Механизмы формирования и особенности состава подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт России и Украины

Тарасенко И.А.^{1,2}, Зиньков А.В.²

¹Дальневосточный геологический институт Дальневосточного отделения Российской академии наук, г. Владивосток, Россия, tarasenko_irina@mail.ru;

²Дальневосточный федеральный университет, Владивосток, Россия, zinkov_a@mail.ru

АННОТАЦИЯ. Изучены механизмы формирования и особенности состава подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт России и Украины. С помощью физико-химического моделирования показано, что особенности геохимии подземных вод носят преимущественно естественно-природный характер, находятся в тесной зависимости от геологического строения осадочных бассейнов, определяются соотношением реагирующих масс воды и породы, закрытостью-открытостью системы относительно O₂ и CO₂, строго коррелируются с наличием в угольных и надугольных толщах морских, соленосных и пресноводных групп геологических формаций.

Compositional features and formation mechanisms of ground waters at the site of spent coal mines of Russia and Ukraine

Tarasenko I.A.^{1,2}, Zinkov A.V.²

¹Far East Geological Institute, Far Eastern Branch of the Russian Academy of Sciences, Vladivostok, Russia, tarasenko_irina@mail.ru;

²Far Eastern Federal University, Vladivostok, Russia, zinkov_a@mail.ru

ABSTRACT: Ground water at the sites of spent coal mines in Russia and Ukraine has been thoroughly studied to understand their formation mechanism and compositional features. Physicochemical modelling showed that the waters geochemistry was predominantly natural, closely related to the geological structure of coal fields. The water composition is determined by the water-rock interaction, closedness or openness of this system to O₂ and CO₂ supply, and is in a strict correlation with the presence in the coal-bearing strata and the overlying rocks of marine, salt and freshwater-bearing groups of geological formations.

ВВЕДЕНИЕ

В течение последних десятилетий многие угольные и металлургические шахты были закрыты по экономическим или политическим причинам как в России, так и во всем мире [4; 5; 12; 13]. Эти закрытия привели к различным воздействиям на окружающую среду, которые включают повышение уровня грунтовых вод из-за прекращения откачки поступающих в горную выработку вод, подтопление низинных участков и, как следствие, деформацию зданий и сооружений, провалы земной поверхности [6; 17], повышенные выбросы шахтных газов на земную поверхность [3], загрязнение подземных вод, разгрузка (излив) подземных вод и загрязнение поверхностных водотоков часто имеющих рыбохозяйственное значение [7; 8; 16]. Все проблемы серьезны, но наиболее острыми являются воздействия процессов, происходящих в затопленных горных выработках, на гидрогеологическую среду.

Исследования, проведенные учеными ранее [1; 2; 10; 11; 14; 15] показали, что содержание различных компонентов в подземных водах в основном контролируется выщелачиванием минеральных веществ в водоносные горизонты,

наличием в водовмещающих породах тех или иных элементов и их соосаждением с новообразованными (водородными) минералами. Тем не менее, глубокое понимание механизмов и контроль за геохимией шахтной воды, особенностями ее состава, остается приоритетной задачей.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ

Работа основана на непрерывном, методологически и технически стандартизированном процессе наблюдений и измерений показателей, характеризующих особенности затопления угольных шахт, а также флуктуации составов подземных и поверхностных вод.

Опорными районами исследования выбраны угольные бассейны Приморского края (Раздольненский, Партизанский, Угловский) и Сахалинской области. Привлечены также гидрогеохимические материалы по таким крупным угольным бассейнам России и Украины, как Донецкий, Кизеловский, Кузнецкий, Печорский и Челябинский.

Аналитические исследования выполнялись в Аналитическом центре Дальневосточного геологического института ДВО РАН. Определение

содержаний элементов в водах реализовано методами масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре Agilent 7700 (Agilent Technologies, США) и атомно-эмиссионной спектрометрии с индуктивно связанной плазмой на спектрометре iCAP 6500Duo (Thermo Scientific Corporation, США). Минералогические исследования выполнялись методом рентгенографического анализа на дифрактометре ДРОН-3 с монохроматизированным излучением и на микродифрактометре D8-Discover. Изучение микроморфологии и состава минеральных фаз осуществлялось на сканирующем электронном микроскопе ZEISS EVO 50XVP, оснащённом рентгеновскими энергодисперсионным спектрометром INCA Energy. При моделировании использовался программный комплекс Селектор [9], позволяющий давать формализованное описание гидрохимических процессов и выражать их в соответствующих физико-химических моделях.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате проведенных исследований установлено, что режим затопления шахт определяется особенностями гидрогеологической стратификации надугольной и угольной толщ, условиями отработки угольных пластов, величиной водопритока и емкостными характеристиками сдренированного массива.

Подземные водоносные горизонты при затоплении угольных шахт формируют гидравлически связанный техногенный водоносный комплекс, отличающийся от природного фильтрационными, уровневыми и химическими характеристиками.

Сопоставление соотношений основных ионов и катионов в подземных водах таких крупных угольных бассейнов России и Украины как: Раздольненский, Партизанский, Угловский, Сахалинский, Донецкий, Кизеловский, Кузнецкий, Печорский и Челябинский, позволило выявить наличие региональных закономерностей в распределении основных макрокомпонентов. Наиболее четко закономерность изменения макросостава прослеживается по распределению гидрокарбонатных и сульфатных ионов.

Подземным водам бассейнов, расположенным на западе России и в Украине (Челябинский, Кизеловский, Донецкий), свойственны повышенные концентрации сульфат-иона (до 100 % экв) и хлора (до 80 % экв). Содержания гидрокарбонатных ионов здесь не превышают 7 % экв, а в Кизеловском бассейне снижаются до 0 % экв.

Бассейны, расположенные восточнее (Кузнецкий, Раздольненский, Партизанский, Угловский и Сахалинский), характеризуются повышенными концентрациями гидрокарбонатов (от 30 до 100 % экв) и колебаниями содержаний сульфат-иона до 70 % экв. При этом pH вод в Раздольненском, Партизанском, Угловском (Приморье) и Сахалинском, Кузнецком, Донецком. Печорском и Челябинском бассейнах варьируется от 5,8 до 10,4, в Кизеловском бассейне – от 7,9 до 2,5.

С помощью физико-химического моделирования показано, что региональные закономерности изменения составов вод, формирующихся в районах ликвидированных шахт, определяются особенностями геологического строения осадочных бассейнов и, прежде всего, наличием в угольных и надугольных толщах морских, соленосных и пресноводных групп геологических формаций.

В Донецком, Кизеловском и Челябинском бассейнах состав вод определяется чередующимися фациями различной солености – морскими, соленосными и пресноводными. В Печорском бассейне – однородными морскими фациями, а в Кузнецком, Раздольненском, Партизанском, Угловском и Сахалинском бассейнах – пресноводными.

Имитационные модели растворения терригенно-вулканогенных (алюмосиликатных), карбонатных, гипсоносных и соленосных отложений в условиях закрытой и открытой по CO_2 и атмосферному газу системы, показали, что по мере увеличения отношения вода/порода для всех систем характерен рост минерализации водного раствора. Изменение состава подземных вод с тенденцией возрастания концентраций компонентов ведет к усложнению состава аутигенных минеральных фаз.

Система «алюмосиликатные породы–вода» последовательно продуцирует растворы, соответствующие $\text{HCO}_3\text{--Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{--Na(Mg)} \rightarrow \text{HCO}_3\text{--SO}_4\text{--Na(Mg)} \rightarrow \text{SO}_4\text{--Na(Mg)}$ ряду изменения состава. Накопление Na^+ или Mg^{+2} в ряду определяется типом пород и вносит определенную специфику в состав равновесного водного раствора. Появление сульфатных ионов в водах обусловлено наличием сульфидов. Закрытость системы по CO_2 ($P_{\text{CO}_2} = 10^{-2,0}$) всегда означает предохранение водной фазы от увеличения в ней концентрации $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ и приводит к росту (при наличии источника) содержаний SO_4^{2-} . Увеличение равновесного парциального давления CO_2 ($> 10^{-1,0}$) и уменьшение равновесной концентрации O_2 расширяет область существования в угольных бассейнах $\text{HCO}_3\text{--Na}$ типа

вод и способствует накоплению больших концентраций компонентов в водах.

Система «известняк–вода», в условиях закрытой по CO_2 и атмосферному газу, формирует пресные (минерализация $< 703,09 \text{ мг/дм}^3$) гидрокарбонатные кальциевые воды ($\text{HCO}_3\text{--Ca}$), сходные по составу с обнаруженными в природно-техногенных структурах Донецкого бассейна. Вследствие увеличения соотношения масс породы и воды наблюдается тенденция роста минерализации воды, содержания карбонатных и хлоридных ионов в направлении движения фильтрата, сохраняется концентрационный ряд типа $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na}$. Появление в составе минеральных новообразований гидромагнетита сопровождается значительным снижением концентраций магния в водном растворе. При минерализации раствора $> 1263,49 \text{ мг/дм}^3$ наблюдается трансформация $\text{HCO}_3\text{--Ca}$ типа вод в Cl--Ca .

В условиях открытой по CO_2 системы «известняк–вода» область существования $\text{HCO}_3\text{--Ca}$ типа вод расширяется, что приводит к формированию Cl--Ca типа вод уже на более поздних стадиях взаимодействия воды с породой (при минерализации $> 5002,8 \text{ мг/дм}^3$, $\text{PCO}_2 = 6,85\text{e-}01$) и образованию в последующем (при минерализации $6181,3 \text{ мг/дм}^3$, $\text{PCO}_2 = 8,135\text{e-}01$ бар и $\text{PO}_2 = 3,8746\text{e-}02$ бар) вод Cl--Mg типа. Таким образом, в результате физико-химического моделирования системы «известняк–вода» установлено, что соотношения между анионами Cl^- и HCO_3^- в водной фазе определяются балансами между PCO_2 и отношениями породы и воды. С ростом минерализации закрытая по CO_2 и атмосферному газу система «известняк–вода» последовательно продуцирует водные растворы, соответствующие $\text{HCO}_3\text{--Ca} \rightarrow \text{Cl--Ca}$ ряду изменения состава. Открытая по CO_2 система «известняк–вода» при $\text{PCO}_2 > 8,1346\text{e-}01$ бар и $\text{PO}_2 < 3,8746\text{e-}02$ бар продуцирует водные растворы, соответствующие $\text{HCO}_3\text{--Ca} \rightarrow \text{Cl--Ca} \rightarrow \text{Cl--Mg}$ ряду изменения состава.

В условиях закрытой по CO_2 и атмосферному газу система «доломиты–вода» последовательно продуцирует водные растворы, соответствующие $\text{HCO}_3\text{--Mg} \rightarrow \text{Cl--Mg}$ ряду изменения состава.

Закрытая по CO_2 и атмосферному газу система «гипс–вода» при отношении масс породы и воды равном $0,004$ формирует $\text{SO}_4\text{--Ca}$ воды с минерализацией до $1773,97 \text{ мг/дм}^3$, насыщенные к гипсу. В условиях открытой по CO_2 системы ($\text{CO}_2 = 0,06 - 1,00 \text{ кг/л}$ $\text{кгH}_2\text{O}$) продуцируются растворы, соответствующие $\text{SO}_4\text{--Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{--Ca}$ ряду изменения состава.

Система «каменная соль–вода» закрытая по CO_2 и атмосферному газу продуцирует весьма кислые и кислые ($\text{pH} = 0,81\text{--}3,80$) воды Cl--Na типа с минерализацией $1054,84\text{--}34048,36 \text{ мг/дм}^3$. При этом открытие системы по CO_2 существенного влияния на состав водной фазы не оказывает.

Таким образом, состояние неравновесности в растворах и преобразования химического состава подземных вод в природно-техногенных структурах шахт угольных бассейнов поддерживают главным образом физико-химические особенности таких элементов и соединений, как CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- , H_3O^+ , H_2CO_3 , SO_4^{2-} и Cl^- . Появление сульфатов в водах угольных бассейнов, надугольная толща которых сложена алюмосиликатными терригенными или вулканогенно-терригенными породами, связано, главным образом, с сернистостью углей. Источником сульфатного типа вод в бассейнах, надугольная толща которых сложена морскими карбонатно-терригенными породами, являются преимущественно сульфатные минералы осадочных пород – гипс, ангидрит и др. Формирование вод гидрокарбонатного класса, также имеет литогенную природу. Воды хлоридного класса в природно-техногенных структурах формируются в результате растворения соленосных (галит) и карбонатных (известняк, доломит) отложений.

Кислые воды в рассматриваемых бассейнах образуются тогда, когда количество CO_2 в растворе начинает превышать количество HCO_3^- , а рост концентрации водородного иона приводит к образованию угольной кислоты. При этом воды с $\text{pH} = 2\text{--}4$ имеют преимущественно смешанный катионный состав. В диапазоне $\text{pH} = 4\text{--}6$ они приобретают кальциевый (магниево-кальциевый) состав, а при $\text{pH} > 8,0$ становятся натриевыми.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате изучения механизмов формирования и особенностей состава подземных вод, основанного на систематическом гидрогеохимическом контроле и физико-химическом моделировании процессов, происходящих в районах ликвидированных угольных шахт Донецкого, Кизеловского, Кузнецкого, Печорского, Челябинского, Партизанского, Раздольненского, Угловского и Сахалинского бассейнов, установлено следующее:

– Особенности геохимии подземных вод районов ликвидированных угольных шахт носят преимущественно естественно-природный характер и являются результатом химических процессов в системе «вода–порода–газ».

– Состав вод техногенных комплексов находится в тесной зависимости от особенностей геологического строения осадочных бассейнов, стратиграфического расположения природно-техногенных структур и строго коррелируется с наличием в угольных и надугольных толщах морских, соленосных и пресноводных групп геологических формаций.

– Состояние неравновесности в растворах и преобразования химического состава подземных вод поддерживают главным образом физико-химические особенности таких элементов и соединений, как CO_2 , HCO_3^- , CO_3^{2-} , OH^- , H_3O^+ , H_2CO_3 , SO_4^{2-} и Cl^- , а также отношение реагирующих масс воды и породы и закрытость-открытость системы относительно O_2 и CO_2 . pH диапазон геохимической трансформации подземных вод определяется карбонатным равновесием и устанавливает соотношение между концентрациями Ca^{2+} , Mg^{2+} и Na^+ в подземных водах бассейнов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геологическая эволюция и самоорганизация системы «вода–порода»: в 5 т. Т. 1. Система «вода–порода» в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование / В.А. Алексеев [и др.]; отв. ред. С.Л. Шварцев; ОИГГМ СО РАН [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005. – 244 с.
2. Геологическая эволюция и самоорганизация системы «вода–порода»: в 5 т. Т. 2. Система «вода–порода» в условиях зоны гипергенеза / С.Л. Шварцев [и др.]; отв. ред. Б.Н. Рыженко; ИНГ СО РАН [и др.]. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2007. – 389 с.
3. Коровицкая Е.В. Последствия появления шахтных газов на поверхности после ликвидации угольных шахт юга Приморья // Вологдинские чтения, 2012. – № 80. – С. 271-273.
4. Максимович Н.Г., Пьянков С.В. Кизеловский угольный бассейн: экологические проблемы и пути решения. – Пермь: Изд-во Перм. гос. нац. исслед. ун-та, 2018. – 288 с.
5. Тарасенко И.А. Геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт. – М.: ГЕОС, 2018. – 247 с.
6. Тарасенко И.А. О состоянии окружающей природной среды в районах ликвидированных угольных шахт (на примере Партизанского района Приморского края) // Вестник ДВО РАН, 2010. – № 3. – С. 113-118.
7. Тарасенко И.А., Зиньков А.В. Геохимические особенности состава подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт Приморского края и Сахалинской области // Горный информационно-аналитический бюллетень, 2014. – № S424. – С. 56-64.
8. Тарасенко И.А., Зиньков А.В. Изотопно-геохимические особенности состава подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт Приморья // Материалы III Всероссийской научной конференции с международным участием «Геологическая эволюция взаимодействия воды с горными породами». – 20-25 августа 2018 г. – Чита, 2018. – С. 315-318.
9. Чудненко К.В., Карпов И.К. Краткая инструкция «Селектор-Windows – программное средство расчета химических равновесий минимизаций термодинамических потенциалов». Иркутск, 2003. – 90 с.
10. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. – М.: Недра, 1998. – 366 с.
11. Шварцев С.Л. Фундаментальные механизмы взаимодействия в системе вода–горная порода и ее внутренняя геологическая эволюция // Литосфера, 2008. – № 6. – С. 3-24.
12. Alhamed M., Wohnlich S. Environmental impact of the abandoned coal mines on the surface water and the groundwater quality in the south of Bochum, Germany // Environ Earth Sci, 2014. V. 72. – P. 3251-3267.
13. Cheong Y.W., Yim G.-J., Ji S.W., Kang S.S., Skousen J. Water quality changes of a closed underground coal mine in Korea // Environ Monit Assess, 2012. – V. 184. – P. 503-513.
14. Fee J.A., Gaudette H.E., Lyons W.B., Long D.T. Rare earth element distribution in the Lake Tyrrel groundwaters, Victoria, Australia // Chem. Geol., 1992. – V. 96. – P. 67-93.
15. Smedley P.L. The geochemistry of the rare earth elements in groundwater from the Carnmenellis area, southwest England // Geochim. Cosmochim. Acta, 1991. – V. 55. – P. 2767-2779.
16. 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, N 55. – <https://doi.org/10.1007/s11270-018-3718-0>.
17. Yao X.L., Reddish D.J. Analysis of residual subsidence movements in the UK coalfields // Q J Eng Geol, 1994. – V. 27(1). – P. 15-2.