

УДК 556.3: 550.42

СОВРЕМЕННЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШАХТНЫХ ВОД В ВОСТОЧНОМ ДОНБАССЕ**Гавришин А.И., Борисова В.Е., Торопова Е.С.***Южно-Российский государственный политехнический университет имени М.И. Платова, Новочеркасск, e-mail: agavrishin@rambler.ru*

В работе выполнен анализ гидрогеохимической информации с привлечением широкого арсенала математико-статистических методов. Описаны закономерности формирования химического состава шахтных вод Восточного Донбасса по результатам обобщения данных за столетний период. Выявлен волнообразный характер изменений состава вод. Выделены и детально охарактеризованы четыре основных направления изменения состава вод до и после массовой ликвидации угольных шахт. После ликвидации шахт произошло коренное изменение направлений и процессов формирования химического состава шахтных вод. Резко сократился приток подземных вод со значительных глубин, в шахты поступают грунтовые и поверхностные воды, существенно обогащенные кислородом и вызывающие развитие процессов окисления, выщелачивания и растворения серы и вмещающих пород. Эти воды образуют обширные потоки загрязнения поверхностных и подземных вод, что требует проведения реабилитационных мер во всех компонентах окружающей среды.

Ключевые слова: Восточный Донбасс, химический состав, шахтные воды**THE MODERN FEATURES OF FORMATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF MINE WATERS IN EASTERN DONBASS****Gavrishin A.I., Borisova V.E., Toropova E.S.***Platov South-Russian State Polytechnical University, Novocherkassk, e-mail: agavrishin@rambler.ru*

In work the analysis of hydrogeochemical information with engaging of a wide arsenal of mathematical-statistical methods is made. Regularities of formation of chemical composition of mine waters of Eastern Donbass by results of synthesis of data for the centenary period are described. The wavy nature of changes of composition of waters is revealed. Four main directions of change of composition of waters before mass elimination of coal mines are allocated and in details characterized. After elimination of mines there was a basic change of the directions and processes of formation of chemical composition of mine waters. Inflow of underground waters from the considerable depths was sharply reduced, the ground and surface water significantly enriched with oxygen and causing development of processes of oxidation come to mines, lixiviations and disolutions are gray and the containing rocks. These waters form extensive streams of pollution of the surface and underground water that demands carrying out rehabilitation measures in all components of a environment.

Keywords: Eastern Donbass, chemical composition, mine water

В Восточном Донбассе длительная отработка угольных месторождений и функционирование водопонижительных систем привели к значительному преобразованию гидрогеологических и гидрогеохимических условий на больших территориях. Изменяется режим и баланс подземных вод, происходит трансформация химического состава природных вод с образованием минерализованных шахтных вод, загрязнение поверхностных водотоков, развитие процессов консолидации и уплотнения пород и многие другие негативные явления и процессы.

Массовое закрытие угольных шахт в Восточном Донбассе вызвало многие отрицательные процессы и последствия: оседание земной поверхности и деформация горных пород, подтопление территорий и породных отвалов, формирование высокоминерализованных вод и интенсивное загрязнение природных, выделение «мертвого воздуха» и другие.

Эти негативные факторы вызвали интенсивную деформацию и разрушение сооружений, производственных и жилых зданий, что потребовало переселения части населения на безопасные территории. Возникли проблемы в многих компонентах окружающей среды: воздушной, водной, биологической, геологической и социальной [1–5].

Материалы и методы исследования

Для изучения закономерностей формирования химического состава шахтных вод Восточного Донбасса привлечено более 1700 анализов за период от 1920 до 2015 г. Около 1000 анализов относятся к действовавшим и действующим шахтам и более 700 анализов отобрано во время ликвидации угольных шахт и после ликвидации. По грунтовым водам использовано более 1200 анализов за период с 1950 по 2015 г. [1, 4, 6, 7].

Анализ информации выполнен с привлечением широкого комплекса математи-

ко-статистических методов: интервальная оценка параметров, проверка гипотез (статистические критерии), корреляционный и регрессионный анализы, использован оригинальный G-метод классификации многомерных наблюдений (выделения однородных совокупностей – таксонов), основанный на критерии Z-квадрат (Гавришина), детальное описание которого можно найти в ряде публикаций [1, 5]. G-метод реализован в виде компьютерной технологии AGAT-2, позволяющей автоматически строить классификации многомерных наблюдений различного уровня детальности, и успешно применён для изучения природных и природно-антропогенных систем [5].

Сопоставлением, выделенных автоматически на компьютере однородных таксонов, обнаружены и количественно описаны закономерности формирования химического состава шахтных вод региона, частично охарактеризованные в настоящей работе.

При анализе данных использованы названия типов вод по классификации О.А. Алекаина. В название вод по химическому составу включаются компоненты с содержанием более 25 %-молей и располагаются в порядке возрастания содержаний.

Результаты исследования и их обсуждение

Для изучения современных особенностей формирования химического состава шахтных вод в Восточном Донбассе выполнено сравнение основных направлений и генезиса изменений состава вод в 1992 г. перед периодом массовой ликвидации шахт региона и в 2015 г. после завершения ликвидации. Состав вод в 1992 г. характеризовался относительно высокой изменчивостью, и в среднем это воды хлоридно-сульфатные

натриевые второго типа (отдельные пробы – первого и четвёртого типов). С величиной минерализации сильная корреляционная связь обнаружена для Na, далее по мере убывания тесноты связи компоненты располагаются в следующий ряд: Cl, SO₄, HCO₃, Mg.

С помощью G-метода последовательного классификационного анализа по компьютерной программе АГАТ-2 были выделены четыре главных геохимических направления изменения химического состава шахтных вод, характеристика которых приведена в табл. 1.

Первое направление характеризуется преобразованием исходных гидрокарбонатно-сульфидных вод в кислые (рН до 2,0) сульфатные воды с высокими содержаниями Fe, Mn, Al, Cu и других металлов и обусловлено интенсивным развитием процессов окисления, выщелачивания и растворения серы (содержание серы в углях и во вмещающих породах составляет в основном 1,5–6%, в донецких углях в среднем 3,5%).

По второму геохимическому направлению образуются хлоридно-сульфатные нейтральные воды, в незначительной степени обогащенные Fe и Mn. Теперь, наряду с процессами окисления серы, приблизительно равную роль начинают играть процессы увеличения концентраций хлор-иона за счет притока хлоридных подземных вод при углублении угольных шахт.

Третье геохимическое направление изменения состава шахтных вод фиксирует преобразования гидрокарбонатно-сульфатных вод в сульфатно-хлоридные. На первое место выходит процесс роста концентрации Cl за счет притока хлоридных подземных вод при отработке глубоких шахтных горизонтов. Рост концентрации SO₄ и процесс окисления сульфидов переходит на второе место.

Таблица 1

Средний химический состав шахтных вод в 1992 г. по главным гидрогеохимическим направлениям изменения состава (мг и %-моль)

Направление	pH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	Fe	M
1	6,0	360	2515	266	349	205	730	11,1	4450
		9	80	11	26	26	48		
2	7,6	516	1577	730	290	138	873	3,4	4235
		14	53	33	23	18	59		
3	7,8	487	1489	1396	179	124	1370	1,6	5055
		10	40	50	11	13	76		
4	7,6	1217	1105	885	107	84	1350	1,1	4566
		29	34	37	8	10	82		

По четвертому геохимическому направлению изменения химического состава шахтных вод образуются оригинальные содовые гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридные и хлоридные натриевые воды с высокими содержаниями HCO_3 и очень низкими Са и Mg. Типоморфными компонентами четвертого направления являются содержания HCO_3 и Cl (высокие содержания), а также Са и Mg (низкие содержания). Ведущую роль играет приток содовых подземных вод, которые формируются в результате испарительно-конденсационных процессов в водоуглеродной газовой фазе (обратная геохимической зональности подземных вод региона). В районе угольных шахт, где образуются содовые воды четвертого направления, наиболее высоки перспективы обнаружения нефтегазовых скоплений, например, в структурах Гуково-Зверевского угленосного района [1, 5]. Важно отметить, что в пределах Восточного Донбасса в северной зоне мелкой складчатости уже обнаружены перспективные нефтегазопоявления [8–10].

Рассмотрим общие закономерности формирования химического состава шахтных вод Восточного Донбасса за столетний период с 1920-х гг. до 2015 г. по результатам более 1700 анализов. Средний состав этих вод приведен в табл. 2. Во все периоды шахтные воды были сульфатными с переменным составом катионов (преимущественно на-

триевые). Анализ закономерностей изменений химического состава шахтных вод в Восточном Донбассе за столетний период показал, что этот процесс носит волнообразный характер. Наряду с периодами относительной стабилизации, установлены периоды интенсификации процессов окисления, выщелачивания и растворения. Эти процессы приводят к резкому увеличению минерализации вод и особенно содержаний сульфатов и железа (табл. 2). Такая ситуация обнаружена в шахтных водах после периодов затопления шахт во время оккупации территории в Великую Отечественную войну и после массовой ликвидации угольных шахт в 1990-е гг. [11].

Наиболее интересно рассмотреть современные закономерности изменения химического состава шахтных вод после 1992 г., когда началась массовая ликвидация угольных шахт региона, преимущественно путем затопления. Анализ данных табл. 2 показывает, что наиболее интенсивные изменения состава вод произошли в период затопления шахт. Общие тенденции изменения состава вод в среднем свидетельствуют о росте минерализации, содержаний сульфат-иона и железа и уменьшении содержаний хлорид-иона. Но в отдельных шахтах произошли резкие изменения состава вод, например в шахте Комиссаровская минерализация вод повысилась до 17–19, содержания сульфат-иона до 7 и железа до 1 г/л.

Таблица 2

Средний химический состав шахтных вод в различные периоды опробования (мг/л и %-моль, в скобках указаны содержания по ограниченному числу наблюдений)

Период	pH	HCO_3	SO_4	Cl	Ca	Mg	Na	Fe	M
1920-е гг.	6,9	183	1443	397	233	184	405	(0,1)	2840
		7	68	25	26	35	39		
1940-е гг.	4,4	25	2590	257	304	219	642	(32)	4040
		1	88	11	25	30	45		
1950-е гг.	5,2	221	2795	443	330	191	964	(52)	4947
		5	78	17	23	20	57		
1966 г.	6,7	264	1741	448	98	217	710	1,1	3500
		8	68	24	10	35	55		
1992 г.	7,5	580	1700	730	205	137	1035	3,6	4390
		15	54	31	15	17	68		
		20	60	20	15	20	65		
2002 г.	7,1	610	2372	445	223	250	886	47	4810
		16	63	21	17	26	57		
2010 г.	7,2	581	2708	425	366	254	886	35	5275
		12	73	15	36	23	41		
2015 г.	6,9	576	2812	344	287	270	940	34	5238
		12	75	13	18	29	53		

Основные изменения состава шахтных вод завершились к окончанию процесса ликвидации угольных шахт в 2005–2006 гг., и важно рассмотреть, какие же это изменения. Выполнено сравнение связей между компонентами химического состава вод на примере результатов опробования в 1992 и 2010 гг. (табл. 3 и 4).

В 1992 г., до ликвидации шахт (табл. 3), отмечаются следующие наиболее сильные связи: для минерализации (М) с Na, Cl, SO₄; между компонентами: Na–Cl,

SO₄–Mg, SO₄–Ca, HCO₃–Na; отрицательные связи pH–Ca, pH–SO₄. Это свидетельствует как о развитии процессов окисления серы, так и о значительном привносе Cl и HCO₃ при дренировании подземных вод соответствующего состава, то есть о значительной роли третьего и четвертого направлений изменений состава шахтных вод. Наличие содовых по составу шахтных вод позволило сделать вывод о перспективах открытия нефтегазовых скоплений в регионе.

Таблица 3

Значения парных коэффициентов корреляции между компонентами химического состава шахтных вод (1992 г.)

Компоненты	pH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	M
pH	1	0,27	–0,49	0,29	–0,67	–0,34	0,17	–0,11
HCO ₃	0,27	1	–0,17	0,27	–0,32	–0,16	0,50	0,39
SO ₄	–0,49	–0,17	1	–0,21	0,58	0,69	0,24	0,58
Cl	0,29	0,27	–0,21	1	–0,15	–0,16	0,78	0,6
Ca	–0,67	–0,32	0,58	–0,15	1	0,43	–0,15	0,23
Mg	–0,34	–0,16	0,69	–0,16	0,43	1	0,04	0,37
Na	0,17	0,50	0,24	0,78	–0,15	0,04	1	0,90
M	–0,11	0,39	0,58	0,6	0,23	0,37	0,90	1

Таблица 4

Значения парных коэффициентов корреляции между компонентами химического состава шахтных вод (2010 г.)

Компоненты	pH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	M
pH	1,00	–0,03	–0,55	0,13	–0,35	–0,59	–0,12	–0,46
HCO ₃	–0,03	1,00	–0,16	0,09	–0,09	–0,14	0,19	–0,05
SO ₄	–0,55	–0,16	1,00	0,04	0,42	0,84	0,65	0,95
Cl	0,13	0,09	0,04	1,00	0,23	0,21	0,49	0,34
Ca	–0,35	–0,09	0,42	0,23	1,00	0,45	0,08	0,44
Mg	–0,59	–0,14	0,84	0,21	0,45	1,00	0,38	0,84
Na	–0,12	0,19	0,65	0,49	0,08	0,38	1,00	0,79
M	–0,46	–0,05	0,95	0,34	0,44	0,84	0,79	1,00

Таблица 5

Средний химический состав шахтных вод в 2015 г. по главным гидрогеохимическим направлениям изменения состава (мг и %-моль)

Направление	pH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	Fe	M
1	6,2	368	4115	203	277	370	1214	43,8	6547
		6,2	87,9	5,9	14,2	31,6	54,2		
2	7,1	662	3045	533	288	238	1267	3,2	6033
		12,2	71,0	16,8	16,1	22,2	61,7		
3	–	–	–	–	–	–	–	–	–
		–	–	–	–	–	–		
4	7,3	445	1167	202	73	41	695	1,1	2623
		19,6	65,2	15,2	9,7	9,2	81,1		

В 2010 г. (табл. 4), после практически полного завершения ликвидации шахт отмечаются следующие наиболее сильные связи: M с SO_4 , Mg , Na ; между компонентами SO_4 – Mg , SO_4 – Na и отрицательные связи pH – Mg , pH – SO_4 . Это свидетельствует о резком усилении процессов окисления серы (наиболее высокие коэффициенты для сульфат-иона), снижении роли хлор-иона и уменьшении притоков подземных вод глубокой циркуляции, то есть об интенсификации первого и подавлении роли третьего и четвертого направлений изменения состава шахтных вод.

Сравнение результатов анализа основных направлений изменения химического состава шахтных вод по данным 1992 г. (табл. 1) и 2015 (табл. 5) полностью подтвердило сделанные выше выводы о коренном преобразовании этих направлений.

По первому направлению еще более усилились процессы окисления серы, заключенной в углях и вмещающих породах, что привело к увеличению содержаний SO_4 с 2,5 до 4,1, и Fe с 11,1 до 43,8 мг/л, а минерализации вод – с 4,4 до 6,5 г/л; несколько снизилось содержание Cl . По второму направлению также происходит резкий рост содержаний SO_4 с 1,6 до 3,0, минерализации с 4,2 до 6,0 г/л; снижается содержание Cl . Третье направление изменения состава вод, когда формировались сульфатно-хлоридные воды, вообще отсутствует. Это свидетельствует о том, что резко снизился приток подземных хлоридных вод, формирующихся по прямой геохимической зональности вод и содовых вод, образование которых связано с обратной вертикальной геохимической зональностью вод в Донбассе [2, 5]. Четвертое направление претерпело существенные преобразования: значительно уменьшилась минерализация и содержания HCO_3 , Cl и Na ; воды стали сульфатными.

Заключение

Анализ гидрогеохимической информации выполнен с привлечением широкого арсенала математико-статистических методов, оригинального критерия Z^2 и инновационного G-метода классификации многомерных наблюдений.

Описаны закономерности формирования химического состава шахтных вод Восточного Донбасса по результатам обобщения более 1700 анализов вод за столетний период (1920-х гг. до 2015 г.). Выявлен волнообразный характер изменений состава вод в указанный период. Выделены и детально охарактеризованы четыре основных направления изменения состава вод до и после массовой ликвидации угольных шахт в регионе.

Анализом корреляционных связей установлено, что в формировании состава вод в 1992 г. помимо первого направления значительную роль играют второе, третье и четвертое направления изменения состава. К 2010 г. ситуация резко изменилась: увеличилось влияние первого направления, частично сохранилось второе, практически отсутствует третье и снизилась роль четвертого.

Все перечисленные факты убедительно свидетельствуют о том, что после ликвидации угольных шахт в Восточном Донбассе произошло коренное изменение направлений и процессов формирования химического состава шахтных вод. Резко сократился приток подземных вод со значительных глубин, что привело к уменьшению содержаний хлор-иона. В шахты поступают грунтовые и поверхностные воды, существенно обогащенные кислородом и вызывающие развитие процессов окисления, выщелачивания и растворения серы и вмещающих горных пород. Эти воды имеют высокую минерализацию, преимущественно сульфатный состав, обогащены Fe , Mn , Al , Co и другими поллютантами, образуют обширные потоки загрязнения поверхностных и подземных вод. Это требует проведения в регионе эффективных реабилитационных мер во всех компонентах окружающей среды.

Список литературы

1. Gavrishin A.I., Coradini A. The origin and the formation laws of groundwater and mine water chemistry in the eastern Donbass // *Water Resources*. – 2009. – Т. 36. № 5. – С. 538–547.
2. Крайнов С.Р., Рыженко Б.Н., Швеи В.М. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты. – М.: Наука, 2004. – 677 с.
3. Zakrutkin V.E., Sklyarenko G.Y. The influence of coal mining on groundwater pollution (Eastern Donbass) // *International multidisciplinary Scientific Geo Conference Surveying Geology and Mining Ecology Management, SGEM 15th*. – 2015. – С. 927–932.
4. Гидрогеология СССР. Донбасс. – М.: Недра, 1970. – 480 с.
5. Гавришин А.И., Корadini А. Многомерный классификационный метод и его применение при изучении природных объектов. – М.: Недра, 1994. – 92 с.
6. Заяц Г.Н., Фесенко Н.Г. Шахтные воды Ростовской области // *Гидрохимические материалы*. – 1963. – Т. 35. – С. 131–134.
7. Назарова Л.Н. Шахтные воды восточной части Донецкого бассейна и некоторые вопросы происхождения их химического состава // *Гидрохимические материалы*. – 1968. – Т. 47. – С. 99–109.
8. Бобух В.А., Чихирин А.А., Тюльдин В.Н. Региональное надвигообразование северных окраин Восточного Донбасса в связи с формированиями залежей УВ // *Геология, геофизика и разработка нефтяных и газовых месторождений*. – 2004. – № 7. – С. 22–28.
9. Маломинерализованные воды глубоких горизонтов нефтегазоносных провинций / Под ред. Колодия В.В. – Киев: Наук. думка, 1985. – 280 с.
10. Суярко В.Г. Гидрогеохимические особенности подземных вод Донбасса // *Геохимия*. – 1988. – № 5. – С. 738–747.
11. Гавришин А.И. Некоторые важные закономерности формирования химического состава шахтных вод в Восточном Донбассе // *Фундаментальные исследования*. – 2014. – № 11–11. – С. 2465–2470.