: 20 November 2021.

#### Information about the authors

**Alexander K. Imaykin**, Cand. Sc., researcher, Perm State National Research University.  
**Kamil K. Imaykin**, leading engineer, Perm State National Research University.