

ИССЛЕДОВАНИЕ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ НА ПОСТЭКСПЛУАТАЦИОННОМ ЭТАПЕ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ (НА ПРИМЕРЕ КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАСЕЙНА, ЗАПАДНЫЙ УРАЛ, РОССИЯ)

П.А. Рыбников^{1,2}, Л.С. Рыбникова¹, Н.Г. Максимович³, А.Д. Деменев³

¹ Институт горного дела Уральского отделения Российской академии наук (ИГД УрО РАН),

² Уральский государственный горный университет,

³ Естественнонаучный институт «Пермский государственный национальный исследовательский университет»

Аннотация: Добыча угля в Кизеловском угольном бассейне сопровождалась интенсивным шахтным водоотливом, осушением как угольных толщ, так и гидравлически связанных с ними водоносных горизонтов пород, формированием обширных депрессионных воронок в районах отработываемых шахт, перемещением больших масс горных пород, образованием провалов над выработанным пространством. Эти процессы привели к существенным изменениям фильтрационных характеристик водоносных горизонтов и условий питания подземных вод по сравнению с естественными условиями. После прекращения водоотлива сформировалось 19 участков разгрузки кислых шахтных вод, которые являются источником загрязнения гидросферы. Для выбора инженерных мероприятий, направленных на улучшение экологической обстановки, потребовалось оценить балансовые составляющие, участвующие в формировании этих очагов разгрузки подземных вод. Необходима точность прогноза при оценке балансовых составляющих вод, участвующих в формировании участков разгрузки как в настоящее время, так и при реализации инженерных мероприятий, может быть достигнута путем воспроизведения методами математического (геофильтрационного) моделирования гидродинамической истории отработки месторождений. Подземные воды на территории Кизеловского угольного бассейна формируются в пределах изолированных бассейнов поверхностного стока. Для определения внешних границ моделей использовался подход, основанный на анализе геологического, тектонического строения территории, фильтрационных свойств пород с учетом геоморфологического положения бассейна для обеспечения корректного сопряжения границ локальных моделей. Исходными данными для выполнения работы послужили результаты многолетних режимных наблюдений при отработке угольных шахт, обобщение геолого-гидрогеологической информации (материалы из 202 отчетов и источников 1937–2017 годов, информация по 23,4 тыс. м горных выработок). На основании анализа выполнено обоснование основных параметров восьми геофильтрационных моделей, определены внешние и внутренние граничные условия, проведена стратификация каждой из моделей. Значение инфильтрационного питания для рассматриваемой территории было принято на основании оценок, выполненных в разные годы при изучении естественного режима подземных вод в процессе эксплуатации шахтного водоотлива, и анализа расходов очагов разгрузки подземных вод после затопления. Разработанные

гидродинамические модели использованы для оценки эффективности реализации инженерных мероприятий путем анализа изменения балансовых составляющих вод, участвующих в формировании очагов разгрузки подземных вод в настоящее время и при осуществлении планируемых инженерных мероприятий. Рассмотрены такие варианты: тампонаж скважин и шахтных стволов, устройство перемычек в шахтных выработках, закачка реагента в подземное пространство, отвод поверхностного стока, откачка подземных вод выше по потоку.

Ключевые слова: подземные и поверхностные воды, отработка, затопление, угольный пласт, кислые шахтные воды, геофильтрационная модель, бассейн стока.

Благодарность: Исследования выполнены в рамках Программы фундаментальных научных исследований РАН, тема 0328–2019–005 в соответствии с планом 2019–2021 гг. и при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 19–05–50073.

Для цитирования: Рыбников П.А., Рыбникова Л.С., Максимович Н.Г., Демнев А.Д. Исследование гидрогеологических условий угольных месторождений на постэксплуатационном этапе с использованием гидродинамического моделирования (на примере Кизеловского угольного бассейна, Западный Урал, Россия) // Горный информационно-аналитический бюллетень. – 2020. – № 3-1. – С. 475–487. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487.

Hydrogeology of the Kizel coal basin (Western Urals, Russia) in post-mining stage: the main problems and ways of their solution

P.A. Ribnikov^{1,2}, L.S. Ribnikova¹, N.G. Maksimovich³, A.D. Demenev³

¹ The Institute of Mining of the Ural branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia,

² Ural State Mining University,

³ Natural Sciences Institute of Perm state university

Abstract: Coal mining in the Kizel coal basin was accompanied by intensive mine drainage, drainage of both coal strata and hydraulically associated rock aquifers, the formation of extensive depression craters in the areas of worked mines, the movement of large masses of rocks, the formation of sinkholes over the worked space. These processes have led to significant changes in the filtration characteristics of aquifers and groundwater supply conditions compared to natural conditions. After the dewatering was stopped, 19 outflows of acid mine waters were formed, which are a source of pollution of the hydrosphere. To select engineering measures aimed at improving the environmental situation, it was necessary to assess the balance components involved in the formation of these outflows. The necessary accuracy of the forecast in assessing the balance components of water involved in the formation of outflows both at the present time and in the implementation of engineering measures can be achieved by reproducing the methods of mathematical (geofiltration) modeling of the hydrodynamic history of mining. Groundwater in the Kizel coal basin is formed within several relatively isolated basins of underground catchments. To determine the external boundaries of the models, an approach based on the analysis of the geological, tectonic structure of the territory, filtration properties of rocks, taking into account the geomorphological position of the basin, was used to ensure the correct interface of the boundaries of local models. On the basis of the analysis of long-term data of regime observations at working out of coal mines, generalization of geological and hydrogeological information the substantiation of basic parameters of 8 geofiltration models is executed, external and internal boundary conditions are defined, stratification of each of models is carried out. The value of the infiltration feed for the territory under consideration was taken on the basis of estimates made in different years in the study of the natural regime of groundwater, in the operation of the mine drainage and the analysis of the outflow costs after flooding. The effectiveness of engineering measures was evaluated by analyzing the changes in the balance components of water involved in the formation of spills at the present time and in the implementation of measures, which were considered as plugging wells and mine shafts, the device of bridges in mine workings, injection of reagent into the underground space, removal of surface runoff, pumping groundwater upstream.

Key words: underground and surface water, mining, flooding, coal seam, acid mine water, geofiltration model, runoff basin.

Acknowledgements: the Research was carried out within the framework of the basic research Program of the Russian Academy of Sciences, theme 0328-2019-005 in accordance with the plan 2019-2021 and with the financial support of the RFBR in the framework of scientific project No. 19-05-50073.

For citation: Ribnikov P.A., Ribnikova L.S., Maksimovich N.G., Demenev A.D. Hydrogeology of the Kizel coal basin (Western Urals, Russia) in post-mining stage: the main problems and ways of their solution. *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2020;(3-1):475-487. [In Russ]. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-475-487.

Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна. Геологический разрез Кизеловского угольного бассейна представлен осадочными отложениями от нижнего девона до нижней перми [1–5].

Угленосность связана с нижним отделом каменноугольной системы, представленной турнейским, визейским и серпуховским ярусами. Общая мощность карбонатных отложений в кровле угленосной толщи превышает 1000 м. Мощность угленосной толщи варьирует от 150 м в пределах Главной Кизеловской антиклинали до 200 м на Гремячинском месторождении. На рис. 1 приведена геологическая карта, отражающая условия южной части Главной Кизеловской антиклинали, центральной части Косьвинской синклинали и северной части Нагорнинской синклинали. Для этих структур региональной дрены является р. Косьва. Полностью границы восьми бассейнов подземного и поверхностного стока Кизеловского угольного бассейна приведены на рис. 2.

Основными складчатыми структурами являются Главная Кизеловская и Гореловская антиклинали, Коспашско-Полуденная, Косогорская, Косьвинская, Усьвинская, Нагорнинская, Шумихинская, Гремячинская, Скальнинская, синклинали. Складчатые структуры осложнены многочисленными разрывными нарушениями, которые имеют амплитуду от нескольких сотен метров до 1,5 км и прослежива-

ются на десятки километров. Основные разрывные нарушения и складчатые структуры имеют субмеридианальное простирание.

В гидрогеологическом разрезе выделяются следующие водоносные комплексы: визейско-артинский карбонатный (C1v3+s-P1a); угленосных отложений терригенный (hC1v1+2); франско-турнейский карбонатный (D3fr-C1t); девонский терригенный (D). Визейско-артинский водоносный комплекс трещинно-карстовых вод состоит из двух водоносных горизонтов: московско-артинского и визейско-башкирского. Горизонты разделены региональным водоупором, который приурочен к нижней пачке московского яруса среднего карбона и представлен глинистыми известняками, аргиллитами.

Визейско-башкирский водоносный горизонт является наиболее водообильным. К нему в бассейне приурочен ряд источников подземных вод с дебитом более 100 л/с.

В обводнении всех шахт Кизеловского бассейна принимали участие трещинно-пластовые воды угленосной толщи и на большинстве шахт – воды визейско-артинского комплекса. Глубина отработки шахт варьировала от 100 м на шахтах Усьвинской синклинали до 1 км на шахтах Главной Кизеловской антиклинали и Косьвинской синклинали [5]. Наиболее высокие значения суммарного водоотлива были зафиксированы на шахтах Главной

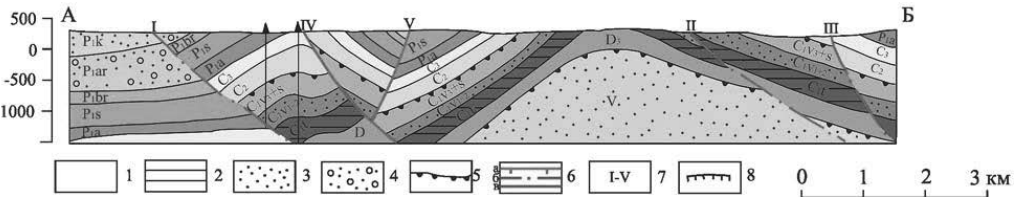
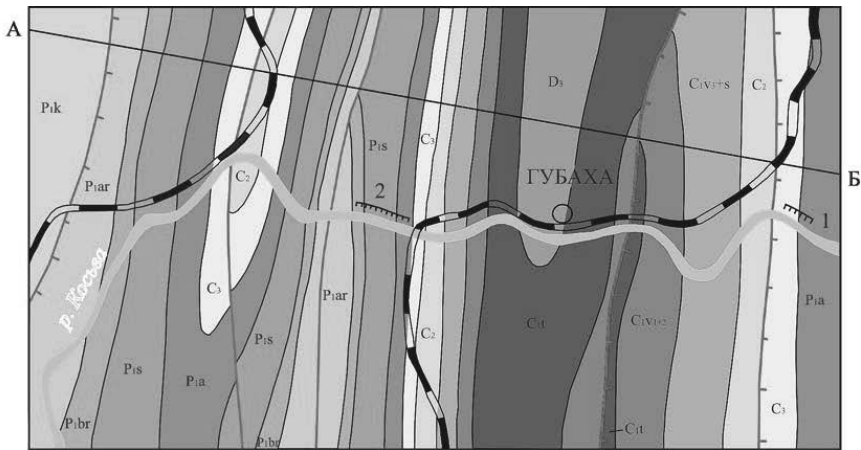


Рис. 1. Геологическая карта района р. Косвы [4]. Горные породы: 1 – карбонатные; 2 – карбонатно-песчано-глинистые; 3 – песчано-глинистые; 4 – песчано-глинистые с мощными конгломератами; 5 – стратиграфические перерывы; 6 – разрывные нарушения: а – надвиги на карте, б – надвиги на профильном разрезе, в – взбросы на карте и разрезе; 7 – надвиги: I – Всеволодо-Вильвенский, II – Луньевско-Чусовской, III – Косвинский; взбросы: IV – Мальцевский и V – Косогорский; 8 – разрезы (1 – Холодный Лог, 2 – Белая Гора)

Fig. 1. Geological map of the area of the Kosva river [4]. Rocks: 1 – carbonate; 2 – carbonate-sand-clay; 3 – sand-clay; 4 – sand-clay with powerful conglomerates; 5 – stratigraphic breaks; 6 – discontinuities: a – overhangs on the map, b – overhangs on the profile section, c – overhangs on the map and section; 7 – overhangs: I – Vsevolod-Vilvensky, II – Lunyevsko-Chusovskaya, III – kosvinsky; vents: IV – maltsevsky and V – Kosogorsky; 8 – sections (1 – cold log, 2 – white mountain)

Кизеловской антиклинали (до 5,5 тыс. м³/час), Коспашско-Полуденной синклинали (до 3 тыс. м³/час). Около 1 тыс. м³/час составлял водоотлив на шахтах Косвинской и Гремячинской синклинали.

Уровни подземных вод водоносного комплекса угленосных отложений понижались до нижней границы ведения горных работ. После затопления отработанных шахтных полей в составе угленосной толщи образовался техногенный горизонт шахтных вод.

Геофильтрационная схематизация бассейнов подземного стока Кизе-

ловского угольного бассейна. Цель геофильтрационного моделирования Кизеловского угольного бассейна заключается в получении балансовых характеристик локальных бассейнов подземного стока. В табл. 1 приведены наименования численных моделей, размеры каждой, количество расчетных блоков, описание внутренних, внешних границ и их характеристика. Для моделирования используются специализированные программные продукты, такие как ModelMuse (разработка Геологической службы США, USGS), который представляет собой

пре- и постграфический процессор для программных кодов ModFlow, MT3D, MODPath и т.д. [6, 7]. Эти программные коды являются общепризнанными высокоэффективными средствами моделирования как в мире, так и в России [8, 9].

Для прогноза изменения гидродинамической ситуации на весь срок планируемых водоохранных мероприятий рассматриваются различные инженерные решения для уменьшения объемов разгрузки шахтных вод на поверхность [3, 10, 11]. Для моделирования использовались следующие методические приемы:

- *тампонаж скважин и шахтных стволов* имитировался как 1) уменьшение коэффициента фильтрации расчетных блоков, в которых располагается скважина или ствол; 2) увеличение фильтрационного сопротивления этих блоков; 3) отключение дрены в этих блоках;

- *устройство перемычки в шахте* имитировалось как задание фильтрационного барьера с пониженным коэффициентом фильтрации в соответствующих блоках модели;

- *закачка реагента в подземное пространство* имитировалась как уменьшение коэффициента фильтрации в соответствующих блоках в пределах шахтного поля;

- *отвод поверхностного стока* оценивался как анализ баланса изливов на год повышенной водности (5 % обеспеченности) и год нормальной водности (50 % обеспеченности).

Оценка эффективности реализации инженерных мероприятий осуществляется путем анализа изменения балансовых составляющих вод, участвующих в формировании изливов в настоящее время и при осуществлении мероприятий.

Подземные воды на территории Кизеловского угольного бассейна фор-

мируются в пределах восьми изолированных бассейнов подземного стока (рис. 2). По поверхностным водоразделам заданы непроницаемые границы (2 род). Полностью непроницаемыми границами окружены модели Усьвиснской и Коспашско-Полуденной синклинали. Река Косьва задана как граничное условие 3 рода, определяющие взаимосвязь реки и пласта, для моделей Главной Кизеловской антиклинали, Нагорной, Косьвинской и Шумихинской синклиналей. Модель Шумихинской синклинали занимает водораздельное пространство между реками Косьва и Усьва. Для модели условий отработки важным внутренним граничным условием является шахтный водоотлив (граничное условие 2 рода) и глубина его заложения (граничное условие 1 рода). Для модели условий затопления на месте выхода (излива) шахтных вод задается абсолютная отметка выхода (граничное условие 1 рода — абсолютная отметка участка разгрузки) или величина разгрузки на поверхность (граница 2 рода — расход) (табл. 1). Разбивка конечно-разностной сетки модели равномерная, шаг 50 × 50 м.

На первом этапе была решена серия обратных (эпигнозных) задач, которые имитируют естественные ненарушенные условия (ситуация без техногенной нагрузки) для уточнения базовых водно-балансовых составляющих; воспроизводят ситуацию, сложившуюся к определенному моменту времени в процессе отработки месторождений (наиболее важным периодом с точки зрения уточнения фильтрационных параметров является этап, характеризующийся стабильными водопритоками к шахтам) для определения степени изменения фильтрационных свойств пород, параметров питания и оценки водно-балансовых составляющих

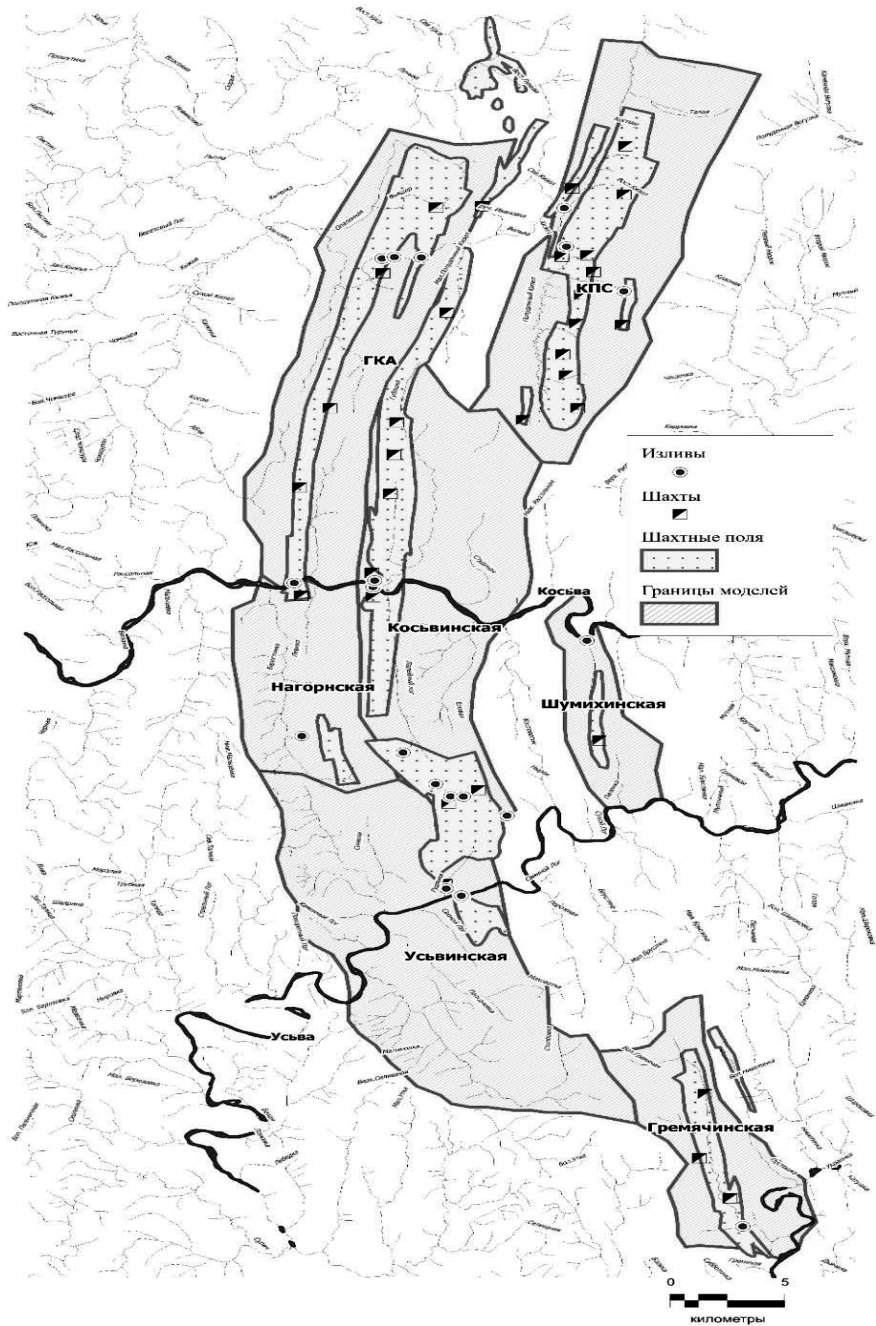


Рис. 2. Границы геофильтрационных моделей в пределах Кизеловского угольного бассейна: ГКА – Главная Кизеловская антиклиналь, КПС – Коспашско-Полуденная синклиналь

Fig. 2. Border geofiltration models within the Kizel coal basin: HCA – the Main Kizel anticline, KPS – Kospashkiy-Midday synclinal fold

Таблица 1

Основные характеристики геофильтрационных моделей

Main characteristics of geofiltration models

Геофильтрационная модель	Внешние границы		Внутренние границы, расход (суммарно), м ³ /час		Площадь модели, км ²	Количество расчетных блоков (по оси X* по оси Y* по оси Z)
	направление	вид	шахтный водоотлив	участки разгрузки шахтных вод		
Главная Кизеловская антиклиналь	север запад восток юг	водораздел водораздел водораздел р. Косьва	4654	350	153	299*124*5
Коспашско-Полуденная синклинали	север запад восток юг	водораздел водораздел водораздел водораздел	2958	345	132	272*135*5
Северная часть Косьвинской синклинали	север запад восток юг	водораздел водораздел водораздел р. Косьва	909	399	100	176*82*3
Нагорная синклинали	север запад восток юг	р. Косьва водораздел водораздел водораздел	293	59	78	143*80*3
Южная часть Косьвинской синклинали	север запад восток юг	р. Косьва водораздел водораздел водораздел	1099	594	87	169*89*3
Шумихинская синклинали	север запад восток юг	р. Косьва водораздел водораздел р. Усьва	454	12	31	146*55*3
Усьвинская синклинали	север запад восток юг	водораздел водораздел водораздел водораздел	624	100	31*	216*167*3
Гремячинская синклинали	север запад восток юг	водораздел водораздел водораздел водораздел	985	684	53	174*133*3

Примечание *по площади развития угленосной толщи

шахтного водоотлива; воспроизводят условия, сложившиеся к настоящему времени (после прекращения водоотлива и заполнения депрессионной воронки) для оценки воднобалансовых составляю-

щих, формирующих разгрузку шахтных вод на поверхность; Решение обратных задач не обязательно должно воспроизводить непрерывный во времени процесс изменения гидрогеологической

Таблица 2

Характеристика параметров геофильтрационных моделей (описание пластов идет сверху вниз)
 Characteristics of parameters of geofiltration models (the description of layers goes from top to bottom)

Номер пласта	Параметры и диапазон их изменения			
	коэффициент фильтрации, м/сут	проводимость, м ² /сут	пьезо-проводность, м ² /сут	мощность, м
<i>Модель естественных условий</i>				
1 — водоносный карбонатный пласт	0,12 — 0,84	24 — 259	2,69*10 ² — 0,03*10 ²	0 — 400
2 — разделяющая толща	1*10 ⁻²	—	—	10
3 — водоносный угленосный пласт	0,03 — 0,14	7 — 38	0,1*10 ² — 7,1*10 ³	0 — 160
<i>Модель условий отработки и условий затопления</i>				
1 — водоносный карбонатный пласт	0,12 — 0,84	24 — 259	2,69*10 ² — 0,03*10 ²	0 — 400
2 — разделяющая толща	1*10 ⁻²	—	—	10
3 — водоносный угленосный пласт, верхняя часть	0,03 — 0,14	7 — 38	0,1*10 ² — 7,1*10 ³	70
4 — разделяющая толща	1*10 ⁻²	—	—	10
5 — водоносный угленосный пласт, нижняя часть, зона водопроводящих трещин	0,3 — 1,4	35 — 38	0,1*10 ² — 7,1*10 ³	80

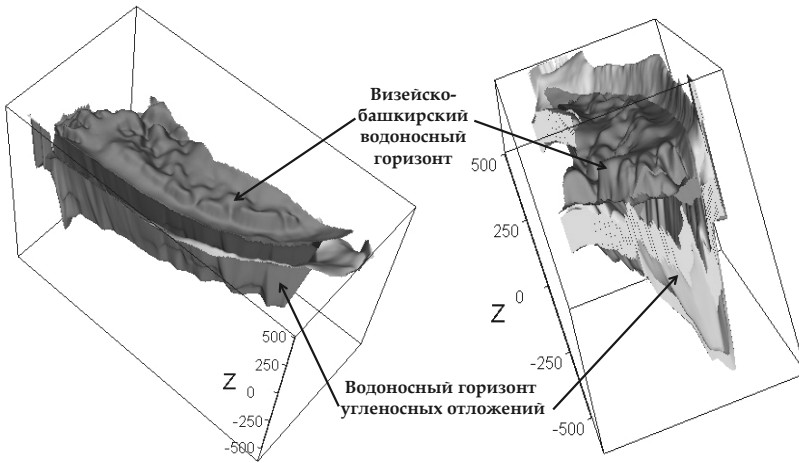


Рис. 3. Объемное представление геологической модели Косьвинской синклинали (южная часть)
 Fig. 3. Volumetric representation of the geological model of the Kosvinsky syncline (southern part)

ситуации. Учитывая достаточно быструю стабилизацию гидродинамических возмущений (для трещиноватых пород в ограниченных гидро-

геологических структурах не более пяти лет), можно выделить опорные стационарные периоды и проводить решение обратных задач для этих

периодов в стационарной постановке. Целью решения задач на этом этапе является калибровка фильтрационных параметров и проверка чувствительности модели, анализ закономерностей движения подземных вод. Критерием непротиворечивости модели служит совпадение модельных и фактических уровней подземных вод и балансовых составляющих рассматриваемой территории. Результатом решения задачи является уточнение гидрогеологических условий объекта исследований, подтверждение корректности отражения на модели наблюдаемых процессов.

Рассматриваемые модели многопластовые, они включают 2 или 3 водоносных пласта и разделяющие их толщи (табл. 2). На рис. 3 приведено трехмерное представление гидрогеологической модели визейско-артинского карбонатного водоносного горизонта и горизонта угленосных пород для южной части Косьвинской синклинали.

Исходными данными для геофильтрационного моделирования являются цифровая модель рельефа (абсолютные отметки поверхности земли); сведения о геологическом строении (геологические карты и разрезы; виды пород, их состав, площадь развития, глубина залегания, мощность); гидрогеологические характеристики (гидрогеологические разрезы, данные опытно-фильтрационных опробований, фильтрационные и емкостные свойства пород, мощность водоносных отложений и слабопроницаемых пластов, трещиноватость и закарстованность пород; уровни и напоры подземных вод). Для задания мощности расчётного слоя использовались карты рельефа, глубин залегания кровли и подошвы каждого пласта. Глубина отработки шахт КУБа варьировала от 100 м на шахтах Усьвинской син-

клинали до 1 км на шахтах Главной Кизеловской антиклинали и Косьвинской синклинали (северная часть). Задание геофильтрационных параметров осуществлялось в соответствии со следующей предпосылкой: для территории Кизловского угольного бассейна установлено, что фильтрационные свойства водовмещающих пород уменьшаются с глубиной [1, 13].

Значение инфильтрационного питания для рассматриваемой территории может быть принято на основании оценок, выполненных в разные годы при изучении естественного режима подземных вод и в процессе эксплуатации водоотлива. Режимными наблюдениями при отработке шахт им. Чкалова и «Усьва-3» (Усьвинская синклинали) шахт было установлено, что зафиксированный в процессе отработки водоотлив обеспечен ресурсами, формирующимися только в пределах угленосной толщи при модуле $7 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$.

Модуль подземного стока, определенный по результатам режимных наблюдений за дебитами источников карстовых вод верхней карбонатной толщи в долинах рек Луньвы и Кизела, составляет для меженного периода $2,7 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$, для многоводного периода достигает $14,2 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$. Среднегодовое значение модуля подземного стока для карбонатной толщи в долине р. Вишеры составляет $8 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ [1]. Величина водопритоков в горные выработки составляла $35 \text{ м}^3/\text{час}$ на км^2 , что соответствует модулю подземного стока $10 \text{ л}/(\text{с}\cdot\text{км}^2)$ [13]. Модуль подземного стока по результатам работы по оценке обеспеченности определен в диапазоне $5-10 \text{ л}/\text{с}\cdot\text{км}^2$ [14]. Таким образом, модуль подземного стока для территории Кизловского угольного бассейна может быть принят величиной $7,5 \text{ л}/\text{с}\cdot\text{км}^2$

Результаты и их обсуждение. С использованием геофильтрационного моделирования для восьми бассейнов подземного стока в пределах Кизеловского угольного бассейна была выполнена оценка балансовых составляющих для разных этапов развития территории: естественные ненарушенные условия, отработка с шахтным водоотливом, текущая ситуация с разгрузкой шахтных вод, реализация инженерных мероприятий [15].

Ресурсы угленосных пластов обеспечивали не более 50 % шахтного дренажного стока. При моделировании было учтено взаимодействие угольного водоносного горизонта с вышележащим (визейско-артинским) и нижележащим (франско-турнейским) водоносными горизонтами. Установлена четкая зависимость расхода шахтных изливов от сезонности и климатических факторов. За счет расхода поверхностного стока образуется до 50 % расхода изливов. Для подтверждения этого вывода было выполнено моделирование, имитирующее обеспеченность стока лет разной водности. В качестве основного водоохранного мероприятия предлагается перехват и отведение поверхностного стока нагорными канавами. Это позволит снизить расход загрязненных шахтных вод на сформированных к настоящему времени участках разлива. Эффективным методом снижения расхода разлива кислых шахтных вод является откачка из угленосной толщи или артинско-визейского горизонта выше по потоку от места разгрузки шахтных вод. Артинско-визейский водоносный горизонт имеет состав воды, который отвечает нормативам, предъявляемым к водам питьевого качества, а содержание основных загрязняющих компонентов в подземных водах угленосной толщи значительно ниже, чем в шахтных водах, разгружающихся

сейчас на поверхность [1, 13]. Такие закономерности характерны в целом для большинства отработанных шахт и рудников [12, 16]. При небольших расходах разгрузки шахтных вод целесообразно выполнять *закачку реагента в подземное пространство* [3].

Выводы

На основании анализа многолетних данных режимных наблюдений при отработке угольных шахт, обобщения геолого-гидрогеологической информации выполнено обоснование параметров восьми геофильтрационных моделей бассейнов локального подземного стока Кизеловского угольного бассейна, обоснованы внешние и внутренние граничные условия, проведена стратификация каждой из моделей. Для выбора инженерных мероприятий, направленных на улучшение экологической обстановки, были оценены балансовые составляющие фильтрационных потоков, участвующие в формировании этих участков разгрузки шахтных вод на поверхность.

Для моделирования инженерных мероприятий по снижению расходов разгрузки шахтных вод на поверхность использовались следующие методические приемы:

- *тампонаж скважин и шахтных стволов* имитировался как 1) уменьшение коэффициента фильтрации расчетных блоков, в которых располагается скважина или ствол; 2) увеличение фильтрационного сопротивления этих блоков; 3) отключение дрены в этих блоках;
- *устройство перемычки в шахте* имитировалось как задание фильтрационного барьера с пониженным коэффициентом фильтрации в соответствующих блоках модели;
- *закачка реагента в подземное пространство* имитировалась как уменьшение коэффициента фильтрации

в соответствующих блоках в пределах шахтного поля;

- *отвод поверхностного стока* оценивался как анализ баланса расхода разгрузки подземных вод на поверхность на год повышенной водности (5 % обеспеченности) и год нормальной водности (50 % обеспеченности).

Оценка эффективности реализации инженерных мероприятий осуществляется путем анализа изменения балансовых составляющих вод, участвующих в формировании разгрузки подземных вод на поверхность в настоящее время и при осуществлении инженерных мероприятий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Ежов Ю.А.* Карст и гидрогеология Кизеловского угольного района в связи с разработкой глубоких горизонтов месторождений: дисс. канд. геол.-мин. наук. АН СССР, Уральский филиал, Кунгурский стационар, 1962. – 237 с.
2. *Копылов И.С.* Подземные воды западного склона Среднего Урала и их перспективы для водоснабжения // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2015. № 6 – 3. С. 460 – 464.
3. *Максимович Н.Г., Пьянков С.В.* Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения // Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2018. 288 с.
4. *Щербаков О.А., Щербакова М.В., Головин В.П.* Государственная геологическая карта СССР масштаба 1:200000. Серия Пермская. Листы О-40-Х и О-40-ХУ1. Пермский филиал ФГУ «ТФИ по Приволжскому федеральному округу». 1989.
5. *Имайкин А.К., Имайкин К.К.* Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений // Перм. гос. нац. иссл. ун-т. Пермь, 2013. 112 с.
6. *Chiang W.H., Kinzelbach W.* 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. First edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. 346 p.
7. *Zheng C., Wang P.P.* MT3DMS: A Modular Three-Dimensional MultiSpecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide, Report no : SERDP-99 – 1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 1999.
8. *Корнилков С.В., Рыбников П.А., Ведерников А.С., Панжин А.А.* О концепции создания геoinформационной системы «Безопасность природо- и недропользования» // Горный информационно-аналитический бюллетень (научно-технический журнал). 2017. № 523. С. 32 – 42.
9. *Рыбникова Л.С., Рыбников П.А.* Гидрогеологические исследования в горном деле на постэксплуатационном этапе // Геоэкология. Инженерная геология. Гидрогеология. Геокриология. 2018. С. № 4. С. 25–39.
10. *Maksimovich N., Khmurchik V., Demenev A., Sedinin A., Berezina O.* The General Concept of Kizel Coal Basin Remediation // Mine Water: Technological and Environmental Challenges: proceedings of International Mine Water Association Conference 2019, 15 – 19 July 2019, Perm, Russia, 2019. pp. 736 – 740.
11. *Skousen, J., Zipper, C.E., Rose, A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R., McDonald L.M., Kleinmann R.L.* Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment (2017). Mine Water Environment. V 36. pp. 133 – 153.
12. *Wolkersdorfer C.* Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 465 p.
13. *Печеркин И.А.* Подземные и шахтные воды Кизеловского каменноугольного бассейна: дисс. канд. геол.-мин. наук, г. Молотов, 1955. Молотовский государственный университет им. А.М. Горького. 313 с.

14. Герасименко Б.Н. Оценка обеспеченности населения Пермской области ресурсами подземных вод для хозяйственно-питьевого водоснабжения (II этап). Пермь-Москва, «ГИДЭК». 2002.

15. Rybnikov P., Rybnikova L., Maksimovich N. Post mining hydrodynamics of the karst aquifers in Kizel coal basin (the West Urals, Russia) // Toward Sustainable Management of Groundwater Resources: proceedings of 4th Conference of the IAH CEG (Central European of IAH), 19–20 June, 2019, Donji Milanovac, Serbia, 2019. pp. 70–71.

16. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Ecological and Hydrogeological Problems of the Old Industrial Regions of the Middle Urals (Russia) IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 272 022209. 2019. doi:10.1088/1755–1315/272/2/022209 **MIAB**

REFERENCES

1. Ezhov Ju.A. *Karst i gidrogeologija Kizelovskogo ugilnogo rajona v svjazi s otrabotkoj glubokih gorizontov mestorozhdenij* [Karst and hydrogeology of the kizelovsky coal area in connection with the development of deep horizons of deposits]: diss. kand. geol.-min. nauk. AN SSSR, Uralskij filial, Kungurskij stacionar, 1962. 237 p. [In Russ]

2. Kopilov I.S. *Podzemnije vodi zapadnogo sklona Srednego Urala i ih perspective dlja vodosnabzhenija* [Underground waters of the Western slope of the Middle Urals and their prospects for water supply]. *Mezhdunarodnij zhurnal prikladnih i fundamentalnih issledovanij*. 2015. no 6–3. pp. 460–464. [In Russ]

3. Maksimovich N., Pyankov S. *Kizelovskij ugol'nyj bassejn: ekologicheskie problemy i puti resheniya* [The Kizel coal basin: ecological problems and solutions]. Perm state university, Perm, 2018. 288 p. [In Russ]

4. Scherbakov O.A., Scherbakova M.V., Golovin V.P. Gosudarstvennaya geologicheskaya karta SSSR masshtaba 1:200000. Seriya Permskaya. Listy O-40-X i O-40-XYI. Permskij filial FGU «TFI po Privolzhskomu federal'nomu okrugu». 1989. [In Russ]

5. Imajkin A.K., Imajkin K.K. *Gidrogeologicheskije uslovija Kizelovskogo ugilnogo bassejna vo vremja i posle okonchaniya ego ekspluatacii, prognos ih izmenenij* [Hydrogeological conditions of the Kizel coal basin during and after its operation, forecast of their changes]. Perm. gos. nats. issl. un-t. Perm, 2013. 112 p. [In Russ]

6. Chiang W.H., Kinzelbach W. 3D-Groundwater Modeling with PMWIN. First edition. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2001. 346 p.

7. Zheng C., Wang P.P. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional MultiSpecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide, Report no : SERDP-99–1, U.S. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS. 1999.

8. Kornilkov S.V., Rybnikov P.A., Vedernikov A.S., Panzhin A.A. On the concept of creating a geoinformation system « Safety of natural and subsurface use». *MIAB. Mining Inf. Anal. Bull.* 2017. no 523. C. 32–42. [In Russ]

9. Rybnikova L.S., Rybnikov P.A. Hydrogeological research in mining at the post-operational stage. *Geoecologija. Inzhenernaja geologija. Gidrogeologija. Geokriologija*. 2018. no 4. pp. 25–39. [In Russ]

10. Maksimovich N., Khmurchik V., Demenev A., Sedinin A., Berezina O. The General Concept of Kizel Coal Basin Remediation. Mine Water: Technological and Environmental Challenges: proceedings of International Mine Water Association Conference 2019, 15–19 July 2019, Perm, Russia, 2019. pp. 736–740.

11. Skousen, J., Zipper, C.E., Rose, A., Ziemkiewicz P.F., Nairn R., McDonald L.M., Kleinmann R.L. Review of Passive Systems for Acid Mine Drainage Treatment (2017). *Mine Water Environment*. V 36. pp. 133–153.

12. Wolkersdorfer, C. Water Management at Abandoned Flooded Underground Mines. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2008. 465 p.

13. Pecherkin I.A. *Podzemnije i shahtnije vodi Kizelovskogo ugilnogo bassejna* [Underground and mine waters of the Kizel coal basin]: diss. kand. geol.-min. nauk. G. Molotov, 1955. Molotovskij gosudarstvennij gosudarstvennij universitet im. A.M. Gorkogo. 313 p. [In Russ]

14. Gerasimenko N.G. *Otsenka obespechennosti naselenija Permskoj oblasti resursami podzemnih vod dlja hosajstvenno-pitjevogo vodosnabzhenija (II etap)* [Assessment of the provision of the population of the Perm region with underground water resources for household and drinking water supply (stage II)]. Perm, Moskva, «GIDEC». 2002. [In Russ]

15. Rybnikov P., Rybnikova L., Maksimovich N. Post mining hydrodynamics of the karst aquifers in Kizel coal basin (the West Urals, Russia). Toward Sustainable Management of Groundwater Resources: proceedings of 4th Conference of the IAH CEG (Central European of IAH), 19–20 June, 2019, Donji Milanovac, Serbia, 2019. pp. 70–71.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Рыбников Петр Андреевич^{1,2} — канд. геол.-минерал. наук, зав. Лабораторией геоинформационных и цифровых технологий в недропользовании, доцент кафедры инженерной экологии, ribnikoff@yandex.ru,

*Рыбникова Людмила Сергеевна*¹ — докт. геол.-минерал. наук, главный научный сотрудник лаборатории экологии горного производства, luserib@mail.ru,

*Максимович Николай Георгиевич*³ — канд. геол.-минерал. наук, заместитель директора по научной работе, nmax54@gmail.com,

*Деменев Артем Дмитриевич*³ — канд. геол.-минерал. наук, старший научный сотрудник лаборатории геологии техногенных процессов, demenevartem@gmail.com,

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

² Уральский государственный горный университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30,

³ Естественнонаучный институт «Пермский государственный национальный исследовательский университет», г. Пермь, Россия, 614990, ул. Генкеля 4.

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ribnikov P.A.^{1,2}, Cand. Sci. (Eng.), head of the laboratory of geoinformation and digital technologies in subsoil use, ribnikoff@yandex.ru,

*Ribnikova L.S.*¹, Dr. Sci. (Geol. Mineral.), chief researcher, the laboratory of mining ecology, luserib@mail.ru,

*Maksimovich N.G.*³, Cand. Sci. (Eng.), deputy director, nmax54@gmail.com,

*Demenev A.D.*³, Cand. Sci. (Eng.), senior researcher of environmental protection laboratory, dememenvartem@gmail.com,

¹ Institute of Mining UB RAS, 620075, Russia, Ekaterinburg, Mamin-Sibiriyak st., 58,

² Ural State Mining University, 620144, Ekaterinburg, Kuybyshevst., 30,

³ Natural Sciences Institute of Perm state university, 614990, Russia, Perm, Genkel st. 4.

Получена редакцией 21.11.2019; получена после рецензии 13.03.2020; принята к печати 20.03.2020.

Received by the editors 21.11.2019; received after the review 13.03.2020; accepted for printing 20.03.2020.

