

УДК 662.51:556.3

DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55299

## **ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ШАХТНЫХ ВОД ВОСТОЧНОГО ДОНБАССА ЗА СТОЛЕТНИЙ ПЕРИОД**

© 2015 А. И. Гавришин, д.г.-м.н., проф.

Южно-Российский государственный политехнический университет им. М. И. Платова, 346428, Россия, Ростовская обл., г. Новочеркасск, ул. Просвещения, 132, e-mail: agavrishin@rambler.ru

Закономерности формирования химического состава шахтных вод в Восточном Донбассе изучены за столетний период с 20-х годов XX века по 2010 год. Всего использовано более 1500 анализов. Наибольшие изменения химического состава отмечены в 40-е и 50-е годы, и после массовой ликвидации угольных шахт в регионе в 90-е годы. Вынос растворённых веществ шахтными водами на поверхность достиг максимума к 2010 году, что вызвало интенсивное загрязнение природных вод. Выделено четыре главных направления трансформации химического состава шахтных вод в регионе, дана интерпретация их генезиса.

**Ключевые слова:** Восточный Донбасс, шахтные воды, химический состав.

### **Введение**

Добыча полезных ископаемых сопровождается интенсивным изменением естественного энерго-массопереноса, когда из недр на поверхность земли извлекаются огромные массы горных пород, руд, угля, подземных вод и т.д.; это приводит к существенным изменениям строения, свойств и состава верхней части гидросферы, снижению экологического потенциала территории. В Донбассе длительная отработка угольных месторождений привела к значительному преобразованию гидрогеологических условий на территориях в сотни квадратных километров и на глубину до 1300 м; эти преобразования продолжаются в настоящее время [Мохов, 2012]. Изменился режим и баланс подземных вод, произошла 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.

Реструктуризация угольной промышленности и массовое закрытие угольных шахт в Восточном Донбассе интенсифицировали процессы оседания земной поверхности и деформации горных пород, подтопления территорий и породных отвалов, формирования аномальных по составу вод и интенсивное загрязнение поверхностных вод, выделение «мертвого воздуха» и многие другие отрицательные явления.

Все эти негативные факторы вызвали многочисленные деформации и разрушение сооружений, производственных и жилых зданий, что потребовало переселения части населения на безопасные территории. Возникли проблемы в большинстве компонентов окружающей среды: воздушной, водной, биологической, геологической и социальной [Гавришин, 1974, 2011; Гавришин, Корadini, 2009; Мохов, 2011, 2012].

### Методика исследований

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  $Z^2$  – Гавришина [Гавришин, 1974; Гавришин, Корadini, 1994; Gavrishin et al., 1992; Gavrishin, 2014]. Для зависимых признаков и независимых наблюдений критерий имеет следующий вид:

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

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

где  $X_{ij}$  – значение признака  $j$  в наблюдении  $i$ ;  $\bar{X}_j$ ,  $S_j$  – среднее значение 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  $\chi^2$  к нормальному с параметрами (0,1). Если вычисленное  $G > G_q$ , то наблюдение (или  $N$  наблюдений) не принадлежат 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 [Гавришин, 1974, 2005]. Он 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 изменения значений  $x$ .

Для описания криволинейных зависимостей предложена универсальная функция:

$$y = \sum_i a_i \cdot 10^{-\frac{(\lg x - b_i)^2}{c_i}},$$

где  $a_i$  – коэффициенты, характеризующие модальные (вершины) значения функции;  $b_i$  – коэффициенты, характеризующие расположение по оси  $x$  модальных значений;  $c_i$  – коэффициенты, характеризующие пологость линии регрессии;  $i$  – номер модального значения.

В название вод ионы включаются при содержании более 25%-молей и компоненты располагаются в порядке возрастания содержаний.

### Химический состав шахтных вод

Химический состав шахтных вод зависит от многих факторов и, прежде всего, от состава дренируемых подземных и поверхностных вод, результатов их взаимодействия с углями и вмещающими породами, способов разработки угольных пластов, методов ликвидации угольных шахт. В табл. 1 приведён средний химический состав шахтных вод по результатам опробования за столетний период.

Таблица 1

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

Период	pH	HCO <sub>3</sub>	SO <sub>4</sub>	Cl	Ca	Mg	Na	Fe	Mn
20-е годы	6,9	183	1443	397	233	184	405	(0,1)	2840
		7	68	25	26	35	39		
40-е годы	4,4	25	2590	257	304	219	642	(32)	4040
		1	88	11	25	30	45		
50-е годы	5,2	221	2795	443	330	191	964	(52)	4947
		5	78	17	23	20	57		
1966 год	6,7	264	1741	448	98	217	710	1,1	3500
		8	68	24	10	35	55		
1992 год	7,5	580	1700	730	205	137	1035	3,6	4390
		15	54	31	15	17	68		
1999 год	7,6	676	1542	378	157	129	800	6,6	3546
		20	60	20	15	20	65		
2002 год	7,1	610	2372	445	223	250	886	47	4810
		16	63	21	17	26	57		
2006 год	6,9	505	2800	322	296	260	923	83	5290
		11	77	12	19	29	52		
2010 год	7,1	626	2805	443	386	267	912	39	5466
		13	72	15	24	27	49		

В 20-е годы минерализация вод (по сумме ионов) изменялась в широком диапазоне от 0,4 до 7 и в среднем равнялась 2,8 г/л [Дуров, 1952; Заяц, Фесенко, 1963]. Около 25% проб имели минерализацию до 2 г/л, 64% – в интервале 2–5 г/л и 11% – более 5 г/л. По среднему составу это хлоридно-сульфатные кальциево-магниевонариевые воды, второго типа по классификации О. А. Алекина.

Характеристика шахтных вод в 40-е годы приводится по небольшой выборке в 24 пробы. Большинство шахт было восстановлено после ликвидации во время оккупации территории в Великую Отечественную войну и это сказалось на формировании шахтных вод, начали развиваться интенсивные процессы окисления и растворения ранее накопленных продуктов окисления [Дуров, 1952]. Этим объясняется довольно низкое среднее значение pH вод, высокая степень минерализация вод (4 г/л) и содержания большинства компонентов, за исключением Cl, по сравнению с 20-ми годами.

В выборке (50-е годы) представлены старые восстановленные шахты, где продолжали формироваться высокоминерализованные воды кислого состава [Дуров, 1952; Заяц, Фесенко, 1963]. По сравнению с данными 20-х годов в среднем увеличились приблизительно в два раза минерализация вод и содержание  $\text{SO}_4$  и Na. Таким образом, резкое увеличение минерализации и содержания  $\text{SO}_4$  (при снижении pH) было спровоцировано затоплением шахт во время оккупации Донбасса и оно сохраняется на долгие годы.

60-е годы были «золотым» периодом развития угольной промышленности всего Донецкого бассейна, когда интенсивно сооружались и вводились в строй многочисленные угледобывающие и углеперерабатывающие предприятия. Химический состав вод весьма неоднороден: величина pH вод изменяется от щелочной (8,6) до сильно кислой (2,2), содержание  $\text{HCO}_3^-$  – от полного отсутствия в кислых водах до 966,  $\text{SO}_4$  – от 390 до 4327, Cl – от 46 до 1972 мг/л. Содержания катионов изменяются также значительно: Ca от 15 до 360 (видимо, занижены), Mg – от 14 до 510, Na – от 170 до 1750 мг/л. Таким образом, концентрация большинства компонентов изменяется в 10–20 раз, Mg и  $\text{SO}_4$  – в 6–12 раз. В среднем по составу воды сульфатные магниевые-натриевые, второго типа по О. А. Алекину (обнаружены отдельные пробы первого и четвертого типов).

В 1992 г. перед периодом массового закрытия опробовано 46 угольных шахт [Гавришин, Корadini, 1994, 2009]. Для всей выборки шахтных вод характерна высокая неоднородность состава и несимметричность распределения содержаний компонентов; минерализация изменяется в пределах 2,2–9,6, содержание Cl – 0,45–3,1,  $\text{SO}_4$ –0,6–5 г/л и т.д. По сравнению с предыдущими периодами опробования возросла средняя минерализация и содержание ионов Cl, Na и  $\text{HCO}_3^-$ . В среднем по составу воды хлоридно-сульфатные натриевые, нейтральные, второго типа по О. А. Алекину.

В 1994 году началась ликвидация угольных шахт в Восточном Донбассе путём полного затопления шахт, с перетоком вод в соседние ликвидированные шахты, с поддержанием уровней вод на безопасной глубине. Осуществлена ликвидация более чем 40 шахт. Поток вод был направлен из недр в отработанное пространство шахт, и отобрать пробы вод не было возможности. Поэтому характеристика состава шахтных вод приведена по результатам опробования 14 активно функционировавших в то время шахт (табл. 1).

От 2002 к 2010 году систематически увеличивались минерализация вод и содержание всех компонентов. Всё это свидетельствует о том, что ликвидация шахт привела к усилению процессов окисления и растворения и негативное воздействие на все компоненты окружающей среды растёт. Это требует эффективных мер по реабилитации состояния окружающей среды региона. Обобщение данных показало, что после завершения ликвидации угольных шахт, вызвавшей вынос растворенных веществ, содержания сульфат-иона и, особенно, железа достигли максимальных значений, т.е. процесс загрязнения поверхностных и подземных вод получил еще большее развитие в исследуемом регионе.

Многие реки в Восточном Донбассе под влиянием сброса шахтных вод практически утратили водохозяйственное значение и рекреационную ценность. Сократились запасы, ухудшилось качество, вырос дефицит питьевых и технических природных вод. В табл. 2 приведены данные о выносе растворенных веществ и некоторых компонентов шахтными водами в гидрографическую сеть Восточного Донбасса (2002 г.), когда процесс ликвидации шахт почти завершился.

Во всех случаях снижается величина pH, минерализация увеличивается до 2 раз, содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  – до 3-х раз, железа – в десятки раз. Кроме того, обнаруживается повышенное содержание Mn, Al, Cu и других компонентов. На воды р. Кадамовка, например, основное влияние оказывает сброс шахты Глубокая, воды которой имеют минерализацию до 12700, содержание сульфат-ионов – до 8200 и железа – до 110 мг/л.

Наибольший вынос растворенных веществ, сульфат-иона и железа происходит в реку Грушевка (167; 91 и 2,5 тыс. т/год соответственно), Кундрючья (100; 50; 0,37), Кадамовка (91; 57; 0,76), Лихая (35; 17; 0,48) (табл. 2). Наиболее загрязненным является бассейн р. Тузлов. Следовательно, требуется принятие неотложных мер по охране поверхностных вод региона.

Для определения основных направлений и генезиса изменений химического состава шахтных вод в Восточном Донбассе использованы 46 результатов анализа вод за 1992 год, перед периодом массовой ликвидации шахт региона. С помощью G-метода последовательного классификационного анализа по компьютерной программе АГАТ-2 обнаружены восемь однородных гидрогеохимических видов химического состава шахтных вод. Анализ пространственного распределения наблюдений в координатах: «минерализация – содержания компонентов» позволил уверенно обнаружить четыре главных геохимических направления изменения химического состава шахтных вод. Особенности химического состава вод различных геохимических направлений отчетливо фиксируются уже по среднему составу (табл.1): первое направление – это слабокислые сульфатные магниевые-кальциево-натриевые воды, второе – нейтральные хлоридно-сульфатные натриевые, третье – слабощелочные сульфатно-хлоридные натриевые, четвертое – нейтральные гидрокарбо-

Таблица 2.

**Вынос растворенных веществ и отдельных компонентов шахтными водами в гидрографическую сеть Восточного Донбасса**

Бассейн, река	Показатели шахтных вод					
	Расход шахтных вод, млн. м <sup>3</sup> /год	Растворенные вещества, тыс. т/год	Сульфат-ионы, тыс. т/год	Железо, тыс. т/год	Сухой остаток, г/л	pH
Б. Каменка	4,0	19,4	8,2	0,013	4,8	7,5
М. Каменка	0,44	2,2	1,3	0,012	5,1	6,5
Калитва	0,4	2,4	1,3	0,002	6,0	6,4
Лихая	7,5	35,0	17	0,48	4,7	7,0
Быстрая	2,5	17,5	7,7	0,3	7,0	6,3
Кундрючья	25	100	50	0,37	4,0	7,5
Всего Северский Донец	40	184	86	1,2	4,5	7,3
Б. Несветай	1,3	9,8	5,3	0,16	7,5	6,6
Грушевка	22,8	167	91	2,5	7,5	6,6
Кадамовка	7,6	90,7	57	0,76	11,9	6,2
Всего р. Тузлов	31,4	269	155	3,4	8,6	6,6
Итого р. Дон	72,4	453	241	4,6	6,3	7,0

натно-сульфатно-хлоридные натриевые (содовые). Хорошо видно, как от первого к третьему направлению снижается сульфатность и нарастает хлоридность вод, а для четвертого направления характерны высокие содержания гидрокарбонатов.

Первое направление связано с преобразованием исходных слабоминерализованных 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 серы. Типоморфными компонентами этих вод являются  $SO_4$  (высокие содержания) и  $HCO_3$  (низкие содержания).

Второе геохимическое направление характеризуется переходом гидрокарбонатно-сульфатных вод в хлоридно-сульфатные нейтральные воды, в незначительной степени обогащенные Fe и Mn. Теперь, наряду с процессами окисления соединений серы, приблизительно равную роль начинают играть процессы увеличения концентраций хлорид-ионов за счет притока хлоридных подземных вод при углублении угольных шахт. Типоморфными компонентами второго направления являются  $SO_4$  и Cl (повышенные содержания).

Третье геохимическое направление изменения состава шахтных вод фиксирует преобразование 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  $SO_4$  и процесс окисления сульфидов переходит на второе место (кислые воды при этом не образуются). Типоморфным компонентом направления является Cl (высокие содержания).

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 – Ca и Mg. Типоморфными компонентами четвертого направления являются содержания  $HCO_3$  и Cl (высокие содержания), а также Ca и Mg (низкие содержания). Теперь ведущую роль начинает играть приток содовых подземных вод, которые формируются в результате испарительно-конденсационных процессов в водоуглеродной газовой фазе [Колодий, 1975] (обратная геохимическая зональность подземных вод региона [Гавришин, 2005; Гавришин, Корadini, 2009]) (рис. 1).

На рис. 1 хорошо видны закономерности формирования химического состава по обратной вертикальной геохимической зональности. 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. Как отмечалось выше, этим фактором является испарительно-конденсационный процесс в водоуглеродной фазе. Именно это свидетельствует о возможном наличии нефтегазовых скоплений в регионе. Перетекание вод в вертикальном направлении связано со сложным тектоническим строением территории (наличие многочисленных тектонических нарушений). А. В. Мохов справедливо отмечает, что растекание происходит в виде восходящих потоков и что также получило распространение перетекание шахтных вод из затопленных шахт по латерали под воздействием естественных импульсов напряженно-деформированного состояния недр [Мохов, 2011, 2012].

Вокруг угольных шахт, где образуются содовые воды четвертого направления, наиболее высоки перспективы обнаружения нефтегазовых скоплений, например, в структурах Гуково-Зверевского геолого-промышленного (угольного) района. Важ-

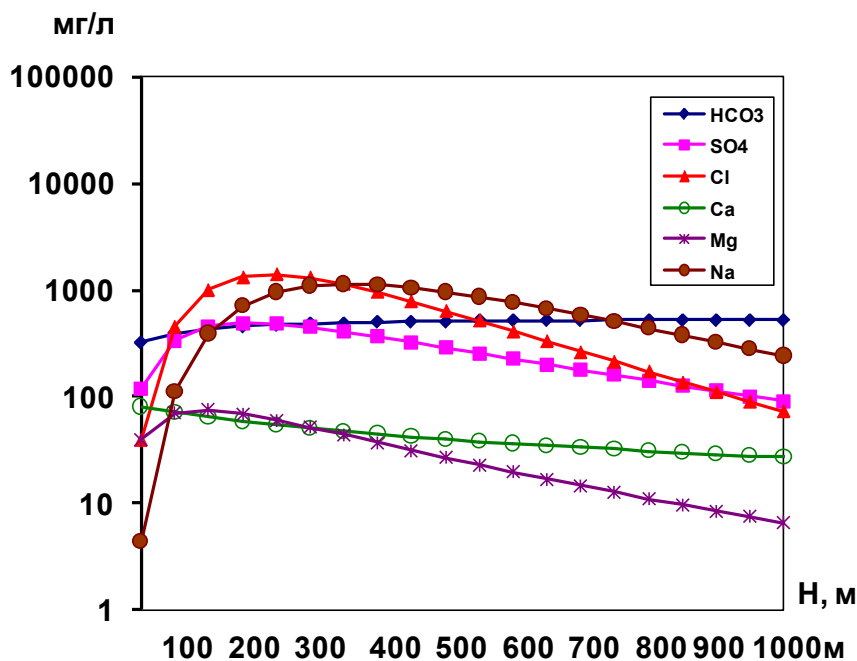


Рис. 1. График распределения содержаний компонентов подземных вод в разрезе при обратной вертикальной гидрогеохимической зональности

но отметить, что в пределах Восточного Донбасса в северной зоне мелкой складчатости обнаружены перспективные нефтегазопроявления [Бобух и др., 2004].

### Заключение

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 содержания сульфатов и железа. Такая ситуация обнаружена в шахтных водах после периодов затопления шахт (послевоенные 40-е – 50-е годы и после ликвидации угольных шахт в 90-е годы).

Применение *G*-метода классификации многомерных наблюдений позволило надёжно выявить и интерпретировать генезис четырёх основных направлений изменения состава шахтных вод [Гавришин, 2005].

Генезис первого направления связан с влиянием интенсивных процессов окисления сульфидов, содержащихся в углях и вмещающих породах. По анионному составу воды сульфатные. Типоморфными компонентами являются сульфаты, железо, тяжёлые металлы (высокие содержания), гидрокарбонат-ион (низкие содержания), кислая реакция среды.

Второе направление изменения состава шахтных вод обусловлено ослаблением процессов окисления и началом притока хлоридных вод с углублением горных выработок. По составу воды хлоридно-сульфатные. Уменьшаются содержания железа и тяжёлых металлов. Типоморфными компонентами являются SO<sub>4</sub> и Cl (повышен-

ные содержания). По третьему направлению формируются сульфатно-хлоридные воды, и их генезис связан преимущественно с процессами привноса хлорид-иона подземными водами. Типоморфным компонентом является Cl (высокие содержания).

Четвёртое направление изменения состава шахтных вод относится к уникальным, поскольку формируются оригинальные содовые воды. Их генезис связан с притоком в горные выработки содовых подземных вод, которые, по нашему мнению, образуются в результате процессов конденсации водяных паров из водоуглерод смеси [Гавришин, 2005; Колодий, 1975]. Типоморфными компонентами являются  $\text{HCO}_3$  и Cl (высокие содержания), а также Ca и Mg (низкие содержания). Теперь следует признать наличие в пределах Восточного Донбасса нефтегазовых скоплений, особенно в Гуково-Зверевском угленосном районе [Гавришин, 2005].

### Литература

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. // Доклады РАН. – 2005. Т. 404. – №5. – С. 668–670.
4. Гавришин А. И. Энвайрология – наука об окружающей среде. // Материалы Всерос. Науч. Конф. Проблемы геологии, планетологии, геоэкологии и рационального природопользования. Новочеркасск: изд. ООО ЛИК. – 2011. – С. 22–32.
5. Гавришин А. И., Корadini А. Многомерный классификационный метод и его применение при изучении природных объектов. М.: Недра. – 1994. – 92 с.
6. 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.
7. Дуров С. А. Шахтные воды Донбасса как чистая генетическая линия сульфатного типа природных вод // Тр. Новочеркасского политехн. ин – та. 1952. Т. 38. 54 с.
8. Заяц Г. Н., Фесенко Н. Г. Шахтные воды Ростовской области // Гидрохим. материалы. 1963. Т. 35. – С. 131–134.
9. Колодий В. В. Подземные конденсационные и седиментационные воды нефтяных, газоконденсатных и газовых месторождений. Киев: Наукова думка. – 1975. – 124 с.
10. Мохов А. В. О растекании шахтных вод из затопленных угольных шахт в недрах // Доклады РАН. – 2011, Т. 438. – №4. – С. 494–496.
11. Мохов А. В. Гидродинамическая эволюция пустотного пространства каменноугольных шахт под влиянием затопления // Вестник Южного научного центра РАН. – 2012, том 8. – №3. – С. 42–49.
12. Gavrishin A. I., Coradini A., Cerroni O. Multivariate classification method in planetary sciences // Earch, Moon Planets. 1992. № 59. PP. 141–152.
13. 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, No. 1. PP. 21–27.



DOI: 10.23671/VNC.2015.4.55299

## **PECULIARITIES OF FORMATION OF CHEMICAL COMPOSITION OF THE EASTERN DONBAS MINE WATERS FOR A CENTENARY PERIOD**

**© 2015 A. I. Gavrishin, Sc. Doctor (Geol.-Min.)**

M. I. Platov South-Russian State Polytechnic University, 346428, Novocherkassk,  
Prosveshcheniya, 132, SRSPU, e-mail: agavrishin@rambler.ru

Regularities of formation of chemical composition of mine waters in the Eastern Donbas are studied in the space of the centenary since twenties of 20 century until the year 2010. In all, more than 1500 analyses have been used. The largest changes of chemical composition are recorded in 40-th and 50-th years, and after mass liquidation of coal mines in the region. The carrying away of dissolved substances reached its maximum in the year 2010, what caused an intensive pollution of natural waters. The four main directions of transformation of mine waters' chemical composition have been singled out in the region and interpretation of their genesis given.

**Key words:** Eastern Donbas, mine waters, chemical composition.