

УДК 662.51: 556.3: 550.42

ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ГРУНТОВЫХ ВОД КАМЕННОУГОЛЬНЫХ ОТЛОЖЕНИЙ ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА

Гавришин А.И.

*Южно-Российский государственный политехнический университет
имени М.И. Платова, Новочеркасск, e-mail: agavrishin@rambler.ru*

Многомерные классификационные методы играют важную роль в изучении жизни, окружающей среды и общества. Классификационная технология, названная G-метод, была применена для выделения в пространстве однородных гидрогеохимических таксонов и их сравнения. Две геохимические тенденции были обнаружены в формировании химического состава подземных вод в Донецком регионе: прямая и обратная гидрогеохимическая зональность. По первой тенденции химический состав подземных вод с глубиной изменяется от гидрокарбонатных кальциевых низкой минерализации до хлоридных натриевых высокой солёности, а по второй тенденции изменяется до гидрокарбонатных хлоридно-натриевых низкой минерализации. В формировании химического состава шахтных вод с помощью классификационной технологии обнаружены четыре главных направления. По первому направлению образуются кислые сульфатные натриевые воды, по второму направлению – хлоридно-сульфатные, по третьему – сульфатно-хлоридные, по четвертому направлению формируются оригинальные гидрокарбонатно-хлоридные натриевые содовые воды. Происхождение содовых вод связано с развитием процессов испарения и конденсации водяных паров из водородной газовой фазы. За последние 60 лет существенно повысилась минерализация и содержание всех компонентов грунтовых вод.

Ключевые слова: Донбасс, химический состав, шахтные и подземные воды

REGULARITIES OF FORMATION OF GROUNDWATER CHEMICAL COMPOSITION OF COAL DEPOSITS EASTERN DONBASS

Gavrishin A.I.

*South-Russian State Polytechnical University named M.I. Platov,
Novocherkassk, e-mail: agavrishin@rambler.ru*

Multivariate classification methods are important for the investigation of life, environment and society. The classification procedure referred to as the G-mode was applied to isolate hydrogeochemical homogeneous taxons in space and compare them. Two geochemical tendency is predicted in forming of groundwater chemical composition of the Donbass region of direct and reverse hydrogeochemical zonaliti. The groundwater change chemical composition from $\text{HCO}_3^- - \text{Ca}^{2+}$ low salinity to $\text{Cl}^- - \text{Na}^+$ high salinity on first tendency and to $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{Na}^+$ low mineralized soda water on second tendency. The classification indicated that four main directions of forming composition of mine water could be isolated. The first direction is acidic $\text{SO}_4^{2-} - \text{Na}^+$ water, the second direction is $\text{Cl}^- - \text{SO}_4^{2-}$ water, the third direction is weakly alkalinity $\text{SO}_4^{2-} - \text{Cl}^-$ water, fourth direction is $\text{HCO}_3^- - \text{Cl}^- - \text{Na}^+$ soda-water. Origin of soda-water cause processes of evaporation and condensation of water from out of CH-rich gas phase. Over the past 60 years has improved significantly and the content of all components of the mineralization of ground waters.

Keywords: Donbas, chemical composition, mine and groundwater

Окружающая среда Восточного Донбасса (ВД) длительное время испытывает интенсивное антропогенное воздействие, которое значительно изменяет природный энерго-массоперенос и связано преимущественно с деятельностью угледобывающего и углеперерабатывающего комплексов. Особенно интенсивные потоки загрязнения формируются в природных водах, например в 60-е годы из угольных шахт региона на поверхность поступало 270 тыс. т растворенных веществ, а в 2010 году в долину р. Северский Донец и р. Тузлов вынос вырос до 411 тыс. т растворенных веществ. Детальная характеристика выноса растворенных веществ шахтными водами приведена в табл. 1.

В настоящей работе изучены основные закономерности и факторы формирования химического состава грунтовых вод каменноугольных отложений по результатам опробования 277 источников и колодцев за 20-летний период (50–60-е годы 20 столетия), когда угледобывающая промышленность интенсивно развивалась, и по результатам 837 анализов вод из скважин и колодцев, опробованных в 2007–2010 годах, когда большинство угольных шахт было ликвидировано; это позволило выявить закономерности изменения состава грунтовых вод региона после массовой ликвидации угольных шахт.

Таблица 1

Объем шахтных вод (млн м³/год) и вынос ими на поверхность растворенных веществ в Восточном Донбассе

Дата	Объем	Компоненты шахтных вод (тыс. т/год)						pH
		Растворенные вещества	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Fe	
1966	75	270	131	34	7,3	16	0,1	6,7
1992	90	400	155	66	18	13	0,3	7,5
1999	45	160	69	17	7	6	0,3	7,6
2002	72	304	140	33	16	14	3,4	7,1
2006	73	386	204	24	22	19	6,0	6,9
2010	78	411	211	33	28	20	6,5	7,2

Выявление и количественное описание гидрогеохимических закономерностей выполнено с применением компьютерной технологии AGAT-2, реализующей G-метод классификации многомерных наблюдений (выделение однородных совокупностей), который основан на оригинальном критерии Z² – Гавришина [2, 4, 8]. Для зависимых признаков и независимых наблюдений критерий имеет следующий вид:

$$Z^2 = \frac{M}{\sum_{sk} r_{sk}^2} \cdot \sum_{ij} \frac{MN (X_{ij} - \bar{X}_j)^2}{S_j^2} = K \sum_{ij} Z_{ij}^2;$$

$$f = K \cdot M \cdot N; \quad G = \sqrt{2z^2} - \sqrt{2(f-1)},$$

где X_{ij} – значение признака j в наблюдении i; \bar{x}_j, S_j – среднее и стандартное отклонение признака j; r_{sk} – коэффициент корреляции между признаками s и k; M – число признаков; N – число наблюдений; f – число степеней свободы; G – преобразования распределения χ² к нормальному с параметрами (0, 1). Если вычисленное G > Gq, то наблюдение (или N наблюдений) не принадлежит данному однородному классу наблюдений с уровнем потерь q.

G-метод был широко использован для построения классификаций и описания пространственно-временных закономерностей формирования объектов и систем на Земле, Луне, Марсе, Сатурне, астероидах и в дальнем космосе [2, 8]. G-метод характеризуется следующими наиболее важными свойствами: построение классификации многомерных наблюдений при отсутствии априорных сведений о таксономической структуре наблюдений (задача без учителя); использование зависимых признаков; выделение таксонов различного уровня детальности; оценка сходства-различия между однородными таксонами; определение информативности признаков.

Кроме G-метода при интерпретации гидрогеохимических данных применены разнообразные математико-статистические процедуры, в том числе корреляционный и регрессионный анализы. В простейшем случае для описания прямолинейной зависимости использован парный коэффициент корреляции r и общее регрессионное уравнение

$$y = a + bx,$$

где a – свободный член в уравнении регрессии; b – угловой коэффициент, показывающий интенсивность изменения y в зависимости от измененный значений x.

В название вод ионы включаются при содержании более 25%-молей и компоненты располагаются в порядке возрастания содержания, типы вод указаны по классификации О.А. Алекина.

Химический состав грунтовых вод каменноугольных отложений

Чтобы охарактеризовать трансформацию состава грунтовых вод, необходимо рассмотреть закономерности изменения состава шахтных вод региона. Для шахтных вод Восточного Донбасса по результатам обобщения более 1500 анализов за столетний период выявлены четыре главных направления изменения их состава [5].

По первому гидрогеохимическому направлению исходные слабоминерализованные гидрокарбонатно-сульфатные воды преобразуются в кислые сульфатные шахтные воды с высокими содержаниями Fe, Mn, Al, Cu и других металлов; происхождение такого состава вод связано с развитием интенсивных процессов окисления серы. По второму направлению образуются нейтральные хлоридно-сульфатные воды с повышенным содержанием тяжелых металлов; наряду с процессами окисления серы значительную роль играет приток хлоридных подземных вод при углублении

угольных шахт. По третьему направлению формируются сульфатно-хлоридные воды, и ведущую роль играет процесс притока хлоридных подземных вод (влияние прямой зональности) при отработке глубоких угольных горизонтов. По четвертому направлению образуются оригинальные содовые гидрокарбонатно-сульфатно-хлоридные и хлоридные натриевые воды, которые связаны с притоком в шахту содовых подземных вод (влияние обратной вертикальной зональности).

Установлены [5, 9] два главных вида вертикальной гидрогеохимической зональности подземных вод Донбасса (в обобщении использована информация по результатам опробования скважин [6]): первая гидрогеохимическая тенденция характеризует прямую гидрогеохимическую зональность и переход с глубиной от гидрокарбонатно-кальциевых к хлоридно-натриевым водам (с минерализацией до 60 г/л), воды инфильтрационного генезиса постепенно сменяются на седиментационные.

Вторая гидрогеохимическая тенденция характеризует обратную вертикальную гидрогеохимическую зональность и появление на значительных глубинах маломинерализованных содовых вод (с повышенным содержанием HCO_3 и очень низкими Ca и Mg). Сначала под влиянием инфильтрационного фактора происходит увеличение минерализации и содержания большинства компонентов. Но с глубины 250–300 м начинается влияние фактора, который приводит к формированию вод содового типа. Этим фактором является испарительно-конденсационный процесс в водоуглеродной среде [7]. Именно это свидетельствует о возможном наличии нефтегазовых скоплений в регионе [3]. Перетекание вод в вертикальном направлении связано со сложным тектоническим строением территории. В районе

угольных шахт, где образуются содовые воды четвертого направления, наиболее высоки перспективы обнаружения нефтегазовых скоплений, например, в структурах Гуково-Зверевского угленосного района. Важно отметить, что в пределах Восточного Донбасса в северной зоне мелкой складчатости уже обнаружены перспективные нефтегазопроявления [1].

Ниже рассмотрены закономерности формирования химического состава грунтовых вод каменноугольных отложений за последние 60 лет (до и после массовой ликвидации угольных шахт региона). Результаты опробования источников и колодцев в 50–60-е годы для всего Восточного Донбасса и параметры уравнений регрессии приведены в табл. 2. Минерализация в этот период составляла 0,3–6,5 г/л, а содержания отдельных компонентов изменяются в сотни раз, особенно SO_4 , Cl, Na, среда изменяется от кислой (pH = 5) до щелочной.

Результаты обобщения анализов грунтовых вод, отобранных из источников и колодцев в Восточном Донбассе в 50–60-е годы XX столетия, когда функционировало большинство угольных шахт региона, показали, что в среднем по составу это нейтральные (pH = 7,3), гидрокарбонатно-сульфатные кальциево-натриевые воды, второго типа по О.А. Алекину, со средней минерализацией 1,37 г/л. Рост минерализации вод связан, прежде всего, с увеличением содержаний SO_4 (до 1,7), Cl (до 0,8) и Na (до 0,5 г/л); такие содержания компонентов обусловлены преимущественно природными факторами и частично влиянием антропогенного. Изучение параметров линейных уравнений регрессии (табл. 2) содержаний компонентов по минерализации свидетельствует, что по коэффициентам корреляции формируется следующий ряд – SO_4 ($r = 0,92$), Mg (0,86), Na (0,85), Ca (0,75).

Таблица 2

Параметры уравнений регрессии и состав грунтовых вод каменноугольных отложений Восточного Донбасса (50–60-е гг.)

Компонент	a_i	b_i	r_i	\bar{X}_i , мг/л	\bar{X}_i , %-моль
HCO_3	310	0,034	0,28	357	28
SO_4	-112	0,49	0,92	559	55
Cl	-38	0,12	0,61	122	17
Ca	48	0,077	0,75	154	36
Mg	6,8	0,038	0,86	58	23
Na	-20	0,16	0,85	202	41

Примечание. В таблицах: a_i – свободный член в уравнении регрессии; b_i – угловой коэффициент в уравнении регрессии; r_i – парный коэффициент корреляции; \bar{X}_i – среднее арифметическое.

Результаты опробования источников и колодцев в 2007–2009 гг. по данным фонового мониторинга для всего ВД приведены в табл. 3. Состав вод по-прежнему характеризуется очень высокой неоднородностью. Минерализация колеблется от 0,4 до 5,5 г/л, а содержания отдельных компонентов изменяются в сотни раз и имеют положительную асимметрию распределений, особенно по содержанию Cl, Na и минерализации, среда изменяется от кислой до щелочной. В среднем по составу воды хлоридно-сульфатные кальциево-натриевые, второго типа по классификации О.А. Алекина со средней минерализацией 2,3 г/л, то есть минерализация увеличилась в 1,8 раза.

Изучение параметров линейных уравнений регрессии (табл. 3) содержаний компонентов по минерализации свидетельствует, что по коэффициентам корреляции формируется следующий ряд – SO₄ (*r* = 0,92), Mg (0,83), Na (0,79), Ca (0,79). Угловые коэффициенты (табл. 3) свидетельствуют, что наибольшее влияние на минерализацию оказывают – SO₄ (0,54), Na (0,17) и Cl (0,1).

Средний химический состав грунтовых вод Восточного Донбасса приведён в табл. 4, в которой видны существенные изменения за обследованный период с 1950–1960-х годов до 2010 года. В 1950–1960-х гг. (табл. 4, 1955) влияние функционирования угольных

шахт слабо сказывалось на составе грунтовых вод, они имели невысокую минерализацию, и главными были природные факторы их формирования.

Но уже к 1999 г., когда затопливалась часть угольных шахт, началось всё более усиливающееся влияние потоков загрязнения вод. Очень резкие изменения наступили после затопления многих угольных шахт, что наглядно видно по результатам обобщения. В районах затопленных шахт начал формироваться подземный «гидрогеохимический айсберг» загрязнения подземных вод. Во многих населённых пунктах в колодцах и скважинах, воды которых использовались населением для питьевых целей, минерализация вод резко повысилась (в отдельных пунктах до 10–12 г/л). Поэтому в результатах обобщения за 2006 и 2010 гг. были использованы не только данные фонового мониторинга, но и воды загрязнённых колодцев и скважин в хуторах Лихой, Комиссаровский, Волчанский и других (табл. 4). Резко повысилась минерализация вод до 2–3 г/л и содержание большинства компонентов. Все это требует принятия экстренных мер по формированию по потокам движения вод геомониторинга и разработки мероприятий по очистке загрязнённых вод.

Таблица 3

Параметры уравнений регрессии и состав грунтовых вод каменноугольных отложений Восточного Донбасса (2007–2009 гг.)

Компонент	<i>a_i</i>	<i>b_i</i>	<i>r_i</i>	\bar{X}_i , мг/л	\bar{X}_i , %-моль
HCO ₃	266	0,052	0,43	385	18
SO ₄	–305	0,54	0,92	912	55
Cl	97	0,10	0,41	327	27
Ca	32	0,084	0,79	223	32
Mg	–3,9	0,045	0,83	98	24
Na	–11	0,17	0,79	365	44

Таблица 4

Средний состав грунтовых вод (мг/л и %-моль)

Дата	pH	HCO ₃	SO ₄	Cl	Ca	Mg	Na	M
1955	7,4	356	517	86	141	53	190	1250
		31	56	13	36	23	41	
1999	7,2	562	672	76	157	91	230	1510
		36	55	9	31	30	39	
2006	7,1	728	1362	108	282	110	461	2690
		28	65	7	33	21	46	
2010	7,2	542	1383	298	280	131	485	3029
		19	63	18	30	24	46	

Заключение

Детальный анализ формирования химического состава грунтовых вод каменноугольных отложений в Восточном Донбассе с помощью G-метода классификационного моделирования и корреляционно-регрессионного анализа позволил выявить следующие пространственно-временные закономерности. Наряду с природными факторами в формировании химического состава грунтовых вод региона уже в 50–60-е годы XX столетия определенную роль играл антропогенный фактор – угледобывающая промышленность и состав шахтных вод. Особенно интенсивные потоки загрязнения грунтовых вод образуются в районах затопленных шахт, где формируется подземный «гидрогеохимический айсберг» загрязнения. Это требует принятия срочных мер по созданию геомониторинга в районах затопленных шахт и мероприятий по очистке загрязненных вод. Надежно обнаружены и выделены в отдельный гидрогеохимический вариант оригинальные по составу содовые грунтовые воды, происхождение которых связывается с испарительно-конденсационными процессами на границе вода – газ и, следовательно, про-

гнозируется обнаружение нефтегазовых скоплений в регионе [3].

Список литературы

1. 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.
2. Гавришин А.И. Гидрогеохимические исследования с применением математической статистики и ЭВМ. – М.: Недра, 1974. – 146 с.
3. Гавришин А. И. О генезисе маломинерализованных содовых вод Донбасса // ДАН РФ. – 2005. – Т. 404, № 5. – С. 668–670.
4. Гавришин А.И., Корadini А. Многомерный классификационный метод и его применение при изучении природных объектов. – М.: Недра, 1994. – 92 с.
5. Гавришин А.И., Корadini А. Происхождение и закономерности формирования химического состава подземных и шахтных вод в Восточном Донбассе // Водные ресурсы. 2009. – Т. 36, № 5. – С. 564–574.
6. Гидрогеология СССР. Донбасс. – М.: Недра, 1970. – 480 с.
7. Никаноров А.М. Методы нефтепромысловых гидрогеологических исследований. – М.: Недра, 1977. – 328 с.
8. Gavrishin A.I., Coradini A., Cerroni O. Multivariate classification method in planetary sciences // Earth, Moon Planets. – 1992. – № 59. – P. 141–152.
9. Gavrishin A.I. The Methodological Aspect of Development and Application Multivariate Classification G-Mode for Analyses Geochemical Trend // Journal of Advances in Applied & Computational Mathematics. – 2014. – Vol. 1, № 1. – P. 21–27.