

ОСОБЕННОСТИ СОВРЕМЕННОГО ХИМИЧЕСКОГО СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД УГЛЕНОСНЫХ РАЙОНОВ О. САХАЛИН

И.А. Тарасенко¹, А.В. Зиньков²

¹ ФГБУН Дальневосточный геологический институт ДВО РАН, пр. 100 лет Владивостоку 159,
г. Владивосток, 690022; e-mail: tarasenko_irina@mail.ru

² Дальневосточный федеральный университет, ул. Пушкинская 10, г. Владивосток; e-mail: zinkov_a@mail.ru

Поступила в редакцию 4 марта 2012 г.

Рассмотрены особенности химического состава подземных вод угленосных районов о. Сахалин. Установлено, что процессы, происходящие в подземной гидросфере в результате затопления угольных шахт, сопровождаются увеличением концентраций растворенных веществ и изменением состава подземных вод. Продуцируется строго определенный комплекс вторичных твердых и жидких образований. Временные колебания составов подземных вод техногенных комплексов не приводят к принципиальному изменению геохимического типа воды. Состав шахтных вод не зависит от типа гидрогеологических структур и метаморфизма углей, а зависит, главным образом, от формационной принадлежности водовмещающих пород и времени взаимодействия воды с горными породами.

Ключевые слова: подземные воды, ликвидированные угольные шахты, гидрохимия, условия формирования, равновесие, о. Сахалин.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время проблема изучения особенностей состава подземных вод угленосных районов приобретает актуальное значение в связи с массовым закрытием угольных шахт. Закрытие шахт в большинстве случаев осуществляется методом “мокрой” ликвидации, при которой водоотлив прекращается и горнодобывающие предприятия, многие десятилетия осушавшие огромные прилегающие пространства, затапливаются до уровня естественных отметок зеркала подземных вод. В результате гидролитосфера подвергается масштабным качественным и количественным изменениям. Поэтому всесторонний и научнообоснованный подход к изучению подземной гидросферы районов ликвидированных шахт, особенностей ее формирования и эволюции является важным фундаментальным направлением, имеющим практическое значение.

В рамках этой проблемы и определена постановка данной работы, а подземные воды районов ликвидированных угольных шахт Сахалина выбраны в качестве объектов исследований.

ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАЙОНА РАБОТ

В соответствии с районированием, принятым в монографии “Гидрогеология СССР” [4], рассматриваемые в работе территории относятся к Сахалинской гидрогеологической области, которая вытянута в меридиональном направлении почти на 900 км, ее средняя ширина достигает 100 км, максимальная – 160 км. С запада и юго-запада Сахалин омывается водами Японского, а с севера и востока – Охотского морей [3].

По характеру рельефа о. Сахалин делится на две неравные части: большую – южную (преимущественно горную) и меньшую – северную (преимущественно равнинную) [4].

Сахалин имеет густую гидрографическую сеть. По характеру течения различаются реки горные, равнинные и смешанного типа. По отношению к подземным водам реки Сахалина в основном играют дренирующую роль. Лишь в периоды паводков равнинные реки участвуют в питании подземных вод. Воды рек пресные, без цвета и запаха. Общая минерализация воды обычно не превышает 0.1 г/л. Хими-

ческий состав вод большинства рек гидрокарбонатный, смешанный по катионам [4].

Сахалин сложен осадочными, вулканогенными, в меньшей мере метаморфическими и интрузивными породами палеозойского, мезозойского и кайнозойского возраста.

По степени литификации развитые на Сахалине породы подразделяются на рыхлые (четвертичные и плиоценовые), слабо литифицированные (миоценовые и палеогеновые), сильно литифицированные (мезозойские и верхнепалеозойские) и регионально метаморфизованные (нижне-среднепалеозойские) образования [4].

Степень трещиноватости пород зависит от их литологии. Наиболее трещиноватыми являются туфогенные породы и песчаники. В глинистых сланцах, аргиллитах и алевролитах трещины сравнительно быстро заполняются продуктами разрушения этих пород.

Мощность зоны выветривания имеет наибольшее значение в вулканогенных породах ранне-среднемиоценового возраста (достигает 170 м), наименьшее (до 20 м) – в интрузивных породах. В остальных сильно литифицированных породах трещиноватая зона выветривания охватывает глубины 70–100 м.

Все промышленные месторождения угля Сахалина сосредоточены в четырех угленосных районах: Александровском, Углегорском, Центральном и Южном (рис. 1).

Александровский район приурочен к западному побережью острова, в структурном плане это северо-западный фланг Западно-Сахалинского антиклинория. В Александровском угленосном районе разрабатывались Мгачинское и Александровское месторождения, эксплуатируемые соответственно шахтами Мгачи и Арково [4].

Углегорский район расположен на западном крыле Западно-Сахалинского антиклинория. В пределах угленосного района разрабатывались Бошняковское, Лесогорское, Углегорское и Солнцевское месторождения. Эксплуатация месторождений осуществлялась шахтами Бошняково, Тельновская, Ударновская и Углегорская, а также разрезом Солнцевский. В структурном отношении все месторождения района приурочены к крупным асимметричным синклиналильным складкам, осложненным многочисленными разрывными нарушениями и секущими пластовыми интрузивными телами габбродиоритового состава [4].

Центральный район приурочен к восточному крылу Западно-Сахалинского антиклинория. Неогеновые отложения образуют сравнительно пологие структуры синклиналильного типа. На территории уг-

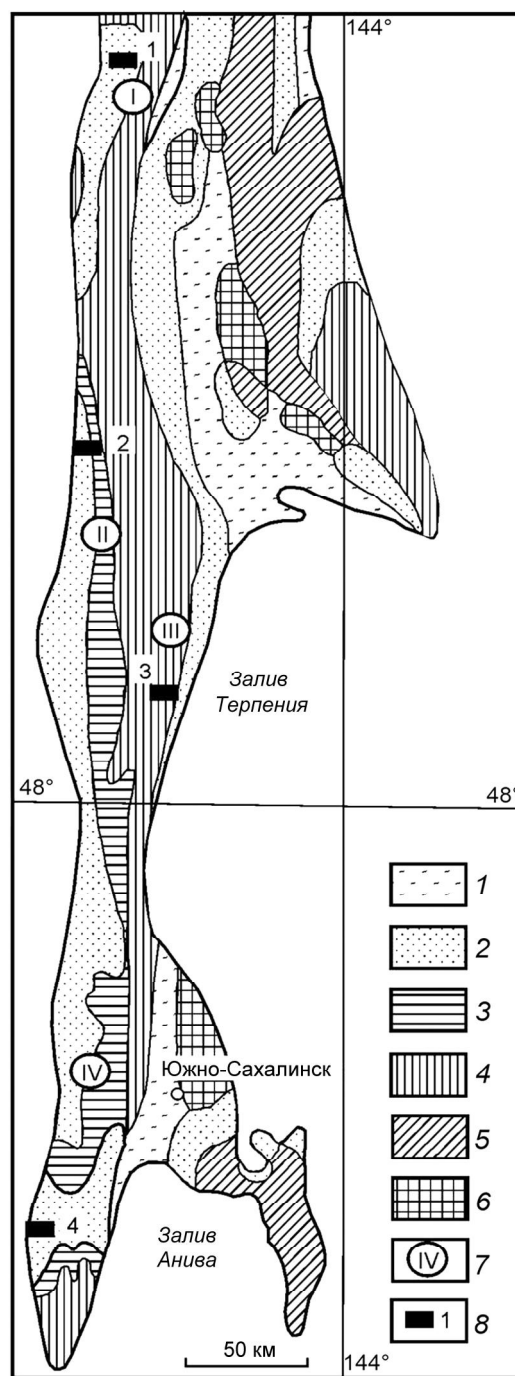


Рис. 1. Обзорная схема расположения рассматриваемых угольных месторождений центральной и южной частей о. Сахалин, по [1].

1–6 осадочные породы: 1 – четвертичной системы, 2 – неогена, 3 – палеогена, 4 – верхнего мела, 5 – юры и мела, 6 – палеозоя; 7 – угленосные районы: I – Александровский; II – Углегорский; III – Центральный; IV – Южный; 8 – месторождения и шахты: 1 – Мгачинское (шх. Мгачи), 2 – Бошняковское (шх. Бошняково), 3 – Макаровское (шх. Макаровская), 4 – Горнозаводское (шх. Горнозаводская и шх. Шебунино)

леносного района разрабатывались три месторождения – Тихменевское, Макаровское и Вахрушевское, эксплуатируемые шахтами Тихменевская, Макаровская и разрезом Лермонтовский.

Южный район представлен тремя месторождениями – Горнозаводским, Лопатинским и Новиковским. Разработкой Горнозаводского месторождения занимались шахты Горнозаводская и Шебунино. Эксплуатацию Лопатинского месторождения производили шахты Долинская и Южно-Сахалинская. Новиковское месторождение отрабатывалось одноименным углеразрезом. Возраст угленосных отложений Лопатинского месторождения палеогеновый (нижнедуйская свита), Горнозаводского и Новиковского месторождений – неогеновый (верхнедуйская свита) [4].

Объектами исследования настоящей работы в пределах Сахалинской гидрогеологической области являлись ликвидированные шахты Мгачинского, Бошняковского, Макаровского и Горнозаводского

месторождений – представители каждого из промышленноугленосных районов Сахалина (рис. 1, табл. 1). Из табл. 1 видно, что рассматриваемые объекты имеют среднемиоценовый (N_{1vd}) возраст угленосных отложений, по степени метаморфизма углей подразделяются на каменноугольные (Мгачинское и Бошняковское) месторождения и бурогольные (Макаровское и Горнозаводское) месторождения. В структурном плане месторождения расположены в пределах синклиналей (Мгачинское и Горнозаводское месторождения), брахисинклинали (Бошняковское месторождение) и моноклинали (Макаровское месторождение).

В пределах Сахалинской гидрогеологической области (гидрогеологической структуры I порядка) выделены [4] три основных типа гидрогеологических структур и соответствующих им на поверхности земли гидрогеологических районов II порядка: 1) артезианские бассейны; 2) гидрогеологические массивы;

Таблица 1. Объекты исследования, их геологическая и структурная приуроченность.

Наименование бассейна	Возраст угленосных отложений	Угленосный район	Месторождение / шахта	Краткая характеристика месторождения	
				Структурная позиция	Литологический состав верхнедуйской свиты
Сахалинский	Среднемиоценовый (N_{1vd})	Александровский	Мгачинское / Мгачи	Каменные угли	
				Синклиналь, осложненная разрывными нарушениями. Углы падения пород на крыльях 25–35°	Нижний угленосный горизонт: аргиллиты, алевролиты, пласты каменного угля; средний безугольный горизонт: аргиллиты и алевролиты; верхний угленосный: чередование песчаников, алевролитов и аргиллитов. Мощность 410 м.
		Углегорский	Бошняковское / Бошняково	Брахисинклиналь, осложненная разрывными нарушениями. Углы падения от 25 до 85°	Подугольный горизонт: алевролиты с прослоями грубозернистых песчаников, гравелитов, реже конгломератов; угленосный: пласты угля, песчаники, алевролиты и аргиллиты. Мощность до 1200 м.
		Центральный	Макаровское / Макаровская	Бурые угли	
Моноклинали почти меридионального простирания, осложненная разрывными нарушениями. Падение пород на восток и юго-восток под углами от 50 до 85°	Подугольный горизонт: конгломераты, песчаники, гравелиты, аргиллиты, алевролиты, редкие сидеритовые конкреции; угленосный: конгломераты, переслаивающиеся песчаники, алевролиты, аргиллиты, углистые аргиллиты и пласты угля; надугольный: аргиллиты и алевролиты. Мощность до 375 м.				
Южный	Горнозаводское / Горнозаводская и Шебунино	Синклиналь, осложненная единичными разрывными нарушениями. Углы падения пород от 20 до 60°	Угленосный горизонт: песчаники, аргиллиты, алевролиты с примесью туфогенного материала, угольные пласты и углистые породы. Надугольный горизонт: переслаивание песчаников с аргиллитами и алевролитами с туфогенным материалом. Мощность 280 м.		

3) адартезианские бассейны. Угольные месторождения Сахалина относятся главным образом к артезианским и адартезианским бассейнам.

Макаровское месторождение расположено в Поронайском артезианском бассейне, в пределах которого широким распространением пользуются поровые воды. Мгачинское, Бошняковское и Горнозаводское месторождения относятся к Татарскому адартезианскому бассейну, в разрезе которого значительную долю составляют вулканогенно-осадочные литифицированные неогеновые образования, в которых преимущественное развитие получили трещинно-пластовые воды.

В питании подземных вод острова основная роль принадлежит атмосферным осадкам. Кроме этого, в монографии Гидрогеология СССР [4] обосновываются предположения, что на Сахалине дополнительным источником питания могут быть морские, современные седиментационные и глубинные ювенильные воды, вызывающие гидрохимические, гидродинамические и гидрогеотемпературные аномалии.

Изучение шахтных вод на угольных месторождениях Сахалина началось с 1950–1951 гг. трестом “Сахалинуглегеология” (И.Г. Борисенко, Б.В. Бутаков, Л.А. Маккар, А.С. Шепелев и др.), а позже гидрогеологические исследования в комплексе с геологоразведочными работами проводились Сахалинским геологическим управлением (А.С. Антоненко, Л.И. Поплавская, Г.Р. Яненц и др.). При эксплуатации угольных месторождений велись наблюдения за водопритоками в горные выработки. В результате этих исследований установлено, что большинство угольных шахт Сахалина относится к слабообводненным. Впоследствии, в период работы шахт, притоки воды и коэффициенты водообильности по шахтам Сахалинской области корректировались и уточнялись. Средние показатели водообильности рассматриваемых в работе шахт представлены в табл. 2.

Из таблицы видно, что в период работы рассматриваемых шахт наиболее обводненной являлась шахта Горнозаводская, в то время как шахта

Шебунино была самой слабообводненной из рассматриваемых предприятий.

В обводнении угольных месторождений принимали участие поровые, пластовые, трещинные и трещинно-жильные подземные воды.

Поровые воды приурочены к аллювиальным и аллювиально-делювиальным отложениям, водоносные породы которых представлены песками, супесями и гравийно-галечниками. Мощность водоносных пород колеблется от 0.2–0.5 до 3.0–4.0 м, достигая в единичных случаях 10–20 м. Глубина залегания уровня поровых вод изменяется в пределах 0.0–3.0 м. Ввиду малой мощности и ограниченного площадного распространения поровые воды не оказывали существенного влияния на обводненность горных выработок.

Основную роль в обводнении угольных месторождений играли трещинные, а также напорные пластовые и трещинно-жильные воды, приуроченные к песчаникам, конгломератам, пластам угля, отдельным пачкам алевролитов и зонам открытых тектонических нарушений. Глубина залегания трещинных вод на угольных месторождениях Сахалина изменяется от нескольких сантиметров (в долинах рек) до 70–80 м (на водоразделах). Питание их осуществляется преимущественно за счет инфильтрации атмосферных осадков и в меньшей мере за счет подтока напорных (пластовых и трещинно-жильных) вод. Напорные пластовые и трещинно-жильные воды вскрываются на глубинах от 5–10 (в зоне выветривания) до 300–400 м (в центральной части синклиналей). Основными источниками их питания являются атмосферные осадки, а также трещинные воды.

Сильная расчлененность поверхности угольных месторождений распадками и расположение местного базиса эрозии ниже отработанных угольных горизонтов создают благоприятные условия для дренирования подземных вод.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Предлагаемая работа основана на непрерывном, методологически и технически стандартизированном процессе наблюдений, измерений и анализе химических показателей, характеризующих состав под-

Таблица 2. Притоки воды и коэффициенты водообильности по шахтам [8].

Наименование шахты	Водоприток, тыс. м ³ /год		Коэффициенты водообильности, м ³ /т	
	от–до	сред.	от–до	сред.
Мгачи	1744–2847	2102	5.42–8.80	6.6
Бошняково	1058	1058	3.89–5.78	4.35
Макаровская	1036–1716	1302	4.81–8.44	6.9
Горнозаводская	2039–2263	2174	6.63–9.34	7.9
Шебунино	179–415	256	0.69–1.94	1.1

земных вод в районах ликвидированных угольных шахт. На протяжении 2001–2010 гг. выполнялся гидрохимический мониторинг подземных вод и поверхностных водотоков в пределах горных отводов затопленных шахт. Пробы подземных вод отбирались в местах их изливов на земную поверхность, в колодцах населенных пунктов, из водозаборных и наблюдательных скважин. Отбор проб воды проводился в соответствии с действующими нормами.

По всем пробам выполнялся полевой химический анализ и лабораторное обследование. Сокращенный полевой гидрохимический анализ проводился сразу на точке отбора пробы. Пробы на полный химический анализ и микрокомпоненты консервировались на месте отбора по методике, предложенной аккредитованной лабораторией. В качестве базовых были определены следующие лаборатории, аккредитованные Госстандартом России: ГП “Дальинформгеоцентра” и Сахгидромета (г. Южно-Сахалинск); “Приморского гидрометрического агентства” Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (г. Владивосток).

В перечень контролируемых показателей качества воды входили: органолептические показатели (температура, запах, цветность) и показатели химического состава воды, в том числе: рН, сухой остаток, общая жесткость, окисляемость, щелочность, биохимическая (БПК) и геохимическая (ХПК) потребность в кислороде, углекислота свободная, основные ионы (хлориды, сульфаты, гидрокарбонаты, кальций, магний, натрий), биогенные вещества (аммоний, железо, нитраты, нитриты), типичные загрязняющие микрокомпоненты (бериллий, бор, марганец, свинец, селен, медь, молибден, мышьяк, стронций, фтор, цинк, алюминий, хром, никель, литий, кадмий, ртуть, барий, нефтепродукты, фенолы, поверхностно-активные вещества (СПАВ).

В дальнейшем методика исследований определялась задачами работы. С целью установления генезиса и условий формирования подземных вод рассматриваемых районов отбирались пробы воды для анализа на стабильные изотопы (^{18}O , ^2H). Пробы не фильтровались и отбирались в стеклянную посуду. Анализ выполнялся в лаборатории стабильных изотопов ДВГИ ДВО РАН.

Осуществлялась статистическая обработка результатов химических анализов подземных вод с использованием методов математической статистики, реализованных в пакетах программ EXCEL и Statistica. С помощью программы AquaChem выполнялся расчет степени равновесия подземных вод с широким спектром минералов (алюмосиликатов, карбонатов, сульфатов, хлоридов, оксидов и гидроксидов).

Имеющийся в наличии большой фактический материал по подземным водам районов ликвидированных угольных шахт и использование современного программного обеспечения позволили получить достоверные научные результаты.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Установлено, что подземные воды угольных месторождений Сахалинского бассейна, не подверженные влиянию затопленных шахт, имеют гидрокарбонатный, преимущественно кальциевый состав:

$$M_{0,34} \frac{HCO_3^{78} Cl^{12} SO_4^{10}}{Ca^{72} Mg^{16} (Na + K)^{12}}.$$

После затопления горных выработок в нарушенном массиве формируются техногенные водоносные комплексы. Минерализация подземных вод возрастает, происходит повышение содержаний таких компонентов, как Ca^{2+} , Na^{2+} , HCO_3^- , Mg^{2+} и SO_4^{2-} . Это приводит к формированию солоноватых вод гидрокарбонатного натриевого и сульфатного натриевого состава (рис. 2).

Обращает на себя внимание то, что в результате затопления шахт рассматриваемых каменноугольных и бурогольных месторождений Сахалинской гидрогеологической области, относящихся, как указывалось выше, к разным типам гидрогеологических структур, образуются одинаково благоприятные условия, определяемые соответствующим водообменом и геохимической средой, для формирования горизонтов гидрокарбонатных натриевых вод. В районах шахт Мгачи и Горнозаводская существуют условия, способствующие формированию сульфатных вод. Это может свидетельствовать о том, что состав формирующихся вод в рассматриваемых районах ликвидированных угольных шахт не зависит от типа гидрогеологических структур и метаморфизма углей, а зависит, по всей видимости, от формационной принадлежности водовмещающих пород и времени взаимодействия воды с горными породами. По утверждению С.Л. Шварцева [10], именно время является важнейшим параметром эволюции системы вода–порода.

Изучение изменений средних значений компонентов, их неоднородностей и связей позволило выделить в рассматриваемых районах пять типов подземных вод, рассчитать средние концентрации химических элементов для каждого типа вод и наметить общую последовательность процессов их формирования (табл. 3)

Полученные данные свидетельствуют о том, что наименьшие пределы минерализации свойственны водам гидрокарбонатного типа, отражающим начальные фазы их метаморфизации, наибольшие – сульфатным, сформировавшимся в результате процессов

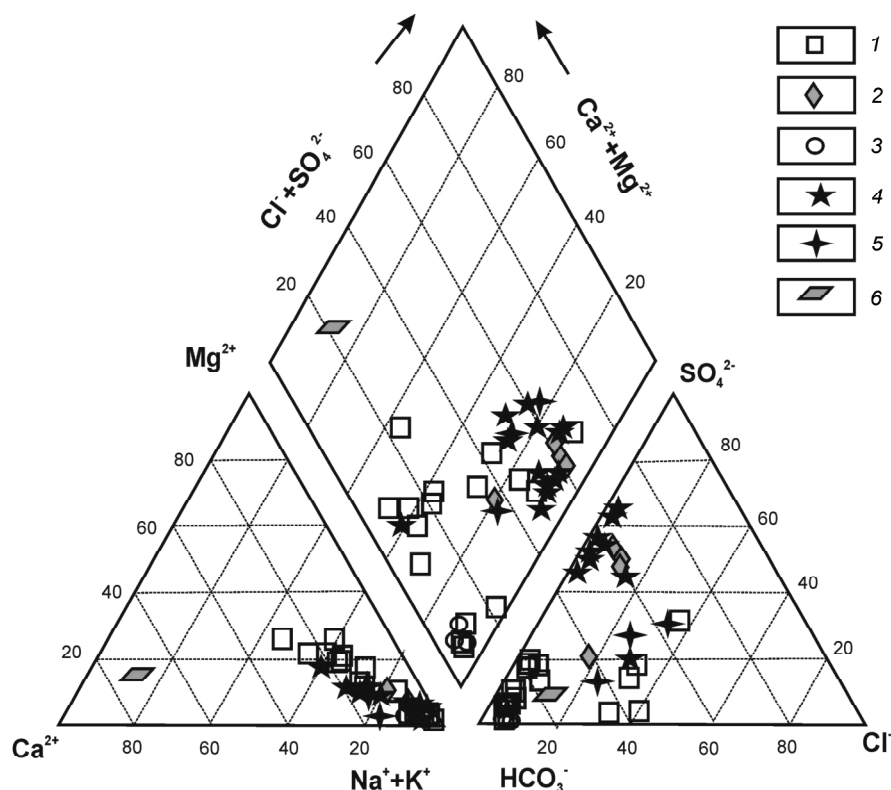


Рис. 2. Соотношение основных катионов и анионов в подземных водах ликвидированных шахт Сахалина.

1 – Бошняково, 2 – Горнозаводская, 3 – Макаровская, 4 – Мгачи, 5 – Шебунино; 6 – воды аллювиального водоносного горизонта

Таблица 3. Средний химический состав выделенных типов подземных вод в районах ликвидированных шахт Сахалина.

Наименование типа	Минерализация, г/л	pH	Содержание, мг/л								rCa/rNa	rCa/rMg	rHCO ₃ ⁻ /rSO ₄ ²⁻
			K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	CO ₂			
HCO ₃ -Ca	0.3	7.3	1.5	8.2	47.0	6.1	13.8	15.2	152.5	4.4	6.58	10.56	7.89
HCO ₃ -Na	1.7	7.8	13.0	339.7	41.8	22.2	80.9	88.3	902.5	15.9	0.14	2.58	8.04
SO ₄ -HCO ₃ -Na	2.1	8.0	561.0	27.0	7.3	15.2	595.0	851.0	36.0	0.06	5.07	1.13	
HCO ₃ -SO ₄ -Na	4.3	7.5	6.6	1106.2	75.2	35.5	28.0	1408.2	1526.6	67.7	0.08	2.9	0.85
SO ₄ -Na	4.6	7.9	22.0	1147.7	117.9	59.4	104.3	1694.4	1359.7	26.5	0.12	2.72	0.63

Примечание: г – концентрация компонента в мг-экв/дм³

наиболее глубокой метаморфизации. Изменения соотношений Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, HCO₃⁻ и SO₄²⁻ в водах подчеркивают особенности и специфику их участия в миграции или концентрировании. Наблюдается уменьшение значений отношения rCa/rNa в водах по мере увеличения их минерализации и перехода от HCO₃-Ca, HCO₃-Na типов к SO₄-Na типу. Это свидетельствует о преобладании в подземных водах рассматриваемых районов процессов накопления натрия и об участии кальция в минералообразовании. Отношение rCa и rMg в водах свидетельствует о периодическом концентрировании то кальция, то магния, а по отношению rHCO₃⁻/rSO₄²⁻ отчетливо прослеживается возрастание HCO₃⁻ на первых этапах взаимодействия вода-порода, а затем увеличение концентраций SO₄²⁻ с повышением минерализации (табл. 3).

Появление сульфатных ионов в подземных водах, заключенных в трещиноватой зоне терригенных и вулканогенных пород, по всей видимости, обусловлено окислением сульфидов, содержащихся в породах угленосной формации (средняя сернистость углей Сахалина составляет 0.4 %).

На основании обобщения полученных данных установлено, что с самых первых этапов своего формирования подземные воды концентрируют химические элементы не равномерно, а избирательно. Это явление было замечено С.Л. Шварцевым еще в 1998 г. [9] при изучении пресных подземных вод. Одновременно с изменением минерализации меняется и их состав. Так на основании проведенных исследований установлены наиболее общие черты изменения состава подземных вод в районах ликви-

рованных угольных шахт по мере концентрирования в них солей (рис. 3).

Выделены химические компоненты, накапливающиеся в растворе весьма интенсивно. Наиболее ярким примером среди них являются сульфат-ион, гидрокарбонат-ион и натрий. Менее активно в водах накапливаются кальций, магний и хлор.

Анализ полученных данных позволяет выделить четыре этапа в эволюции состава пресных и солоноватых подземных вод рассматриваемых районов.

Первый, наиболее ранний, этап эволюции включает формирование вод с общей минерализацией менее 1.15 г/л. Отличительная особенность этих вод заключается в том, что формируются гидрокарбонатные воды со сложным, постоянно меняющимся, катионным составом и $\text{pH}=6.8\text{--}7.6$.

Второй этап эволюции охватывает интервал минерализации от 1.15 до 2.09 г/л. На этом этапе содержания всех элементов в водах возрастают, но с разной интенсивностью. При данной минерализации рассматриваемые воды насыщены карбонатом кальция (рис. 4), поэтому в этих условиях происходит накопление натрия. Также быстро растет концентрация HCO_3^- . При минерализации вод 1.4 г/л происходит, вероятно, интенсивное выпадение карбоната натрия, так как на графике (рис. 3) наблюдается резкое падение содержаний Na^+ и HCO_3^- . Затем вновь наблюдается концентрирование этих компонентов. По составу воды остаются гидрокарбонатными натриевыми, pH колеблется в пределах 7.6–9.4.

Третий этап эволюции включает интервал минерализации от 2.1 до 4.64 г/л. Он характеризуется постепенным уменьшением интенсивности накопления в водах гидрокарбонат-иона, при увеличении кон-

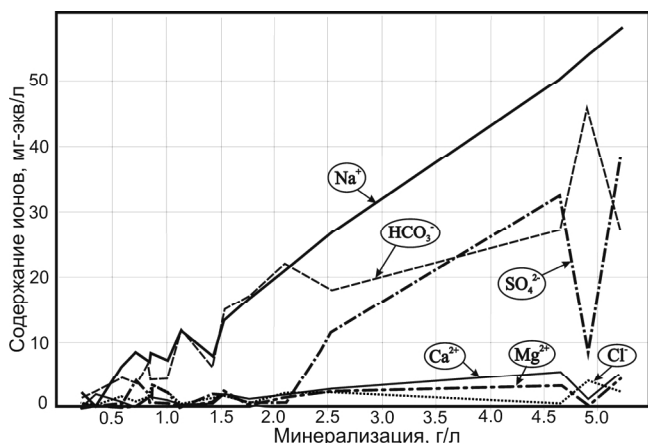


Рис. 3. Зависимость средних содержаний ведущих элементов в подземных водах районов ликвидированных шахт Сахалина от их общей минерализации.

центрирования сульфат-иона. Содержания натрия при этом продолжают равномерно расти. В результате воды при минерализации 3.65 г/л переходят из гидрокарбонатных в гидрокарбонатно-сульфатные. На этой стадии наблюдается концентрирование в водах Ca и Mg , а также уменьшение содержаний Cl . Водородный показатель при этом изменяется незначительно (табл. 3)

На четвертом этапе эволюции состава подземных вод, при минерализации 4.9 г/л, наблюдался резкий скачок концентраций HCO_3^- и Cl^- в сторону увеличения и такое же интенсивное снижение содержаний SO_4^{2-} , Ca и Mg . Возможно, это связано с создавшимися условиями, способствующими интенсивному выпадению на данном этапе сульфатов кальция (рис. 4) и магния. Затем вновь наблюдалось увеличение концентраций SO_4^{2-} , Ca и Mg , при уменьшении HCO_3^- и Cl^- . Обращает на себя внимание равномерный рост концентраций натрия, без каких-либо всплесков и падений. При этом значения водородного показателя классифицируют подземные воды как нейтральные.

Диапазон pH подземных вод Сахалинского бассейна, ограниченный значениями от 6.8 до 9.4, может свидетельствовать о том, что масштабы образования щелочности в подземных водах превышают масштабы формирования CO_2 и органических кислот. Это, по всей видимости, характерно для бассейнов и месторождений, надугольная толща которых сложена алюмосиликатными породами. Для бассейнов же, которые перекрываются известняками, доломитами и соленосными отложениями (например Кизеловский угольный бассейн), по нашим наблюдениям, характерно увеличение парциального давления pCO_2 и концентрации водородного иона. Отмечается снижение величины pH вод в кислотную область. Таким образом, величина pH в подземных водах угольных бассейнов районов ликвидированных шахт определяется карбонатным равновесием, регулируется системой вода– CO_2 –органическое вещество–порода и зависит от формационной принадлежности водовмещающих пород.

С целью получения представлений о формах миграции химических элементов и о способности вод к растворению и минералообразованию для средних обобщенных составов природных и техногенно-измененных вод выполнены физико-химические расчеты электролитической диссоциации (комплексообразования). Установлено, что миграция макрокомпонентов в природных подземных водах Сахалина осуществляется преимущественно в виде собственных незакомплексованных ионов, доля которых для натрия составляет 99.8 %, магния – 96.9 %, кальция – 95.82 %. Рост доли комплексных соединений

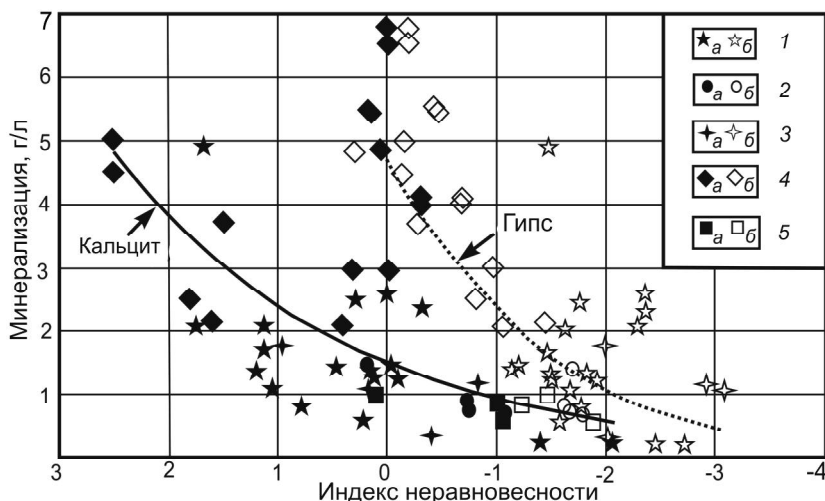


Рис. 4. Зависимость значений индексов неравновесности кальцита (а) и гипса (б) от минерализации подземных вод районов ликвидированных шахт Сахалина: 1 – Бошняково; 2 – Горнозаводская; 3 – Макаровская; 4 – Мгачи; 5 – Шебунино.

отчетливо наблюдается в водах, формирующихся в нарушенных горных массивах шахт. Особенно хорошо это проявлено на примере кальция и магния, а также некоторых микрокомпонентов, среди которых наибольшее количество комплексов создают Cu (73.58 %), Zn (56.51 %), Cd (42.25 %) и Sr (22.64 %). Эти компоненты представлены, наряду с незакомплексованными ионами, гидрокарбонатными, карбонатными и сульфатными комплексами.

Особенности миграции химических компонентов в подземных водах влияют на накопление элементов в растворах, а их содержание контролируют вторичные минералы, которые образуются в неравновесной системе вода–порода. Состав таких минералов определяется стадией взаимодействия воды с горными породами и интенсивностью водообмена.

Расчет степени равновесия подземных вод районов ликвидированных шахт Сахалина с широким спектром минералов свидетельствует о том, что рассматриваемые подземные воды недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов, но равновесны с вторичными минералами. Это свидетельствует о медленном, но непрерывном растворении первичных алюмосиликатов водовмещающих пород с образованием разнообразных вторичных минеральных фаз. Многими исследователями считается, что в первую очередь выщелачиваются легкоподвижные элементы (Na, Ca, Mg), поэтому мы наблюдаем значительное увеличение их концентраций в водах с ростом минерализации. А такие элементы, как Fe, Al и Si, в слабощелочном растворе менее подвижны, поэтому резкого их накопления не наблюдается, однако именно эти компоненты дают начало новым минеральным фазам, по которым можно судить о насыщенности раствора тем или иным компонентом. Так, например, кремний мигрирует в подземных водах в

основном в форме кремниевой кислоты (H_4SiO_4) и при обычных температурах основными минералами, контролирующими содержание кремния в подземных водах, являются – гиббсит и каолинит (рис. 5 а). При этом с ростом отношения $[Na^+]/[H^+]$ предпочтение получает монтмориллонит относительно каолинита, а при минерализации > 4 г/л достигается равновесие к анальциму (рис. 5 в). Разброс точек является достаточно широким и захватывает не только поля устойчивости монтмориллонита, каолинита и иллита, но и мусковита, Mg-хлорита, что свидетельствует о насыщенности вод калием и магнием.

На диаграммах (рис. 5 д, е, ж) хорошо прослеживается степень насыщенности вод по отношению к карбонатам. При увеличении насыщенности вод кальцием формируются Ca-монтмориллониты и кальцит. Также хорошо демонстрируется строго пропорциональная зависимость содержаний натрия и кальция (рис. 5 е). Важно также обратить внимание на равновесность исследованных вод шах. Мгачи с анортитом (рис. 5 д). Подобное равновесие, по утверждению С.Л. Шварцева [9], возможно только при высоких значениях произведения $[Ca^{2+}] \cdot [HCO_3^-]^2$. Следовательно, подземные воды в районе шахты Мгачи характеризуются достаточно высокими значениями произведения $[Ca^{2+}] \cdot [HCO_3^-]^2$, но образующиеся карбонаты Ca (рис. 5 ж) препятствуют установлению равновесия воды с кальциевыми алюмосиликатами [6]. В водах с повышенным содержанием сульфат-иона (шх. Мгачи) достигается равновесие с гипсом (рис. 5 з).

Таким образом, каждый этап формирования состава подземных вод характеризуется активным концентрированием одних элементов и менее активным других. Наличие геохимических барьеров приводит к различному геохимическому эффекту от одних и тех же химических процессов.

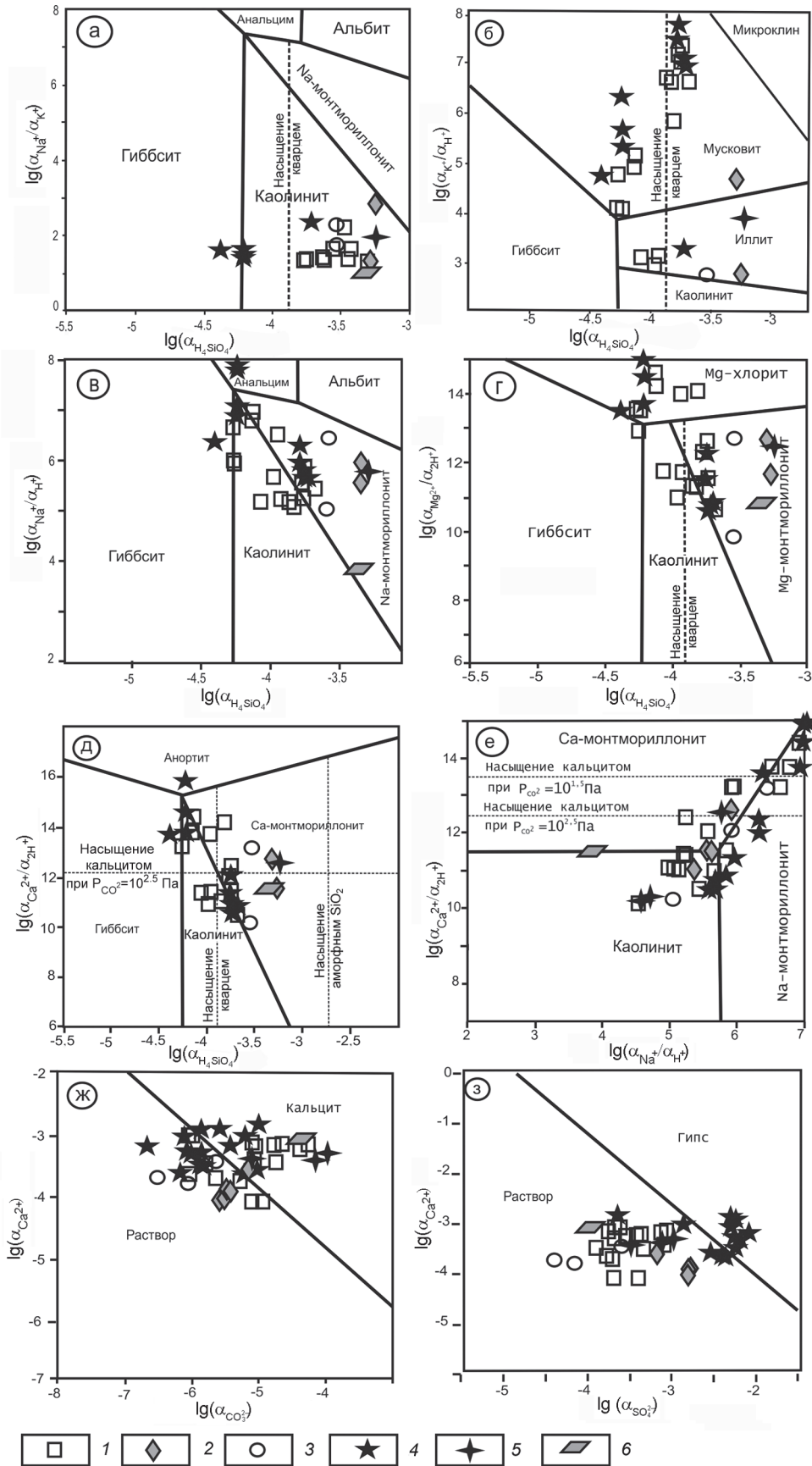


Рис. 5. Диаграммы равновесия основных минералов с нанесением данных по составу подземных вод ликвидированных шахт (1 – Бошняково; 2 – Горнозаводская; 3 – Макаровская; 4 – Мгачи; 5 – Шebuнино) и вод аллювиального водоносного горизонта (6) Сахалина: а – система $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{Na}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2$; б – система $\text{H}_2\text{O}-\text{K}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$; в – система $\text{H}_2\text{O}-\text{Na}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$; г – система $\text{H}_2\text{O}-\text{MgO}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$; д – система $\text{H}_2\text{O}-\text{CaO}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2-\text{Al}_2\text{O}_3$; е – система $\text{H}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3-\text{CaO}_2-\text{Na}_2\text{O}-\text{CO}_2-\text{SiO}_2$; равновесие подземных вод с кальцитом (ж) и гипсом (з).

Вариации граничных условий протекания геохимических процессов в системе вода–порода образуют различные виды геохимической зональности подземных вод [2]. Изучение временных колебаний состава подземных вод рассматриваемых районов, наблюдаемых в течение 2001–2010 гг., позволило выявить гидрохимические вариации в техногенном комплексе, которые не приводят к принципиальному изменению геохимического типа воды, однако устанавливают некоторую геохимическую зональность подземных вод. В результате статистической обработки имеющихся данных выделено 8 подтипов подземных вод техногенного комплекса, характерных для определенных гидродинамических режимов, обусловленных, вероятно, сезонными колебаниями (табл. 4).

Для подтверждения определяющего влияния на гидродинамический режим и, как следствие, на химический состав подземных вод атмосферных осадков выполнено определение содержаний δ^2D и $\delta^{18}O$ в подземных водах техногенных комплексов ликвидированных шахт Сахалина. Полученные результаты свидетельствуют о том, что по изотопному составу исследованные воды достаточно легкие по сравнению с морскими, содержания стабильных изотопов изменяются в пределах $\delta^2D = (-92.1 - -101.1 \text{ ‰})$; $\delta^{18}O = (-12.8 - -13.7 \text{ ‰})$, что соответствует диапазону вариаций изотопов инфильтрационной природы. Фигуративные точки, отвечающие составу этих вод, расположены вдоль линии глобальной метеорной прямой (рис. 6). Это доказывает, что наиболее вероятным источником рассматриваемых вод являются инфильтрационные воды, измененные по химическому составу в толще пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основании изучения особенностей современного химического состава подземных вод угленосных районов Сахалина можно сделать следующие выводы:

- Состав подземных вод, не подверженных влиянию затопленных угольных шахт, гидрокарбонатный, преимущественно кальциевый. Воды весьма пресные (минерализация 0.3 г/л), мягкие и нейтральные;
- В условиях нарушенного горного массива наблюдается смена катионного состава вод от кальциевого к натриевому. Формируются солоноватые (минерализация до 5.3 г/л), гидрокарбонатные, сульфатно-гидрокарбонатные, гидрокарбонатно-сульфатные и сульфатные натриевые воды;
- Наименьшие пределы минерализации свойственны водам гидрокарбонатного натриевого типа, отражающим начальные фазы их метаморфизации, наибольшие – сульфатным натриевым, сформировавшимся в результате процессов наиболее глубокой метаморфизации;
- В подземных водах угольных месторождений районов ликвидированных шахт величина pH определяется карбонатным равновесием, регулируется системой вода–CO₂–органическое вещество–порода и зависит от формационной принадлежности водовмещающих пород;
- Воды, формирующиеся в техногенно-нарушенных условиях затопленных шахт, отличаются от вод природных комплексов соотношением форм водной миграции химических элементов и минералооб-

Таблица 4. Подтипы гидрохимического режима подземных вод районов ликвидированных шахт Сахалинского угольного бассейна.

Средняя минерализация, г/л	Наименование шахты				
	Мгачи	Горнозаводская	Шебунино	Бошняково	Макаровская
Природный водоносный комплекс					
HCO₃-Ca тип					
0.34					HCO ₃ -Ca
Техногенный водоносный комплекс					
HCO₃-Na тип					
0.83					HCO ₃ -Mg-Ca-Na
1.30					HCO ₃ -Mg-Na
1.72	Cl-HCO ₃ -Na		Cl-HCO ₃ -Na	Cl-HCO ₃ -Na	
1.76	SO ₄ -HCO ₃ -Na	SO ₄ -HCO ₃ -Na			
1.97				HCO ₃ -Na	HCO ₃ -Na
2.15	HCO ₃ -Ca-Na				
SO₄-Na тип					
4.29	HCO ₃ -SO ₄ -Na	HCO ₃ -SO ₄ -Na			
4.58	SO ₄ -Na	SO ₄ -Na			

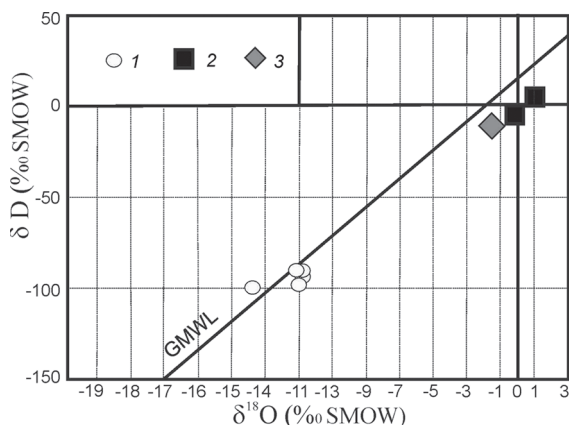


Рис. 6. Соотношение изотопов кислорода (^{18}O) и водорода (^2H) в подземных водах затопленных угольных шахт Сахалина.

1 – подземные воды шахт Сахалинской области; 2 – стандарт океанической воды [5]; 3 – морская вода Амурского залива [7]; GMWL – глобальная линия метеорных вод (линия Крейга).

разующей способностью. В природных водах практически все элементы мигрируют преимущественно в виде собственных ионов. Соотношения форм водной миграции в техногенных водах по всем элементам сдвигаются в сторону образования комплексных, преимущественно гидрокарбонатных, карбонатных и сульфатных соединений;

· Рассматриваемые подземные воды недонасыщены относительно первичных алюмосиликатов, но равновесны с вторичными минералами. Неравновесность воды к первичным алюмосиликатам свидетельствует о хотя и медленном, но непрерывном их растворении с образованием разнообразных вторичных минеральных фаз;

· Источником рассматриваемых вод являются инфильтрационные воды, измененные по химическо-

му составу в толще пород. По мере варьирования гидродинамических режимов, связанных, вероятно, с сезонными колебаниями, наблюдаются вариации отдельных параметров подземных вод, но только в строго определенных пределах, не изменяющие в целом специфики состава подземного бассейна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геология угольных месторождений СССР / Под ред. А.К. Матвеева. М.: Изд.-во МГУ, 1990. 352 с.
2. Геохимия подземных вод. Теоретические, прикладные и экологические аспекты / С.Р. Крайнов, Б.Н. Рыженко, В.М. Швец; отв. ред. акад. Н.П. Лаверов. М.: Наука, 2004. 677 с.
3. Гидрогеология Азии / Под ред. Н.А. Маринова. М.: Недра, 1974. 576 с.
4. Гидрогеология СССР. Т. XXIV. Остров Сахалин / Под ред. Е.Г. Чаповского, О.В. Равдоникас. М., 1972. 344 с.
5. Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шварцев С.Л. и др. Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск: Наука, Сиб. отд-ние, 1982. 240 с.
6. Тарасенко И.А. Гидрогеохимические особенности подземных вод ликвидированной шахты "Мгачи" в Сахалинской области и оценка их экологического влияния на поверхностные водотоки // Геориск. 2011. № 2. С. 48–56.
7. Челноков Г.А., Харитонов Н.А., Зыкин Н.Н., Верещагина О.Ф. Генезис подземных минеральных вод Раздольненского проявления (Приморский край) // Тихоокеан. геология. 2008. Т. 27, № 6. С. 65–72.
8. Шахтные воды угольной промышленности. Ч. I. Пермь, 1989. 134 с.
9. Шварцев С.Л. Гидрогеохимия зоны гипергенеза. 2-е изд., исправл. и доп. М.: Недра, 1998. 366 с.
10. Шварцев С.Л. Прогрессивно самоорганизующиеся абногенные диссипативные структуры в геологической истории земли // Литосфера. 2007. № 1. С. 65–89.

Рекомендована к печати О.В. Чудаевым

I.A. Tarasenko, A.V. Zinkov

Specific features of present-day chemical composition of ground-water in coal-bearing districts of Sakhalin Island

The paper discusses the specific features of the present-day chemical composition of underground waters in coal-bearing districts of Sakhalin Island. It was established that the processes, occurring in the underground hydrosphere in response to flooding of the coal mines, are accompanied by an increase in the dissolved matter concentrations and change of the underground water composition. A strictly specified complex of the secondary solid and liquid formations is produced. Temporal fluctuations of the underground water compositions of the anthropogenic horizons don't cause the principal change of the geochemical water type. The mine water composition doesn't depend on the type of hydrogeological structures and coal metamorphism, but is governed by hydrogeological parameters and primarily by the time of water-rock interaction.

Key words: ground waters, abandoned mines, hydrochemistry, formation conditions, equilibrium, Sakhalin Island.