

ОСОБЕННОСТИ ТЕХНОГЕННОГО МИНЕРАЛООБРАЗОВАНИЯ В УСЛОВИЯХ КИЗЕЛОВСКОГО УГОЛЬНОГО БАССЕЙНА

В настоящее время на отдельных месторождениях Кизеловского угольного бассейна формирование химического состава трещинно-карстовых вод визейско-башкирского горизонта находится под влиянием разгрузки кислых шахтных вод затопленных горных выработок. Хорошая гидравлическая связь между подземными и шахтными водами определяет разгрузку шахтных вод в горизонты подземных вод через водопроводящие трещины естественного и техногенного происхождения, незатрапонируемые скважины и горные выработки [4, 6]. Загрязненные таким образом подземные воды часто приобретают состав, близкий шахтным водам. Закарстованные карбонатные породы, широко представленные на территории бассейна (около 80% площади), с одной стороны, определяют повышенную уязвимость подземных вод к загрязнению, с другой – способствуют частичной нейтрализации кислых шахтных вод.

В настоящей работе на основе физико-химического моделирования выявлена степень равновесия незагрязненных и загрязненных подземных вод с минералами водовмещающих горных пород, а также с минералами, характерными для условий окисления сульфидов.

В гидрогеологическом отношении [2] с угленосной толщей, относящейся к нижней и средней части визейского яруса (C_{1V1-2}), связан спорадически обводненный водупорный западноуральский комплекс. В надугольной толще выделяются водоносный визейско-башкирский горизонт и водоносный среднекаменноугольно-нижнепермский комплекс. Визейско-башкирский горизонт трещинно-карстовых вод является наиболее водообильным и используется для водоснабжения городов Кизел и Гремячинск. В то же время воды горизонта находятся в зоне влияния затопленных горных выработок и подвержены воздействию шахтных вод. В табл. 1 представлены усредненные данные химического состава указанных водоносных подразделений.

Таблица 1

Химический состав подземных и шахтных вод Кизеловского бассейна

Водный раствор*	pH	Среднее содержание, мг/л											Источник	
		Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺ (Na+K)	K ⁺	HCO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	Cl ⁻	SiO ₂	Fe _{общ}	Al ³⁺	Mn ²⁺		M**
1	7.3	45.2	10.6	4.2	-	169.2	23.2	5.4	10.2	нд	нд	нд	268	[2]
1а	7.3	127	27.6	3.2	0.95	222	189	28	нд	0.26	0.02	0.007	597	[4]
2	7.3	40.4	10.3	6.6	-	128.6	9.1	6.5	10.6	нд	нд	нд	230	[2]
3	2.7	148	59	330.2	-	отс.	3604	18.0	нд	548	166.0	нд	4550	[5]
4	3.4	262	194	10.2	23.6	отс.	4661	19.7	нд	1817	102.8	22.1	7114	[4]
5	6.0	531	510	9.8	16.6	513.0	5118	21.8	нд	1750	2.3	32.3	8506	[4]

* 1, 1а – визейско-башкирский водоносный горизонт (C_{1V} - C_{2b}); 2 – водоносный горизонт угленосной толщи (C_{1zu}); 3 – кислые шахтные воды; 4 – изливы на поверхность кислых шахтных вод и близкие по составу источники разгрузки подземных вод водоносного горизонта угленосной толщи; 5 – источники разгрузки подземных вод визейско-башкирского горизонта, загрязненных шахтными водами; ** - минерализация воды.

В природном состоянии подземные воды угольной толщи и визейско-башкирского водоносного горизонта имеют HCO₃-Ca-Mg, HCO₃-Ca, в меньшей степени HCO₃-SO₄-Ca-Mg состав. Значения pH близки к нейтральным. Шахтные воды по ани-

онному составу исключительно сульфатные. В катионном составе вод на первый план, наряду с кальцием, выходят железо и алюминий. Преобладающими геохимическими типами здесь являются воды $\text{SO}_4\text{-Fe}$, $\text{SO}_4\text{-Fe-Ca}$, $\text{SO}_4\text{-Fe-Al}$, $\text{SO}_4\text{-Fe-Mg}$, $\text{SO}_4\text{-Ca-Fe}$ и другого катионного состава ($\text{pH}_{\text{ср}} = 3$).

Разгрузка подземных вод визейско-башкирского водоносного горизонта, загрязненных шахтными водами, происходит на участках рельефа, в основном приуроченных к долинам рек в местах выхода на поверхность карбонатных пород визейского яруса [3, 4, 6]. Геохимический тип вод $\text{SO}_4\text{-Fe-Mg}$, $\text{SO}_4\text{-Ca-Mg-Fe}$. Данные воды характеризуются составом, близким к шахтным, в то же время содержание SO_4^{2-} (%-экв.) ниже, чем в шахтных. Воды отличаются слабокислой реакцией среды со средним значением $\text{pH}=6.0$. Содержание Ca^{2+} , Mg^{2+} , HCO_3^{3-} в водах источников значительно выше, чем в шахтных или незагрязненных подземных.

Система «вода – горная порода» является равновесно-неравновесной. Водный раствор всегда неравновесен с отдельными минералами, но одновременно равновесен с другими, что определяет способность воды непрерывно растворять одни минералы и формировать другие [8]. Для определения равновесия подземных вод с минералами в настоящей работе был применен индекс насыщения (SI), для определения которого предварительно рассчитывались ионная сила раствора, коэффициент активности вещества и ионная активность.

Ионная сила (I) рассмотренных в работе шахтных вод в среднем составляет 0.10 (max. 0.33), что допускает применение для расчета коэффициента активности вещества модели Дебая – Хюккеля (2) [1]:

$$I = 0.5 \sum m_i \times z_i^2, \quad (1)$$

где m_i – молекулярная масса иона, z_i – заряд иона.

$$\log \gamma_i = \frac{-Az_i^2 \sqrt{I}}{1 + a_i B \sqrt{I}}, \quad (2)$$

где γ_i – коэффициент активности, I – ионная сила раствора, z_i – заряд иона, A и B – константы, зависящие от $t^\circ\text{C}$ раствора, a_i – эффективный диаметр иона.

Ионная активность IAP рассчитывается по формуле (3):

$$IAP = (a_K)^x (a_T)^y \quad (3)$$

где $a = \gamma m$; m – концентрация иона в молях.

Индекс насыщения минералов (SI) определяется на основе уравнения (4):

$$SI = \log(IAP/K_{sp}), \quad (4)$$

где K_{sp} – константа растворимости.

Если индекс насыщения (SI) близок к нулю, раствор находится в равновесии с данным минералом, если SI меньше нуля – вода растворяет данный минерал. Соответственно, если значение SI больше нуля, раствор насыщен относительно данного минерала, происходит его формирование.

В качестве расчетной базы был использован геохимический код PHREEQC 3.0 (авторы D.Parkhurst и T.Appelo) с базой термодинамических данных WATEQ4F [9]. Исходными данными для расчетов SI послужили результаты химических анализов подземных и шахтных вод, представленные в работах [4, 5]. При физико-химическом моделировании наряду с данными химического состава были заданы температура, pH, Eh и парциальное давление CO_2 .

Результаты расчетов равновесия водных растворов с минералами. Незагрязненные подземные воды визейско-башкирского горизонта ($\text{pH}=7,3$), связанные с закарстованными карбонатными породами, насыщены окислами и гидроокислами Fe и Al. Находятся в равновесии с силикатными (кварц, халцедон) и алюмосиликатными минералами (мусковитом, каолинитом, монтмориллонитом и иллитом). В то же время воды недонасыщены к карбонатным и сульфатным минералам и находятся в состоянии, близком к равновесию с кальцитом.

Шахтные воды в условиях сильноокислой и кислой среды глубоко неравновесны с карбонатными минералами. В зависимости от величины рН шахтные воды достигли равновесия с ярозитом, близки к равновесию с джурбанитом. Формируются окислы и гидроокислы железа – гетит и гематит.

Загрязненные подземные воды визейско-башкирского горизонта формируются в результате смешивания с шахтными водами и взаимодействия с минералами водовмещающих карбонатных пород. Они недонасыщены по отношению к кальциту и доломиту, но насыщены к сидериту, формирование которого осуществляется в этих условиях. Воды достигли равновесия с гипсом, который начинает выпадать из раствора, и находятся в большей степени насыщения к сульфатным минералам (ярозиту, джурбаниту и алууниту), чем кислые шахтные воды. В этих условиях (рН = 6) происходит и осаждение гидроокислов Fe и Al (гиббсит).

На участках разлива шахтных вод и разгрузки родников подземных вод, значительно загрязненных шахтными водами, формируются ярозит и гидроокислы железа, что подтверждается данными натурных определений минералогического состава [7].

Для карбонатных минералов (кальцита, доломита, сидерита) и гидроокислов (гибсит и гидроокислы железа) характерна прямая зависимость степени насыщения вод к этим минералам от величины рН. Для других учтенных при моделировании минералов такой прямой зависимости не наблюдается, что свидетельствует о значительном влиянии, наряду с рН, других факторов.

Выполненные исследования могут быть использованы для прогноза изменения состава подземных и шахтных вод при их смешивании, выбора искусственных геохимических барьеров, оценки уязвимости подземных вод.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Алексеев В.А.* Геологическая эволюция и самоорганизация системы водопорода: в 5 т. Т. 1 / Алексеев В.А. и др. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
2. Гидрогеологическая карта СССР масштаба 1:200 000, лист 0-40-X // Отчет Пермской гидрогеологической партии по результатам гидрогеологической съемки за период 1966–1968 гг. – Пермь, 1968.
3. *Имайкин К.К.* Изменение гидрогеологической обстановки при ликвидации шахт Кизеловского угольного бассейна / Имайкин К.К., Баньковская В.М., Бурковская А.В. // Гидрогеология и карстоведение. – Вып. 14. – Пермь, 2002. – С. 145–150.
4. *Имайкин А.К.* Гидрогеологические условия Кизеловского угольного бассейна во время и после окончания его эксплуатации, прогноз их изменений: монография / Имайкин А.К., Имайкин К.К. – Пермь: Перм. гос. нац. исслед. ун-т, 2013. – 112 с.
5. *Максимович Н.Г.* Техногенные изменения геологической среды Кизеловского района / Максимович Н.Г., Блинов С.М., Малеев Э.Е. // Вопросы физической географии и геоэкологии Урала: межвуз. сб. научн. тр. – Пермь, 1994. – С. 32–39.
6. *Неволин Н.В.* Экологическая ситуация в Кизеловском бассейне после ликвидации угольных шахт / Неволин Н.В., Лыхин П.А., Горшков В.А., Грищенко Г.Т. // Известия вузов. Горный журнал. – 2008. – № 5. – С. 32–37.
7. *Осовецкий Б.М.* Природно-техногенные осадки / Осовецкий Б.М., Меньшикова Е.А. – Пермь: Изд-во Перм. ун-та, 2006. – 208 с.
8. *Шварцев С.Л.* Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
9. *Ball J.W.* User's manual for WATEQ4F with revised data base / Ball J.W., Nordstrom D.K. // U.S. Geol. Surv. Open-File Report. – 1991. – P. 91–183.