

*На правах рукописи*



**Тарасенко Ирина Андреевна**

**ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА  
И ЗАКОНОМЕРНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД  
В ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИХ СТРУКТУРАХ  
РАЙОНОВ ЛИКВИДИРОВАННЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

**Специальность 25.00.09 – Геохимия, геохимические методы поисков  
полезных ископаемых  
25.00.36 – Геоэкология**

**Автореферат  
диссертации на соискание ученой степени  
доктора геолого-минералогических наук**

**Владивосток – 2014 г.**

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Дальневосточном геологическом институте Дальневосточного отделения Российской академии наук

**Научный консультант:** доктор геолого-минералогических наук, профессор  
**Чудаев Олег Васильевич**

**Официальные оппоненты:** **Алексеев Сергей Владимирович**, доктор геолого-минералогических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт Земной коры СО РАН, заведующий лабораторией гидрогеологии

**Бортникова Светлана Борисовна**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, заведующая лабораторией геоэлектрoхимии

**Рыженко Борис Николаевич**, доктор химических наук, Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, заведующий лабораторией моделирования гидрохимических и гидротермальных процессов

**Ведущая организация:** Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт водных и экологических проблем ДВО РАН

Защита состоится «12» февраля 2015 г. на заседании диссертационного совета Д003.059.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Институте геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук по адресу: 664033, а/я 304, г. Иркутск, ул. Фаворского, 1А.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке и на сайте (<http://www.igc.irk.ru>) Федерального государственного бюджетного учреждения науки Института геохимии им. А.П. Виноградова Сибирского отделения Российской академии наук

Автореферат разослан « » ноября 2014 г.

Ученый секретарь диссертационного совета,  
кандидат геолого-минералогических наук



Г.П. Королева

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность исследований** определяется масштабами последствий реструктуризации угольной отрасли, которая была проведена в исторически короткие сроки и обладала огромным размахом. Ликвидированы сотни угледобывающих предприятий. Закрытие угольных шахт преимущественно осуществляется методом «мокрой» ликвидации, при котором водоотлив прекращается и горнодобывающие предприятия, десятилетия осушавшие огромные прилегающие пространства, затопливаются до уровня естественных отметок зеркала подземных вод. В результате трансформируется гидродинамический режим подземных вод, повышается уровень грунтовых вод, происходит подтопление земной поверхности. В регионах возрастает техногенное воздействие на подземные воды, которое вызывает изменение гидрохимического фона и приводит к формированию в верхней части подземной гидросферы новых, ранее не свойственных ей, геохимических типов вод. Происходит влияние на безопасность бассейна подземных вод и, как следствие, на основные источники водоснабжения регионов, а также на поверхностные водотоки, имеющие важное рыбохозяйственное значение. Для некоторых населенных пунктов проблема водоснабжения и загрязнения водотоков высшей рыбохозяйственной категории приобретает кризисный характер. В связи с этим изучение особенностей состава и закономерностей формирования подземных вод в природно-техногенных структурах районов ликвидированных угольных шахт является чрезвычайно актуальным и имеет важное практическое значение для разработки основ гидрохимических прогнозов и мероприятий по минимизации воздействия на окружающую природную среду.

В качестве **объектов исследований** выбраны подземные воды районов ликвидированных угольных шахт, так как, являясь активной составляющей геологической среды, они участвуют в преобразовании, миграции и концентрировании вещества и, преобразуясь сами, служат носителями информации, необходимой для принятия тех или иных научных и инженерных решений.

**Цель исследований.** Установить геохимические особенности состава и закономерности формирования подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт на основе развития методологических подходов к оценке и прогнозированию флуктуаций состава подземных вод, формирующихся в природно-техногенных структурах.

### **Задачи исследований:**

1. Изучить геологические и гидродинамические условия формирования подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт;
2. Выявить особенности изменчивости химического состава подземных вод в сформировавшихся природно-техногенных структурах, формы миграции макро-, микроэлементов и ассоциации равновесных вторичных минералов стабильные в условиях той или иной гидрогеохимической среды;

3. Использовать эмпирически установленные региональные закономерности формирования состава подземных вод в природно-техногенных структурах ликвидированных угольных шахт для разработки основ гидрохимического прогноза;

4. Оценить масштабы влияния затопленных угольных шахт на безопасность бассейна подземных вод и, как следствие, на основные источники водоснабжения регионов.

Указанные задачи охватывают как научные, так и прикладные аспекты: от условий формирования состава вод в природно-техногенных структурах до конкретного воздействия вод затопленных угольных шахт на окружающую природную среду и источники питьевого водоснабжения. Они относятся к приоритетному направлению развития науки, технологий и техники «Рациональное природопользование», а также к Перечню критических технологий РФ (п. 19, 21), утвержденным Указом Президента Российской Федерации от 07.07.2011 г. № 899.

Поставленные задачи актуальны как для регионов Дальнего Востока, так и для европейской части России, Урала, Сибири, дальнего и ближнего зарубежья. Именно поэтому при выборе районов исследования автор стремился охватить, по возможности, более широкий круг горно-геологических условий. Опорными *районами исследования* выбраны угольные бассейны Приморского края и Сахалинской области. Привлечены также гидрогеохимические материалы по таким крупным угольным бассейнам России и Украины, как Донецкий, Кизеловский, Кузнецкий, Печорский и Челябинский.

**Фактический материал и личный вклад автора.** Диссертационная работа основана на непрерывном, методологически и технически стандартизированном процессе наблюдений и измерений показателей, характеризующих гидродинамические особенности затопления угольных шахт, а также флуктуации составов подземных и поверхностных вод. Под руководством и при непосредственном участии автора, в период работы в ОАО «ДальвостНИИпроектуголь», а также научно-исследовательской деятельности в Дальневосточном геологическом институте ДВО РАН, на территориях ликвидируемых угледобывающих предприятий Приморского края и Сахалинской области проводились систематические гидрогеологические и экологические исследования, выполнявшиеся в рамках договорных работ с ПримЦЭМ и ГУРШ. Осуществлялись экологические обследования полей ликвидируемых шахт, авторское сопровождение рабочего проекта «Экологический мониторинг по ликвидируемым шахтам и разрезам Приморского края и Сахалинской области», научно-исследовательская работа, касающаяся разработки рекомендаций по технологии очистки загрязненных вод, выходящих на поверхность при закрытии шахт в Приморском крае, и последующее авторское сопровождение работ по процессу очистки шахтных вод (шахты «Нагорная» и «Углекаменская»). Выполнялась разработка инженерных мероприятий по защите от подтопления зданий и сооружений, расположенных на горных отводах шахт [РП «Инженерные ме-

роприятия ...», 2003 г.]; корректировка рабочего проекта экологического мониторинга [РП «Экологический мониторинг ...», 2007 г.]; подготовка отчетов о результатах экологического обследования полей ликвидируемых шахт Приморского края и Сахалинской области [Отчет о результатах ..., 2003; 2005] и о результатах биологического мониторинга [Отчет о результатах ..., 2004].

Аналитические работы (макро- и микроэлементный состав вод) выполнялись в аккредитованных лабораториях Приморского гидрометрического агентства Федеральной службы России по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (г. Владивосток), ГП «Дальинформгеоцентр» и Сахгидромета (г. Южно-Сахалинск). Исследования твердых минеральных фаз, определение содержаний  $\delta^2\text{H}$ ,  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^{32}\text{S}$  и  $\delta^{34}\text{S}$  в подземных водах техногенных комплексов, осуществлялись в аналитическом центре ДВГИ ДВО РАН. Пробы, характеризующиеся значительными количествами углеводов, анализировались в Экоаналитической лаборатории ООО «Экоаналитика».

Полученные фактические материалы, положены в основу диссертационной работы. Все разделы диссертации выполнены автором лично. Основные положения и выводы диссертационной работы опубликованы.

#### **Защищаемые положения:**

1. Подземные водоносные горизонты при затоплении угольных шахт не восстанавливаются в прежних параметрах и координатах, а формируют гидравлически связанный техногенный водоносный комплекс. Его формирование определяется особенностями современной гидрогеологической стратификации надугольной и угольной толщ, масштабами зоны водопроводящих трещин, величиной водопритока и емкостными характеристиками сдренированного массива.

2. Геохимическая специфика подземных вод техногенного комплекса природно-техногенных структур Приморья и Сахалина закладывается в области питания и трансформируется в направлении фильтрационного потока по схеме:  $\text{HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Na(Mg)} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na(Mg)} \rightarrow \text{SO}_4\text{-Na(Mg)}$ . Она определяется соотношением взаимодействующих масс породы и воды, контролируется парциальным давлением  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  в системе «вода–порода» и процессами вторичного минералообразования.

3. Формирование геохимических типов подземных вод в природно-техногенных структурах зависит от состава пород осадочных бассейнов и, в первую очередь, от наличия в угольных и надугольных толщах морских, соленосных и пресноводных групп геологических формаций, которые определяют направленность процессов растворения в системе «вода–порода».

4. Влияние техногенного водоносного комплекса на бассейн подземных вод и поверхностные водотоки в районах ликвидированных угольных шахт носит локальный в пространстве характер. Особенности сформировавшейся гидрогеологической структуры определяют размеры гидрогеохимических полей техногенно-

трансформированных вод и масштабы их воздействия на окружающую природную среду.

**Научная новизна работы:**

1. Исследована нарушенная горными работами 200–800-метровая толща обводненных пород как самостоятельная природно-техногенная гидрогеологическая структура. Показано, что подземные водоносные горизонты при затоплении угольных шахт не восстанавливаются в прежних параметрах и координатах, а формируют гидравлически связанный техногенный водоносный комплекс со значительными отклонениями (от природного комплекса) в скоростном (фильтрационном) и напорном (уровневом) аспектах.

2. Для подземных вод районов ликвидированных угольных шахт впервые установлены формы миграции макро-, микроэлементов и изменчивость их соотношений при эволюции системы «вода–порода». С помощью физико-химического моделирования определены закономерности гидрогеохимических процессов, ряды изменения состава подземных вод в условиях природно-техногенных структур и ассоциации равновесных вторичных минералов, стабильные в условиях той или иной гидрогеохимической среды.

3. Впервые выполнена геохимическая систематизация подземных вод, формирующихся в районах ликвидированных шахт, на основе классификации Алекина–Никольской–Посохова [Алекин, 1953; Никольская, 1961; Посохов, 1969], базирующейся на генетических принципах. С позиции межрегионального распространения рассмотрены типы (классы) подземных вод, формирующиеся в природно-техногенных структурах Донецкого, Кизеловского, Кузнецкого, Печорского, Челябинского, Партизанского, Раздольненского, Угловского и Сахалинского угольных бассейнов. Установлена коррелируемость состава вод техногенных комплексов с особенностями геологического строения осадочных бассейнов и, прежде всего, с наличием в угольных и надугольных толщах морских, соленосных и пресноводных групп геологических формаций.

4. Разработаны методологические основы гидрохимического прогноза при затоплении угольных шахт в зависимости от формационной принадлежности пород надугольной толщи. Выделены типы вод (I  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ; I  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ ; IIa  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ; IIa  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ ; IIa  $\text{SO}_4\text{-Mg}$ ; IIa  $\text{SO}_4\text{-Na}$ ; IIб  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ; IIб  $\text{SO}_4\text{-Na}$ ; IIб  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ; IIб  $\text{SO}_4\text{-Mg}$ ; IIIa  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ; I, IIa, IIб и IIIa  $\text{Cl-Na}$ ) характеризующие условия и процессы их формирования в природно-техногенных структурах, являющиеся региональными маркерами формационной принадлежности водовмещающих пород.

5. Впервые созданы визуализированные цифровые модели гидрохимических полей районов ликвидированных угольных шахт, основанные на интерполяции значений минерализации подземных вод. Показаны масштабы влияния техногенного водоносного комплекса на безопасность бассейна подземных вод и, как след-

ствии, на основные источники водоснабжения регионов, а также на поверхностные водотоки, имеющие рыбохозяйственное значение.

### **Практическая значимость работы.**

Полученные результаты важны при разработке гидрохимических прогнозов, мероприятий по управлению качеством подземных вод и борьбе с загрязнением окружающей среды в районах проектируемых, действующих и ликвидируемых угольных шахт и разрезов. Они полезны проектным и производственным организациям, службам экологического мониторинга и научно-исследовательским институтам, проводящим планирование и реализацию работ по обеспечению экологической безопасности бассейна подземных вод, источников водоснабжения, а также поверхностных водотоков.

Практическая ценность работы обеспечена распространением ее результатов на действующие предприятия и на вновь осваиваемые месторождения, где важной задачей уже на предпроектной стадии являлось сохранение окружающей природной среды. Разработанные основы гидрохимического прогноза, подходы к оценке техногенного воздействия на окружающую среду использовались автором при написании проектов горно-экологического мониторинга и ОВОС (Оценка воздействия на окружающую среду) к Проекту по расширению и техническому перевооружению разреза «Лучегорский-2» ..., 2002 г.; к Проекту строительства шахты «Северная» ООО «Северный Ургал», 2003 г.; к Проекту реконструкции шахты «Нагорная» ОАО «Шахта Нагорная», 2004 г.; к Проекту строительства разреза «Ерковецкий» ООО «Амурский уголь»..., 2004 г.; к Проекту отработки части запасов пласта В-26 на участке «Северный Ургал» шахты «Ургал» ОАО «Ургалуголь», 2005 г.; к Проекту строительства участка «Долина» Шкотовского бурогоугольного месторождения, 2005 г.; к Корректировке проекта строительства шахты «Северная» производственной мощностью 4500 тыс. тонн на геологическом участке «Северный Ургал» ОАО «Ургалуголь», 2007 г.; к Корректировке проекта строительства разреза ООО «Сахалинуголь-2» ..., 2007 г.; к Проекту строительства и отработки угольного разреза «Солнцевский-2», 2007 г.; к Проекту отработки участка открытых работ «Буреинский» ОАО «Ургалуголь», 2007 г., а также Проекта ликвидации шахты ООО «Правобережное», 2007 г.; и др., прошедших государственную экспертизу и реализованных на практике.

Результаты работы имеют значение для таких областей знаний, как геохимия, геоэкология, гидрогеология, инженерная геология, горнопромышленная экология и используются в учебном процессе.

**Апробация работы.** Основные положения авторских исследований докладывались и обсуждались на международных, всероссийских и региональных конгрессах, конференциях, симпозиумах (Москва, 2002, 2003; Болонья, 2003; Флоренция, 2004; Владивосток, 2005, 2006, 2008, 2009; Барселона, 2006; Нижний Тагил, 2008; Хабаровск, 2008, 2014; Чита, 2008; Иркутск, 2012).

По тематике диссертации опубликовано более 60 печатных работ, в том числе 13 статей из Перечня ведущих рецензируемых научных журналов и изданий ВАК Минобрнауки России.

**Структура и объем работы.** Диссертация состоит из введения, 6 глав и заключения. Общий объем работы составляет 327 страниц машинописного текста, 134 иллюстраций и 100 таблиц. Список литературы включает 441 наименование.

Автор признателен своим первым учителям – Б.П. Каменскому, Р.Я. Старовойтовой, Т.В. Шаманской, привившим начальный интерес к геологии и основам профессиональной культуры. Автор искренне благодарен научному консультанту д.г.-м.н., профессору О.В. Чудаеву, академику А.И. Ханчуку, члену-корреспонденту Е.В. Складову, докторам наук О.В. Авченко, Ю.А. Мартынову, В.В. Наумовой, А.К. Седыху, В.Г. Хомичу, С.Л. Шварцеву, кандидатам наук Л.П. Алексеевой, Н.Н. Баринину, Г.А. Бахарева, А.С. Ваху, Т.Н. Елисафенко, П.П. Сафронову, а также Т.Б. Афанасьевой, Н.В. Зарубиной, Н.Н. Семенович, сотрудникам ОАО «ДальвостНИИпроектуголь» О.А. Акимовой, Л.Г. Буяновой, Т.М. Кадыровой, Т.В. Тарасовой и Т.Г. Языниной, руководству ПримЦЭМ А.М. Зайко, А.Н. Стихину и гидрогеологу А.А. Николаеву, профессиональное сотрудничество и многолетнее общение с которыми всегда оказывали большое влияние на автора. Автор выражает благодарность начальнику Уральского регионального центра госмониторинга состояния недр д.г.-м.н. С.Н. Елохиной и главному специалисту Госуправления охраны окружающей природной среды в Донецкой области О.Н. Лысенко. Особая признательность и благодарность за многолетнюю поддержку профессору А.В. Зинькову.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** обоснована актуальность работы, сформулированы цели и основные задачи, научная новизна и практическая значимость исследований.

### Глава 1. СОСТОЯНИЕ ИЗУЧЕННОСТИ ПРОБЛЕМЫ

В главе показано, что вопросы формирования и изменения состава подземных вод всегда привлекали большое внимание исследователей, однако геохимия шахтных вод в должной мере не рассматривалась. Большая часть гидрогеологических работ предшественников на угольных месторождениях была посвящена изучению обводненности месторождений, прогнозированию водопритоков в горные выработки и разработке способов борьбы с этими явлениями [Плотников, 1959; Троянский и др., 1960; Сыроватко, 1960; Абрамов, 1955; Абрамов, Скиргелло, 1968; Абрамов и др., 1968, 1976; Пересунько, 1968; Бабушкин, 1974; Гварцман, Кацнельсон, 1977; Мироненко и др., 1977, 1980; Мироненко, Румынин, 1982, 1985 а, б, 1986; и др.]. Значительно меньшее количество работ касалось изучения химии подземных и шахтных вод угольных месторождений в период их отработки [Крав-

цов, 1948; Калыгин, 1961; Соболева, Пельтихин, 1965; Соболева, 1966; Назарова, 1968, 1969; Миненко, Епифанцева, 1973; Севрикова, 1972, 1978; Панасенко и др., 1974; Плескачевская, 1974; Кононенко, 1976; Солнцева, Никифорова, 1982; Воронов, 1986, 1992; Шахтные воды угольной промышленности, 1989; и др.]. Некоторые работы были посвящены рассмотрению возможности использования шахтных вод угольных месторождений для питьевого или технического водоснабжения, мелиорации земель [Дружинин и др., 1959; Попов, Плевако, 1974; и др.] и в качестве источника гидроминерального сырья [Ершов, Щеглова, 1958; Пономарев, 1974; Рохлин, Рубейкин, 1986; Куликов и др., 1984].

Изучение химического состава подземных вод, формирующегося в результате затопления угольных шахт, началось сравнительно недавно, имеются отчеты и публикации [Норватов, Петрова, 1999; Норватов, 2007; Потапенко, 2001; Айрапетян, 2001; Садардинов и др., 2002, 2004; Елисафенко и др., 2003; Блинов и др., 2003; Мохов, 2003; Буянова и др., 2004; Техногенные последствия ..., 2004; Елохина, 2004, 2013; Холостова, Максимович, 2005; Максимович и др., 2006; Проскурня, Тарасова, 2007; Информационный бюллетень ..., 2007; Экологический мониторинг..., 2010; Демкин и др., 2010; Ягунова, 2010 г.; Лудзиш (<http://www.ineca.ru/?dr=bulletin/arhiv/0137/&pg=020>); Полтавец, Кабаков (<http://www.lgh.com.ua/files/minewater.pdf>); Имайкин, 2012; Имайкин и др. ([http://geo.web.ru/conf/geolog\\_2/gl\\_5/5\\_16.rtf](http://geo.web.ru/conf/geolog_2/gl_5/5_16.rtf)); и др.], но, несмотря на значительный объем выполняемых исследований и накопленный к настоящему времени опыт наблюдений, основные усилия специалистов сегодня все же направлены на выполнение мониторинга и на решение главным образом инженерных задач.

Очевидно, что процессы формирования состава подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт, литогенетические преобразования толщи пород при ее техногенном обводнении по существу являются гипергенными процессами. Истоки исследований по изучению гипергенеза связаны, как известно, с идеями академика В.И. Вернадского [1927, 1933], который показал важную роль водных растворов в разрушении и преобразовании горных пород. Идеи В.И. Вернадского нашли отражение при изучении закономерностей формирования состава подземных вод в работах его современников, учеников и последователей [Ферсман, 1933–1939; Бунеев, 1932; Саваренский, 1933, 1947, 1950, Саваренский, Афанасьев, 1946; Чухров, 1936; Каменский и др., 1938; Сулин, 1946; Польшов, 1956; Бродский, 1957; Крылов, 1958; Виноградов, 1959, 1967; Толстихин и др., 1959; Посохов, 1960, 1969, 1972, 1975, 1981, 1985; Алекин, Бражникова, 1964; Алекин, 1953, 1970; Перельман, 1968, 1972, 1973, 1989; Гольдберг, 1968, 1976, 1987; Гольдберг, Газда, 1984; Гольдберг, Скворцов, 1986; Овчинников, 1970; Зайцев, Толстихин, 1963, 1972; Зайцев, 1986; Гинзбург и др., 1966; Кононова и др., 1971; Кононова, 1974; Питьева, 1971, 1978, 1984; Щербина, 1972; Бочевер, Орадовская, 1972; Бочевер и др., 1979; Валяшко и др., 1973; Зверев, 1974, 2006, 2011; Ломоносов, 1974; Пинне-

кер, 1977, 1999; Пиннекер и др., 1982; Бугельский, 1979; Алексеев и др., 1984, 1989; Шварцев, 1985, 1991, 1994, 1998, 2007, 2008; Крайнов и др., 1986, 2001; Крайнов, Соломин, 1990; Крайнов, Зарубин, 1991; Крайнов, Швец, 1992; Крайнов, 1997; Крайнов, Рыженко, 2000; Писарский, 1987; Боровский и др., 1989; Рыженко и др., 1990, 1996, 1997, 2000, 2003, 2006; Рыженко, Крайнов, 2001; Кирюхин, Сырвада, 1961; Кирюхин, Альбинский, 1963; Кирюхин, 1975; Кирюхин, Толстихин, 1987; Кирюхин и др., 1988, 1989; Лебедев, 1976, 1989; Рынков, 1988; Чудаев и др., 1999, 2000, 2008; Чудаев, 2001, 2002, 2003; В.Н. Островский, А.В. Островский, 2000; Островский, 2009; Кулаков, 2004, 2011; Сорокина, 2005; Сорокина, Попов, 2007; Дутова, 2005; Бортникова и др., 2006, 2007, 2009; Глотов, 2009; Абдрахманов, Попов, 2010; Попов, Абдрахманов, 2013; и др.]. Этими учеными достигнуты значительные успехи в познании процессов гипергенеза и формирования химического состава подземных вод. Разработаны основные положения общей и региональной гидрогеологии, учения о режиме и балансе подземных вод, определены закономерности их изменения под влиянием климата. Разработаны основы построения моделей массопереноса, методы их аналитической и численной реализации, оценки характера и степени равновесности вод с широким спектром минералов.

Активно развивались гидрогеохимические исследования за рубежом. На базе методических приемов Р.М. Гаррелса и Ч.Л. Крайста [1968], обосновавших применение методов химической термодинамики в геохимических исследованиях, началось систематическое изучение фактического состояния равновесия водных растворов с разнообразными горными породами [Helgeson, 1968, 1971; Singer, Stamm, 1968; Paces, 1973; Truesdall, 1974; Berner, 1974; Chemical modelling ..., 1979; Plummer, 1984; Plummer et al., 1988; Драйвер, 1985; Lasaga, 1984; Schott et al., 1989; Bigham et al., 1990; Appelo, Postma, 1994; Sugimori et al., 1995; Blowes et al., 2003; Wang R. et al., 2004; Brezonik, Arnold, 2011; и др.]. Заложена база количественного познания процессов, составляющих основу гидрогеохимических явлений. Созданы фундаментальные справочные монографии и предложены способы вычисления термодинамических параметров [Pitzer, Mayorga, 1973; Pitzer, 1975, 1980; Nordstrom et al., 1979, 1983, 1990; Nordstrom, 1982; Nordstrom, Ball, 1984; Nordstrom, Olsson, 1987; Nordstrom, May, 1989; Aagaard, Helson, 1982; Robie, Hemingway, 1995; Springborg, 2010], необходимые для расчета, интерпретации и прогноза гидрогеохимических явлений.

С внедрением в геологические исследования методов термодинамики кардинально изменилась ситуация в области познания геологии в целом и зоны гипергенеза в частности. Созданы специализированные программы для моделирования природных процессов в системе «вода–порода» («Селектор» – [Карпов, 1981; Karrov et al., 1997, 2002; Карпов и др., 2001; Чудненко, Карпов, 2003]; «GIBBS» – [Шваров, 1976]; «Hydrgeo» – [Букаты, 1997]; «GEOCHEM» – [Mironenko et al., 2000] и др.), установлены термодинамические константы многих природных со-

единений и растворенных веществ. Доказано, что водный раствор всегда неравновесен с отдельными первичными минералами, но одновременно равновесен с определенной гаммой вторичных минеральных фаз, и именно это обстоятельство определяет способность воды непрерывно растворять минералы и формировать вторичные продукты.

Использование достижений выдающихся исследователей в качестве методической основы при изучении вод, формирующихся в техногенно-нарушенных горных массивах районов ликвидированных угольных шахт, позволило на современном уровне подойти к анализу накопленного фактического материала.

## Глава 2. МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЙ

В главе представлены аналитические методы и приемы, используемые для решения поставленных в работе задач. Показано, что оценка динамики затопления шахт и уровня режима подземных вод выполнялась по скважинам с использованием электроуровнемера. Замеры проводились в одни и те же дни каждого месяца. Опробование подземных и поверхностных вод осуществлялось в соответствии с действующими нормами (ГОСТ Р51592–2000; ГОСТ Р51593–2000). Подземные воды опробовались по скважинам, оборудованным фильтрами на определенный водоносный горизонт или комплекс. Воды техногенного водоносного комплекса опробовались по скважинам, имеющим связь с горными выработками и оборудованным фильтрами на подработанную толщу. Перед каждым отбором пробы осуществлялась прокачка скважины погружным насосом, при этом выкачивалось не менее трех объемов воды, содержащейся в стволе скважины. Кроме этого опробовались воды техногенных комплексов, изливающиеся на земную поверхность. Выполнялось опробование вод источников нецентрализованного водоснабжения (колодцы, родники и т.п.) и поверхностных водотоков.

По всем пробам выполнялся полевой и лабораторный химические анализы. В перечень контролируемых компонентов качества воды входили: органолептические показатели (температура, запах, цветность) и показатели химического состава воды, в том числе: рН, сухой остаток, общая жесткость, окисляемость перманганатная (ХПК) и бихроматная (БПК), щелочность, углекислота свободная, основные ионы ( $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ), биогенные вещества ( $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ.}}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HNO}_2$ ), типичные загрязняющие микрокомпоненты ( $\text{Be}^{2+}$ ,  $\text{V}^{3+}$ ,  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Pb}^{2+}$ ,  $\text{Se}^{2-}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{Mo}^{2+}$ ,  $\text{As}^{3-}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{Zn}^{2+}$ ,  $\text{Al}^{3+}$ ,  $\text{Cr}^{6+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$ ,  $\text{Li}^+$ ,  $\text{Cd}^{2+}$ ,  $\text{Hg}^+$ ,  $\text{Ba}^{2+}$ , нефтепродукты и фенолы).

Исследования составов вод выполнялись с применением сертифицированных аналитических методов на современном оборудовании (ион-хроматограф жидкостный LC-10Avp; ICP-MS; ISP-OIS, ИК Фурье-спектрофотометр IR FTIR-84008). При изучении состава и микроморфологии минеральных новообразований использовались химический, спектральный и рентгенофазовый (дифрактометр D8 Discover с  $\text{CuK}\alpha$ ; Дрон-3 с  $\text{FeK}\alpha$ ) анализы, а также метод инфракрасной спектроскопии (ИК Фурье-спектрометр NICOLET 6700, Termo), съемка на сканирующем

электронном микроскопе ZEISS EVO 50XVP, оснащенном рентгеновским энерго-дисперсионным спектрометром INCA Energy 350.

По величине минерализации, водородного показателя (pH) и жесткости воды классифицировались в соответствии с «Отраслевым стандартом ...» [1986]. Наименование водам давалось по соотношению эквивалентных (молярных) концентраций анионов и катионов в порядке их возрастания. Преобладающими считались ионы, содержащиеся в количествах 20 % и более, при условии, что сумма как анионов, так и катионов равна 100 %.

Для хранения, обобщения и математической обработки геохимической информации использовались методы математической статистики (кластерный анализ) и приемы физико-химического моделирования – решение уравнений термодинамических констант равновесия реакций (программа AquaChem V. 5.1 [2006]) и минимизации свободной энергии Гиббса (программа Селектор–Windows [Чудненко, Карпов, 2003]). Применялись сравнительные, комплексные и регионально-гидрогеологические подходы. Оценка экологической обстановки осуществлялась путем сравнения результатов анализов вод с предельно допустимыми концентрациями в соответствии с СанПиН и с Перечнем ПДК и ОБУВ вредных веществ. Выполнялось построение цифровых моделей гидрохимических полей с использованием программы Surfer 8.

Многочисленность объектов исследований, многократность повторных работ, использование высокоточных аналитических методов, современных приемов обработки информации и физико-химического моделирования способствовали объективности, репрезентативности выводов и развитию научных представлений о процессах, происходящих в природно-техногенных гидрогеологических структурах районов ликвидированных угольных шахт, направленных на решение сложной научно-практической проблемы рационального природопользования.

### **Глава 3. ГЕОЛОГО-ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ РАЙОНОВ ЛИКВИДИРОВАННЫХ УГОЛЬНЫХ ШАХТ**

В главе показано, что закономерности распределения и формирования подземных вод в угольных бассейнах Приморья и Сахалина обуславливаются сочетанием сложившихся к настоящему времени геолого-тектонических и структурно-гидрогеологических условий. Выполнено описание осадочных и вулканогенно-осадочных комплексов угольных бассейнов и месторождений. Показано, что рассматриваемые бассейны (месторождения) Приморья и Сахалина формировались в посторогенных обстановках в позднем мезозое и кайнозое, расположены в пределах синклиналей, брахисинклиналей, моноклиналей и приурочены к отдельным структурам – приразломным впадинам, межгорным и предгорным прогибам.

Месторождения Приморья и Сахалина относятся к вулканогенно-терригенному среднеугленосному типу угленосных формаций, а по принадлежности к литологической фации – к пресноводным.

В разрезах угленосных и синхронных им неугленосных осадков мезозоя Приморья установлены отложения следующих литолого-фациальных комплексов: пролювиально-аллювиального (до 70,9 %) – разномерные, преимущественно крупномерные песчаники; озерного (< 17,0 %) – алевролиты, мелкомерные песчаники, прослой аргиллитов; озеро-болотного (от 5,0 до 34,0 %) – алевролиты, аргиллиты, редко песчаники, углистые породы, угли; прибрежно-морского (< 12,3 %) – алевролиты, аргиллиты, углистые породы, угли; морского (< 22,2 %) – алевролиты, песчаники, редко конгломераты и гравелиты.

Для кайнозойских отложений Приморья характерно накопление болотно-озерных угленосных осадков, сопровождавшееся в плиоцене интенсивным дизъюнктивным тектогенезом с мощными излияниями базальтовой магмы. В результате преобладающими породами в разрезе отложений кайнозоя являются алевролиты (50,0 %), песчаники мелко- и тонкомерные (30,0 %), аргиллиты (12,0 %), конгломераты (4,0 %), угли (2,0 %) и туфогенные породы (2,0 %).

Разрез кайнозоя на Сахалине представляет собой чередование континентальных (угленосных) и морских толщ. В основании разреза залегает нижнедуйская угленосная свита эоцена, представленная песчаниками, алевролитами, аргиллитами, углями и конгломератами. Она перекрывается морскими и вулканогенно-осадочными олигоцен-нижнемиоценовыми отложениями (песчаники, алевролиты с известковистыми конкрециями, аргиллиты, гравелиты, конгломераты и туфы). Средний миоцен характеризуется отложениями как континентальных, так и переходных прибрежно-морских фаций, представленных конгломератами, песчаниками, гравелитами, аргиллитами, алевролитами, углистыми аргиллитами и пластами угля верхнедуйской свиты. Верхний миоцен и первая половина плиоцена характеризуются накоплением осадков в морских условиях (окремненные опоквидные глинистые алевролиты с маломощными прослоями глауконитовых песчаников, диатомовые глинистые алевролиты и глины с рассеянной галькой).

По степени метаморфизма угли разнообразны: бурые (неоген, палеоген Приморья) и каменные от длиннопламенных до антрацитов включительно (мезозой – мел). На Сахалине угли ( $N_1$  *vd*) являются как каменными, так и бурыми.

Для толщ бассейнов характерны углеводородные газы метанового ряда (в основном метан), а также азот, углекислота и сероводород.

В соответствии с принципами структурно-гидрогеологического районирования [Зайцев, Толстихин, 1963; Кирюхин, Толстихин, 1987], а также с учетом общих гидрогеологических особенностей показано, что исследуемые районы принадлежат к Сихотэ-Алинской и Сахалинской гидрогеологическим складчатым областям – гидрогеологическим структурам I порядка, которые по признаку преобладающего распространения подземных вод относятся [Гидрогеология ..., 1976]: 1) к Восточно-Маньчжурскому (Раздольненский каменноугольный бассейн, Хасанское месторождение) и Центральному Сихотэ-Алинскому (Партизанский каменноугольный

бассейн, Подгородненское месторождение) бассейнам трещинных вод (адмассивам); 2) к Приханкайскому (Угловский бурогольный бассейн – Шкотовское месторождение) и Паранайскому (Макаровское месторождение) артезианским бассейнам; 3) к Татарскому адартезианскому бассейну (Мгачинское, Бошняковское и Горнозаводское месторождения).

Краткая характеристика стратиграфических подразделений нижнемелового, палеогенового и неогенового угленакопления позволила выполнить гидрогеологическую стратификацию толщи пород, подверженной изменениям геометрии трещинного пространства под действием современных тектонических сил, связанных с особенностями отработки угольных пластов. Показано, что природная гидрогеологическая структура угольных месторождений предопределяет особенности естественного режима подземных вод, который характеризуется активным водообменом в пределах приповерхностного водоносного комплекса при его разгрузке в речных долинах. Приподнятость бортов впадин и хорошие фильтрационные свойства пород определяют высокую динамичность подземных вод. Повышенной интенсивности подземного водообмена в теплое время года на территориях Приморья и Сахалина способствуют значительные величины атмосферных осадков (до 1000 мм и более), а преобладание расчлененного рельефа и наличие густой, глубоковрезанной сети способствуют быстрому водообмену и дренированию горизонтов грунтовых вод. Мощности приповерхностной зоны повышенной проницаемости угленосных отложений рассматриваемых территорий Приморья и Сахалина (*Центрально-Сихотэ-Алинский и Восточно-Маньчжурский бассейны трещинных вод, Паранайский межгорный артезианский бассейн, Татарский адартезианский бассейн*) достигают 100–150 м и способствуют гидравлической связи между отдельными водоносными комплексами. Интенсивность инфильтрационного питания приповерхностного водоносного комплекса достигает  $(6\div 8)\cdot 10^{-4}$  м/сут [Норватов, 2007]. Коэффициент водопроводимости пород зоны дезинтеграции в среднем изменяется от 1 до 36 м<sup>2</sup>/сут, в трещиноватых приконтактных зонах достигает 50 м<sup>2</sup>/сут. В *Приханкайском артезианском бассейне* Приморья возможности инфильтрационного питания подземных вод ограничены, так как с поверхности здесь почти повсеместно распространены глины мощностью около 3 м. Внешние области питания бассейнов, представленные горно-складчатými сооружениями, сложены палеозойскими метаморфическими и вулканогенно-терригенными породами, мезозойскими и палеоген-неогеновыми осадочными и осадочно-вулканогенными образованиями. В зоне экзогенной трещиноватости палеозойских и мезозойских пород формируются грунтовые воды, максимальные глубины залегания которых (до 70–80 м) характерны для верхних частей склонов. Дебиты родников в зависимости от состава трещиноватых пород варьируются в пределах 0,001–3,0 л/с, удельные дебиты скважин – 0,001–0,1 л/с. В отложениях кайнозоя воды залегают на глубине 1,5–40,0 м и более. Водоносность пород слабая.

Промышленное освоение территорий рассматриваемых районов способствовало изменению условий природной гидрогеологической структуры осадочных бассейнов, привело к увеличению проницаемости надугольной толщи и нарушению естественного режима подземных вод. При ведении горных работ, над выработанным пространством в результате деформации надугольной толщи под действием современных тектонических сил образовались водопроводящие трещины, пересекающие относительные водоупоры и гидравлически связывающие водоносные пласты с выработанным пространством. Масштабы распространения водопроводящих трещин над выработанным пространством и нарушенность гидрогеологической стратификации горного массива определяли гидравлические особенности сформировавшихся структур. Высота зоны водопроводящих трещин зависела от мощности вынимаемого угольного пласта, литологического состава, прочностных свойств надугольной толщи и определялась способом обработки месторождения.

Все рассматриваемые угольные месторождения характеризуются наклонным залеганием продуктивной толщи, поэтому выемка угольных пластов выполнялась в нисходящем порядке с управлением кровлей методом полного обрушения.

Анализ водопритоков в горные выработки, расположенные в пределах месторождений Раздольненского (шахты «Ильичевская», № 4), Партизанского (шахты «Глубокая», «Авангард», «Северная», «Углекаменская») и Сахалинского (шахты «Мгачи», «Бошняково», «Макаровская», «Горнозаводская», «Шебунино») бассейнов, позволил утверждать, что при ведении работ на малых глубинах водопроводящие трещины достигали приповерхностного водоносного комплекса, за счет которого и формировались водопритоки в шахты. Наблюдалось линейное увеличение водопритока пропорционально отработанной площади. При дальнейшем ведении работ на глубину трещины не достигали приповерхностного водоносного комплекса, наблюдался довольно стабильный водоприток, не зависящий от увеличения площади отработки.

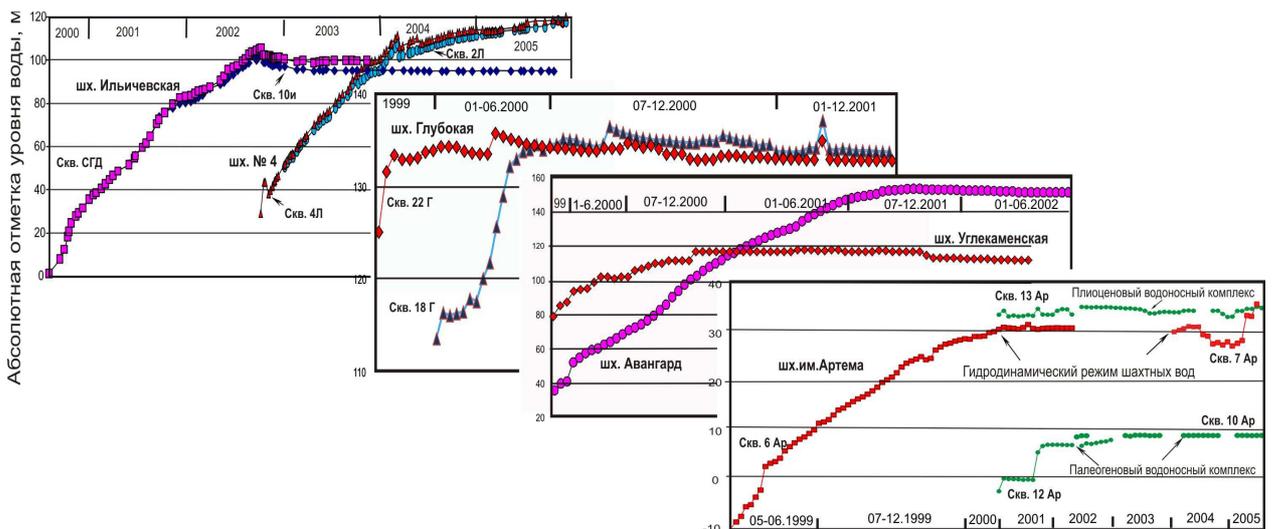
При работе шахты им. Артема (Угловский бассейн) водопроводящие трещины, образующиеся над выработанным пространством, по всей видимости, не достигали подошвы приповерхностного водоносного комплекса, так как водопритоки здесь возрастали прямо пропорционально площади очистных работ и формировались, вероятно, за счет перетекания через относительный водоупор.

При работе шахт Подгородненского и Хасанского месторождений наблюдалось линейное увеличение объема водопритока в шахты по мере расширения площади очистных работ. Водопроводящие трещины здесь, вероятно, пересекали приповерхностный водоносный комплекс, за счет которого и формировались водопритоки в шахты.

Величины водопритоков и водообильность отложений в рассматриваемых районах в целом были не высокими. Шахты им. Артема и «Шебунино» относились, в соответствии с классификацией М.В. Сыроватко [Шахтные воды угольной ...,

1989], к подгруппе практически необводненных (водоприток до 50 м<sup>3</sup>/ч). Шахты № 4, «Ильичевская», «Подгородненская» и «Хасанская» – к подгруппе слабо обводненных (водоприток до 100 м<sup>3</sup>/ч). Шахты «Глубокая», «Нагорная», «Мгачи», «Бошняково», «Макаровская» и «Горнозаводская» – к группе умеренно обводненных (водоприток до 300 м<sup>3</sup>/ч), а шахты «Авангард», «Углекаменская» и «Северная» – к обводненным, в которых среднегодовой водоприток составлял 398,5 м<sup>3</sup>/ч.

После остановки шахтных водоотливов началось затопление горных выработок и восстановление естественного уровня подземных вод. Изучение динамики затопления шахт позволило утверждать, что восстановление уровня во времени происходило по экспоненциальной зависимости, средняя скорость восстановления уровня колебалась от нескольких сантиметров до нескольких метров в месяц, на верхних горизонтах скорость затопления снижалась (рис. 1). Время затопления шахт варьировало от 2 до 7,3 года. Коэффициент заполнения водой объема сдренированного пространства колебался от 0,96 до 1,0 в зависимости от литологического состава вмещающих пород, углов падения, количества и мощности (влияющей на высоту зоны обрушения) разрабатываемых угольных пластов и глубины отработки.



**Рис. 1. Динамика затопления шахт**

Проведенные исследования показали, что при «мокрой» ликвидации угольных шахт режим затопления определяется особенностями современной гидрогеологической стратификации надугольной и угольной толщ, условиями отработки пластов, высотой водопроницающих трещин, величиной водопритока и объемом (емкостными характеристиками) сдренированного массива.

В настоящее время практически все шахты затоплены. В результате сформировались природно-техногенные гидрогеологические структуры, нижняя граница которых определяется подошвой отработанного угольного пласта, а верхняя – высотой зоны водопроницающих трещин над выработанным пространством. В недрах этих структур произошло существенное изменение условий циркуляции подземных вод, сформировался гидравлически связанный техногенный водоносный ком-

плекс со значительными отклонениями (от природного комплекса) в скоростном (фильтрационном) и напорном (уровневом) аспектах. Наблюдается подтопление территорий, на склонах и в поймах речных долин – разгрузка (излив) вод техногенного комплекса.

#### Глава 4. СОСТАВ И ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ПОДЗЕМНЫХ ВОД В РАЙОНАХ ЛИКВИДИРОВАННЫХ ШАХТ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ ПРИМОРЬЯ И САХАЛИНА

Изменение условий циркуляции подземных вод привело к трансформированию их химического состава. В главе рассмотрены геохимические особенности подземных вод районов угольных бассейнов и месторождений Приморья и Сахалина, преобразование их химического состава в условиях сформировавшихся природно-техногенных структур. Показано, что питание подземных водоносных горизонтов рассматриваемых районов осуществляется за счет поверхностных вод. Морские воды в питании водоносных горизонтов участие не принимают. Содержания стабильных изотопов изменяются в пределах, соответствующих диапазону вариаций изотопов метеорных вод ( $\delta^2D = -61,3 \dots -101,1$ ;  $\delta^{18}O = -8,7 \dots -13,7$ ).

Установлено, что в районах ликвидированных угольных шахт Липовецкого, Ильчевского (Раздольненский бассейн) и Хасанского месторождений, расположенных в пределах *Восточно-Маньчжурского бассейна*, поровые грунтовые воды четвертичных и неогеновых отложений, а также воды трещинного водоносного комплекса меловых отложений и трещинно-жильного водоносного комплекса зон тек-

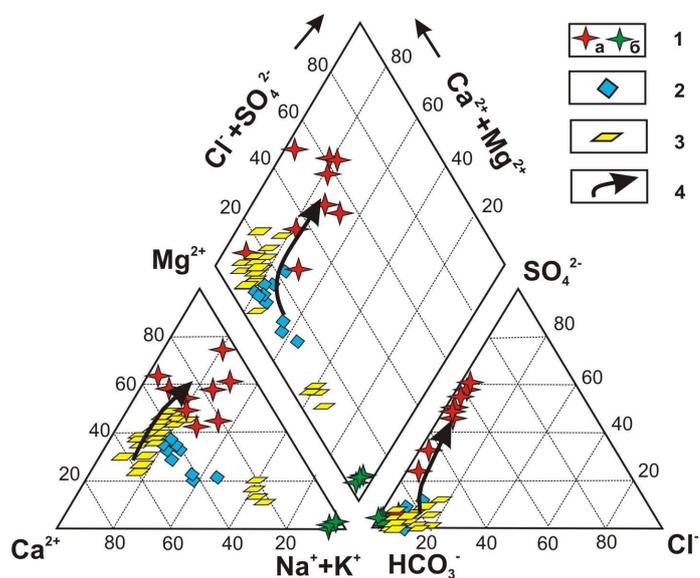
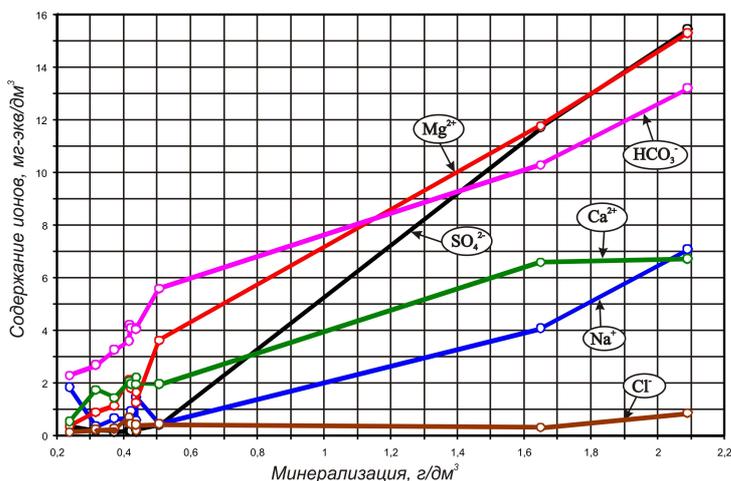


Рис. 2. Соотношение основных катионов и анионов в подземных водах районов шахт Восточно-Маньчжурского бассейна: 1 – техногенный комплекс шахт Раздольненского бассейна (а) и Хасанского месторождения (б); 2 – аллювиальный горизонт, 3 – трещинный и трещинно-жильный комплекс; 4 – тренд изменения состава вод

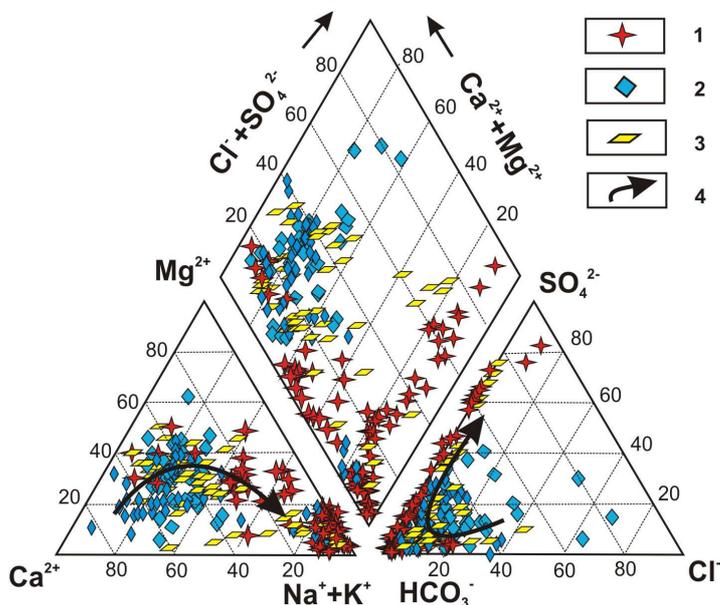
тонических нарушений и интрузивных контактов с меловыми отложениями являются весьма пресными (минерализация 0,3–0,4 г/дм<sup>3</sup>), мягкими, по водородному показателю нейтральными, гидрокарбонатными. Катионный тип воды варьируется от магниевонариево-кальциевого к кальциево-магниевому (рис. 2). Тренд изменения состава подземных вод в природно-техногенных структурах связан с ростом их минерализации. В условиях природно-техногенных структур шахт «Ильчевская» и № 4 Раздольненского бассейна повышение минерализации вод происхо-



**Рис. 3. Вклад основных компонентов в минерализацию подземных вод районов шахт Раздольненского бассейна**

формируются гидрокарбонатные натриевые воды (см. рис. 2).

В пределах *Центрального Сихотэ-Алинского бассейна трещинных вод* расположены Партизанский бассейн и Подгородненское месторождение нижнемелового возраста. Природные подземные воды здесь являются гидрокарбонатными, смешанными по катионам. При их циркуляции в природно-техногенных структурах шахт «Глубокая», «Нагорная», «Авангард», «Углекаменская», «Северная» и «Подгородненская» происходит рост минерализации подземных вод, главным образом за счет повышения концентраций ионов натрия, гидрокарбонатов и сульфатов. Воды приобретают сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-



**Рис. 4. Соотношение основных катионов и анионов в подземных водах районов шахт Центрального Сихотэ-Алинского бассейна: 1 – техногенный комплекс шахт Партизанского бассейна и Подгородненского месторождения; 2 – аллювиальный горизонт, 3 – трещинный и трещинно-жильный комплексы; 4 – тренд изменения состава вод**

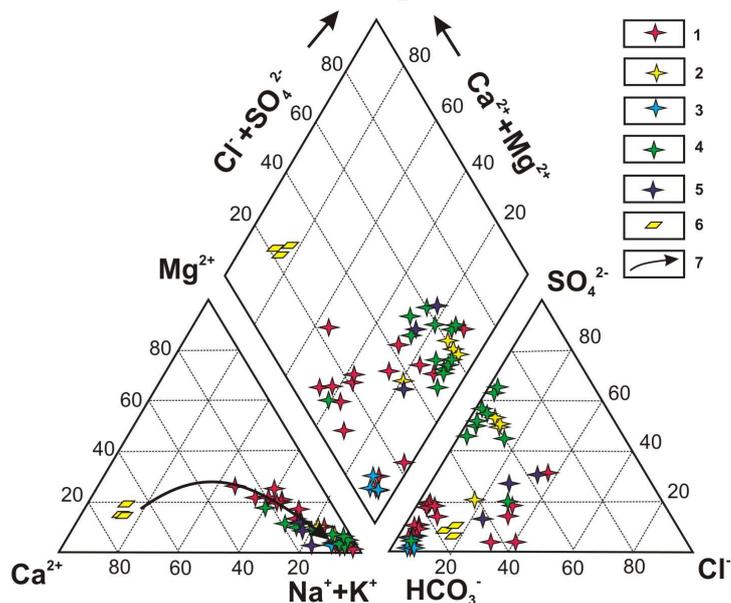
дит за счет накопления ионов магния, гидрокарбонатов и сульфатов (рис. 3), что приводит к формированию соленоватых сульфатно-гидрокарбонатных, гидрокарбонатно-сульфатных и сульфатных магниевых вод. В водах природно-техногенной структуры шахты «Хасанская» одноименного месторождения

рост минерализации обуславливается концентрированием ионов натрия и гидрокарбонатов. Формируются гидрокарбонатные натриевые воды (см. рис. 2). В пределах *Центрального Сихотэ-Алинского бассейна трещинных вод* расположены Партизанский бассейн и Подгородненское месторождение нижнемелового возраста. Природные подземные воды здесь являются гидрокарбонатными, смешанными по катионам. При их циркуляции в природно-техногенных структурах шахт «Глубокая», «Нагорная», «Авангард», «Углекаменская», «Северная» и «Подгородненская» происходит рост минерализации подземных вод, главным образом за счет повышения концентраций ионов натрия, гидрокарбонатов и сульфатов. Воды приобретают сульфатно-гидрокарбонатный, гидрокарбонатно-

сульфатный, сульфатный натриевый состав (рис. 4). В пределах *Приханкайского артезианского бассейна* в районе Шкотовского бурогольного месторождения Угловского бассейна природные воды верхнечетвертичных аллювиальных отложений, плиоценовых базальтов и палеоген-неогеновых отложений имеют близкий химический состав и являются весьма пресными (0,26–0,42 г/дм<sup>3</sup>), очень мягкими или умеренно жесткими (0,55–3,3 мг-экв/дм<sup>3</sup>). По анионному составу они преимущественно гидрокарбонатные, по катионному – магниевые

кальциевые и кальциево-магниевые. По мере увеличения минерализации вод, циркулирующих в природно-техногенных структурах шахты им. Артема, наблюдается увеличение в них концентраций  $\text{Na}^+$  и  $\text{HCO}_3^-$ . Формируются гидрокарбонатные натриевые весьма слабосоленоватые (минерализация  $1,0\text{--}1,3 \text{ г/дм}^3$ ), мягкие и умеренно жесткие ( $2,03\text{--}4,15 \text{ мг-экв/дм}^3$ ) воды.

В результате проведенных исследований установлено, что природные подземные воды в районах угольных месторождений Сахалинского бассейна (*Татарский артезианский и Паранайский артезианский бассейны*) имеют главным образом гидрокарбонатный кальциевый состав. В природно-техногенных структурах шахт Мгачинского, Бошняковского, Макаровского и Горнозаводского месторождений в подземных водах происходит накопление ионов натрия, гидрокарбонатов и



**Рис. 5. Соотношение основных катионов и анионов в подземных водах техногенного комплекса шахт Сахалина (1–5): 1 – «Бошняково», 2 – «Горнозаводская», 3 – «Макаровская», 4 – «Мгачи», 5 – «Шебунино»; 6 – природный комплекс; 7 – тренд изменения состава вод**

сульфатов. Установлено, что для вод Сахалинского бассейна характерны повышенные концентрации хлора относительно вод бассейнов Приморского края. Это обуславливает формирование, наряду с гидрокарбонатными и сульфатными натриевыми водами, вод смешанного анионного состава (рис. 5).

В результате проведенных исследований установлено, что в рассматриваемых районах Приморья и Сахалина природные воды являются гидрокарбонатными смешанными по катионам. В природно-техногенных структурах районов ликвидированных

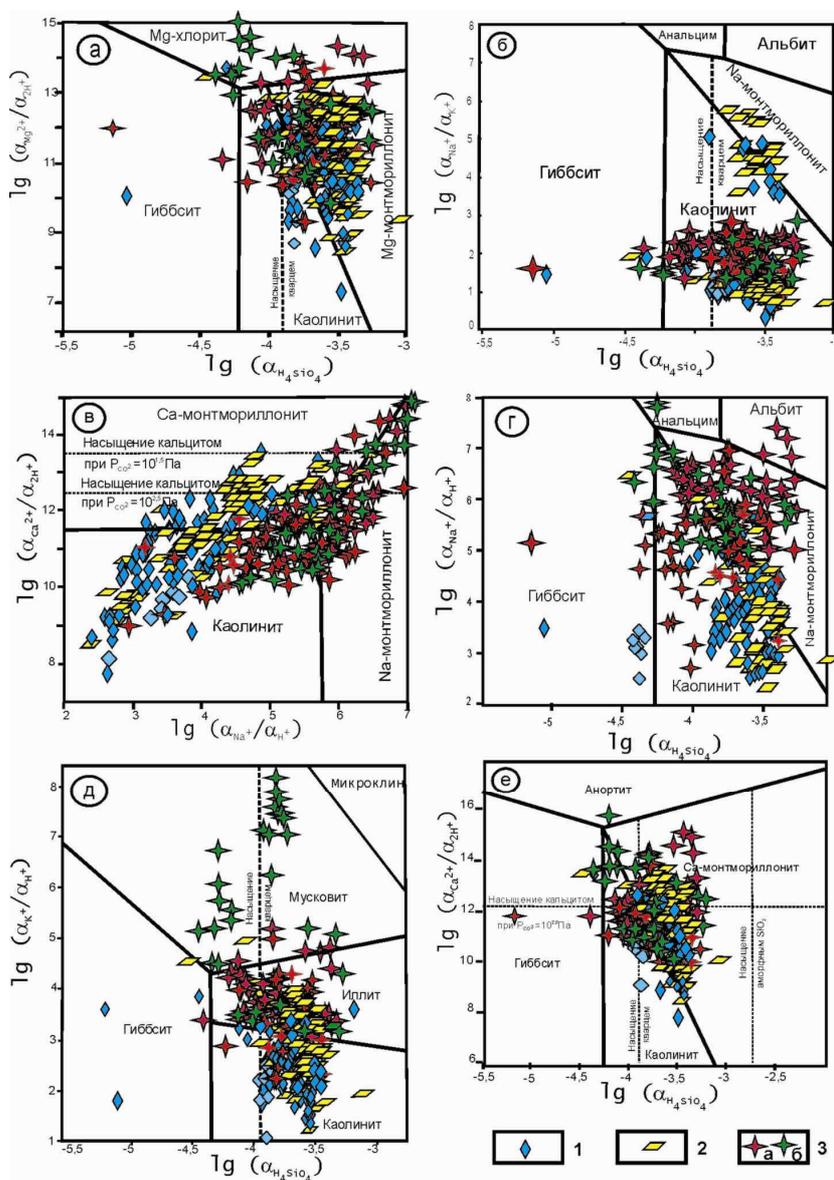
угольных шахт Раздольненского бассейна при повышении минерализации вод наблюдается преимущественно накопление ионов  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ , а в водах природно-техногенных структур Партизанского, Угловского и Сахалинского бассейнов, Хасанского и Подгородненского месторождений рост минерализации происходит главным образом за счет повышения концентраций  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{HCO}_3^-$ . Ионнообменная трансформация ограничена диапазоном pH значений от 5,8 до 9,4.

Содержания химических элементов в водах контролируют вторичные минералы. Выполненные для средних обобщенных составов вод природных и техногенных комплексов Приморья и Сахалина физико-химические расчеты электролитической диссоциации (комплексобразования) позволяют утверждать, что миграция компонентов в природных водах осуществляется преимущественно в виде неза-

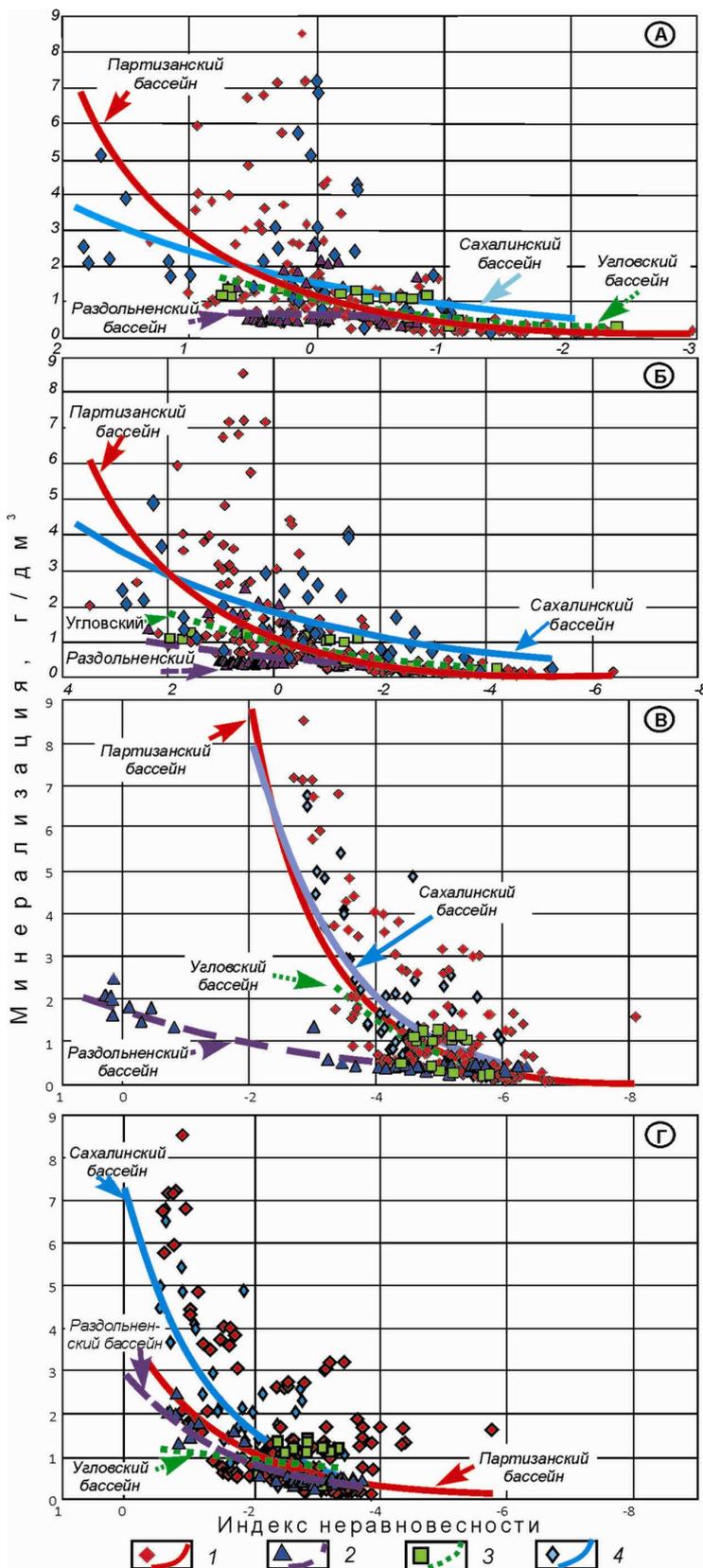
комплексированных ионов. С ростом минерализации доля комплексных соединений миграционных форм растет. Тенденция возрастания концентраций комплексных соединений приводит к формированию аутигенных минеральных фаз.

Все рассматриваемые воды неравновесны с первичными алюмосиликатами, но равновесны с вторичными минералами (рис. 6). Сам по себе факт неравновесности

воды с эндогенными алюмосиликатами в условиях зоны гипергенеза уже, конечно, не является уникальным и хорошо согласуется с существующими представлениями [Шварцев, 1978, 1991, 1998, 2008; Драйвер, 1985; Геохимия подземных вод ..., 2004; Геологическая эволюция ..., 2005, 2007; и др.], тем не менее на диаграммах (см. рис. 6) наблюдается четкая смена состава подземных вод при их циркуляции в природно-техногенных структурах и изменение состава вторичной минеральной фазы. Такие элементы как  $Fe_{общ}$ ,  $Al$ ,  $Si^{+2}$  мало подвижны в слабощелочном растворе, поэтому резкого их накопления не наблюдается, однако именно эти компоненты дают начало новым минеральным фазам. Практически все рассматриваемые воды равновесны с каолинитом. Дальнейшее взаимодействие воды с породой приводит к росту содержаний подвижных катионов. При



**Рис. 6. Диаграммы равновесия основных минералов с нанесением данных по составу подземных вод районов ликвидированных шахт: 1 – аллювиальный горизонт; 2 – трещинный и трещинно-жильный комплексы; 3 – техногенный водоносный комплекс Приморья (а) и Сахалина (б): а – система  $H_2O-MgO-CO_2-SiO_2-Al_2O_3$ ; б – система  $H_2O-Al_2O_3-Na_2O-CO_2-SiO_2$ ; в – система  $H_2O-Al_2O_3-CaO_2-Na_2O-CO_2-SiO_2$ ; г – система  $H_2O-Na_2O-CO_2-SiO_2-Al_2O_3$ ; д – система  $H_2O-K_2O-CO_2-SiO_2-Al_2O_3$ ; е – система  $H_2O-CaO-CO_2-SiO_2-Al_2O_3$**



**Рис. 7.** Зависимость значений индексов неравновесности кальцита (А) и доломита (Б), эпсомита (В) и гипса (Г) от минерализации подземных вод районов ликвидированных шахт угольных бассейнов Приморья и Сахалина: 1 – Партизанский; 2 – Раздольненский; 3 – Угловский; 4 – Сахалинский

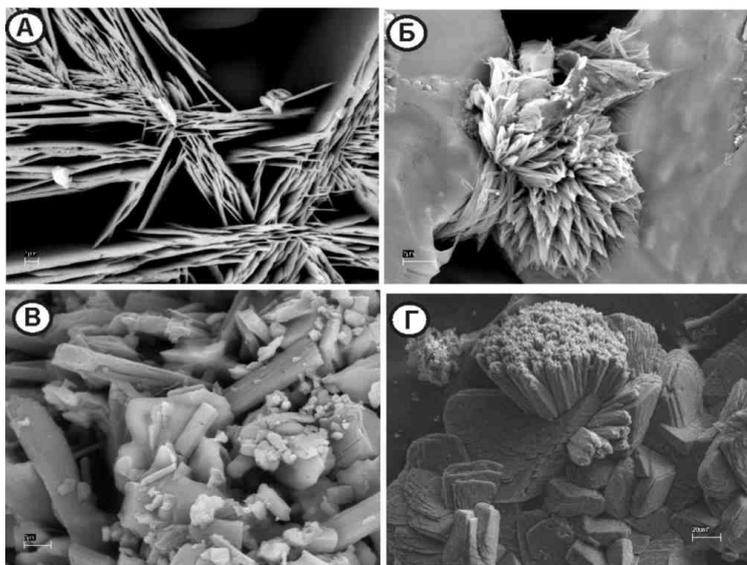
увеличении в растворе концентраций магния, кальция и натрия образуются монтмориллониты и хлорит (рис. 6 а-г, е). При накоплении ионов  $K^+$ , связанных с анионитами слабых кислот ( $HCO_3^-$ ), формируются иллит и мусковит (рис. 6 е). При минерализации воды  $> 4$  г/дм<sup>3</sup> достигается равновесие с анальцимом (рис. 6 г), который является характерным минералом щелочных натриевых вод, и его наличие, по утверждению Р.М. Гаррелса и Ч.Л. Крайста [1968], свидетельствует о формировании аморфного кремнезема.

Кроме силикатов рассматриваемые воды равновесны с рядом карбонатов, сульфатов, оксидов и гидроксидов. Подземные воды, имеющие минерализацию  $> 0,6$  г/дм<sup>3</sup>, насыщены карбонатами кальция и магния (рис. 7 А, Б), что хорошо согласуется с положениями С.Л. Шварцева [1998] и др., касающимися поведения основных катионов в подземных водах различных ландшафтных зон.

В Раздольненском бассейне при минерализации вод  $> 1,5$  г/дм<sup>3</sup> возможно равновесие с сульфатом магния – эпсомитом (рис. 7 В). Это свидетельствует о том, что после осаждения карбонатов концентрация магния в растворе превосходит

количество карбонатной щелочности, что способствует осаждению магния в сульфатной форме. Иная ситуация характерна для вод Партизанского, Угловского и Сахалинского бассейнов, где после осаждения  $\text{CaCO}_3$  концентрации кальция и карбонатной щелочности становятся меньше, а содержание  $\text{SO}_4^{2-}$  увеличивается недостаточно быстро. Осаждения в данных условиях сульфатов магния и кальция (рис. 7 В, Г), а также сульфатов и карбонатов натрия не происходит, что способствует накоплению  $\text{Na}^+$  и  $\text{SO}_4^{2-}$  в растворе.

В местах изливов вод техногенного комплекса в условиях земной поверхности наступает равновесие рассматриваемых вод с рядом натриевых, кальциевых и магниевых минералов (рис. 8).



**Рис. 8. Морфология тенардита (А), термо-натрита (Б), несквегонита (В), сноповидных кристаллов арагонита на доломите (Г)**

разработке технологии очистки подземных вод и мероприятий по минимизации воздействия ликвидированных шахт на окружающую природную среду.

Изучение изменений средних значений компонентов, их неоднородностей и связей позволило выделить геохимические типы вод и наметить общую последовательность (зональность) формирования составов подземных вод в районах ликвидированных шахт Приморья и Сахалина. Установлено, что подземные воды рассматриваемых категорий гидрогеологических структур (артезианские бассейны, адартезианские бассейны и бассейны трещинных вод), отражающих в себе разные этапы развития осадочных бассейнов, геодинамических обстановок тектономагматической активности и различающихся типами скоплений подземных вод, не имеют четких отличий ни в составе выделенных типов подземных вод, ни в строении гидрогеохимической зональности, ни в направленности гидрохимических процессов. Это связано, по всей видимости, с тем, что названные гидрогеологические структуры сложены в целом однотипными рядами геологических формаций.

С целью определения условий и процессов преобразования минерального вещества в природно-техногенных структурах, выявления потенциальных ассоциа-

магниевых минералов (рис. 8). Происходит осаждение термонатрита ( $\text{Na}_2\text{CO}_3 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ), тенардита ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), несквегонита ( $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) и др.

Помимо основных компонентов ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Si}^{2+}$ ,  $\text{Fe}_{\text{общ.}}$ ,  $\text{Al}$ ) на земной поверхности из раствора выводятся такие элементы, как:  $\text{Be}$ ,  $\text{Sc}$ ,  $\text{Mn}$ ,  $\text{Pb}$ ,  $\text{Sn}$ ,  $\text{Ga}$ ,  $\text{V}$ ,  $\text{Ti}$ ,  $\text{Cu}$ ,  $\text{Zn}$ ,  $\text{Co}$ ,  $\text{Ni}$ ,  $\text{Zr}$ ,  $\text{Sr}$ ,  $\text{Cr}$ ,  $\text{Ba}$  и др.

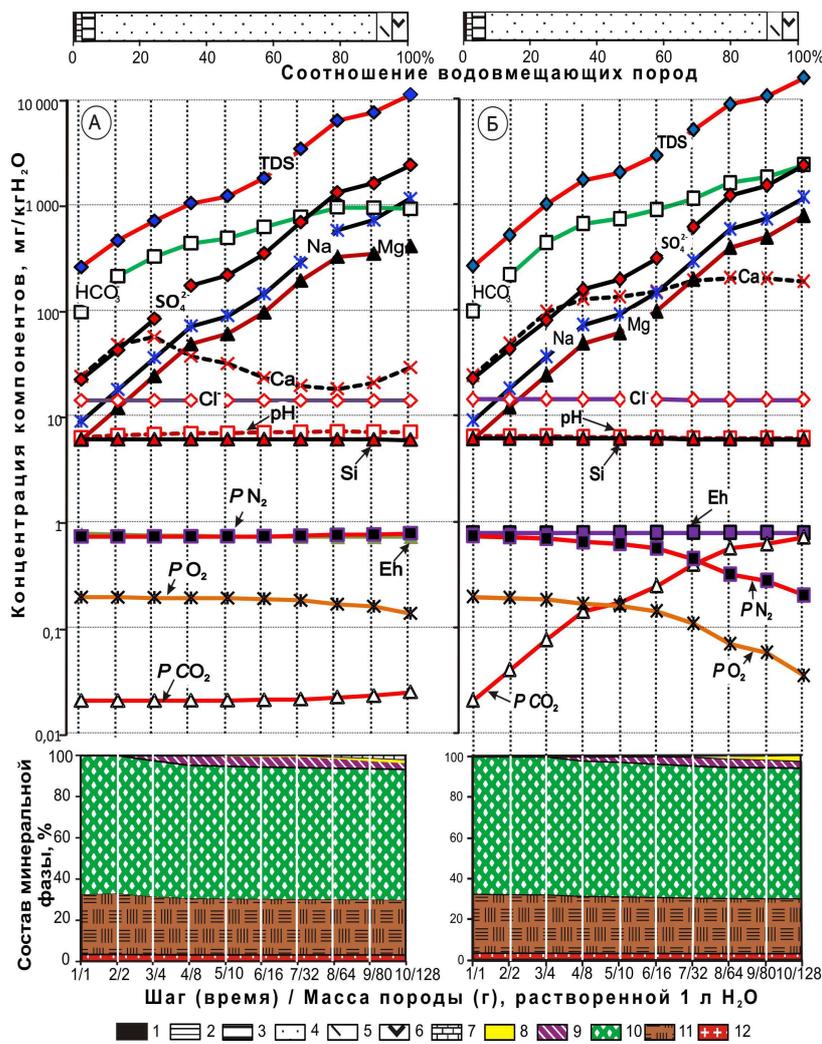
Степень насыщения вод относительно вторичных минералов следует учитывать при

ций, стабильных в условиях той или иной гидрогеохимической среды, выполнено физико-химическое моделирование системы «вода–порода», основанное на минимизации изобарно-изотермического потенциала (программный комплекс «Селектор-Windows» [Чудненко, Карпов, 2003]). Методика моделирования заключалась в выполнении серии расчетов равновесного состояния системы «вода–порода». Вводился природный химический состав водовмещающих пород в определенных пропорциях. Моделирование имитировало инконгруэнтное растворение минералов горных пород в условиях: 1) закрытой по  $\text{CO}_2$  и атмосферному газу системы ( $\text{CO}_2$  – 0,01 кг/1 кг  $\text{H}_2\text{O}$ , атмосферный газ – 0,3 кг/1 кг  $\text{H}_2\text{O}$ ); 2) открытой по  $\text{CO}_2$  системы ( $\text{CO}_2$  увеличивалось от 0,01 до 1,28 кг/1 кг  $\text{H}_2\text{O}$ ).

Для алюмосиликатных пород, по утверждению Б.Н. Рыженко и С.Р. Крайнова [2001, 2002], величина соотношения масс породы (Т) и воды (Ж) имеет смысл времени взаимодействия (условно, времени водообмена) породы и водного раствора. Исходя из этого при моделировании систем выбраны следующие соотношения масс Т/Ж: 0,001 (шаг 1); 0,002 (шаг 2); 0,004 (шаг 3); 0,008 (шаг 4); 0,010 (шаг 5); 0,016 (шаг 6); 0,032 (шаг 7); 0,064 (шаг 8); 0,080 (шаг 9); 0,128 (шаг 10). Изначально (шаг 1 вычислительных экспериментов) парциальное давление углекислоты принималось равным  $10^{-2,0}$  бар, что в среднем соответствует подземным водам зоны региональной трещиноватости. Адекватность моделей реальным природным объектам оценивалась по соответствию расчетных соотношений содержаний химических элементов в водах, рН среды и минералогического состава новообразующихся твердых фаз природным параметрам.

В результате моделирования условий формирования состава подземных вод районов ликвидированных шахт Приморья и Сахалина установлено, что при отношении масс Т/Ж  $\leq 0,004$  формируются маломинерализованные  $\text{HCO}_3\text{--Ca}$  воды (рис. 9). Увеличение реагирующей массы породы приводит к росту минерализации вод и последовательному продуцированию растворов, соответствующих  $\text{HCO}_3\text{--Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{--Na(Mg)} \rightarrow \text{HCO}_3\text{--SO}_4\text{--Na(Mg)} \rightarrow \text{SO}_4\text{--Na(Mg)}$  ряду изменения состава. Накопление Na или Mg в ряду определяется типом пород надугольной толщи и вносит определенную специфику в состав равновесного водного раствора. Доказано, что повышенные концентрации магния в подземных водах Раздольненского бассейна обуславливаются наличием в стратиграфическом разрезе большой доли (40 %) туфогенных образований основного состава.

Закрытость системы по  $\text{CO}_2$  ( $P_{\text{CO}_2} = 10^{-2,0}$  бар) всегда означает предохранение водной фазы от увеличения в ней концентрации  $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$  и приводит к росту (при наличии источника) содержаний  $\text{SO}_4^{2-}$  (см. рис. 9 А). Появление сульфатных ионов в подземных водах рассматриваемых бассейнов обусловлено наличием сульфидов (пирита) в надугольных и угольных толщах. Оно контролируется парциальным давлением  $\text{CO}_2$  и равновесной концентрацией  $\text{O}_2$ .



**Рис. 9.** Результаты моделирования эволюции системы «вода–порода», закрытой по CO<sub>2</sub> и атмосферному газу (CO<sub>2</sub> = 0,01 кг/1кгH<sub>2</sub>O; атмосферный газ = 0,3 кг/1кгH<sub>2</sub>O) (А) и открытой по CO<sub>2</sub> (CO<sub>2</sub> = 0,01–1,28 кг/1кгH<sub>2</sub>O) (Б): 1–6 – водовмещающие породы: 1 – уголь; 2 – аргиллит; 3 – алевролит; 4 – песчаник; 5 – риолит; 6 – дациандезит; 7–12 – формирующиеся минеральные фазы: 7 – доломит; 8 – родохрозит; 9 – кальцит; 10 – кварц; 11 – монтмориллонит; 12 – гетит

факторами, определяющими формирование состава водных растворов, циркулирующих в природно-техногенных структурах, являются соотношение реагирующих масс породы и воды и парциальное давление CO<sub>2</sub> и O<sub>2</sub> в системе «вода–порода». Равновесно-неравновесное состояние системы «вода–порода» и содержание химических элементов в водах рассматриваемых природно-техногенных структур контролируются степенью насыщенности вод карбонатами кальция, активностью кремния и целой серией процессов образования вторичных минералов.

Увеличение равновесного парциального давления CO<sub>2</sub> (> 10<sup>-1,0</sup> бар) и уменьшение равновесной концентрации O<sub>2</sub> расширяет область существования в бассейнах HCO<sub>3</sub>–Na типа вод (см. рис. 9 Б), но на последовательность вторичного минералообразования в целом не влияет, а лишь сдвигает начало образования тех или иных твердых фаз к более поздним этапам (см. рис. 9).

Таким образом, установлено, что геохимическая специфика подземных вод техногенного комплекса природно-техногенных структур Приморья и Сахалина закладывается в области питания и трансформируется в направлении фильтрационного потока по схеме: HCO<sub>3</sub>–Ca → HCO<sub>3</sub>–Na(Mg) → HCO<sub>3</sub>–SO<sub>4</sub>–Na(Mg) → SO<sub>4</sub>–Na(Mg). Основными физико-химическими фак-

## Глава 5. РЕГИОНАЛЬНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ СОСТАВА ПОДЗЕМНЫХ ВОД В ПРИРОДНО-ТЕХНОГЕННЫХ СТРУКТУРАХ УГОЛЬНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Анализ гидрохимических данных позволил выявить региональные особенности распространения ионов и комплексных соединений в подземных водах природно-техногенных структур таких крупных угольных бассейнов России и Украины, как Донецкий, Кизеловский, Кузнецкий, Печорский и Челябинский. Установлено, что в районе *Донецкого бассейна* основными ионами, определяющими минерализацию и состав подземных вод, являются  $\text{Na}^+$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Cl}^-$ . Ионы  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  хотя и играют определенную роль в формировании состава раствора и минеральной составляющей, но в этом бассейне они все-таки занимают второстепенные

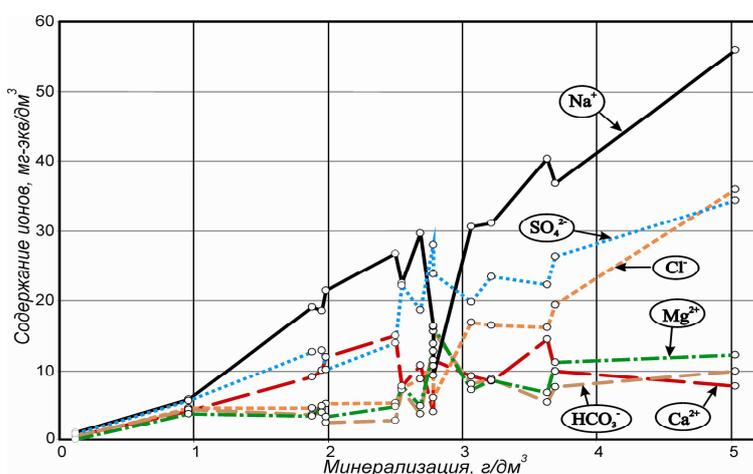


Рис. 10. Вклад основных компонентов в минерализацию подземных вод районов ликвидированных шахт Донецкого бассейна

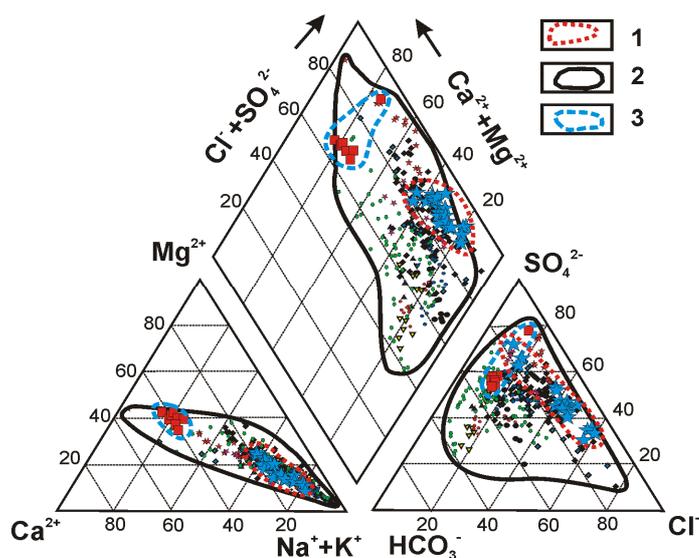


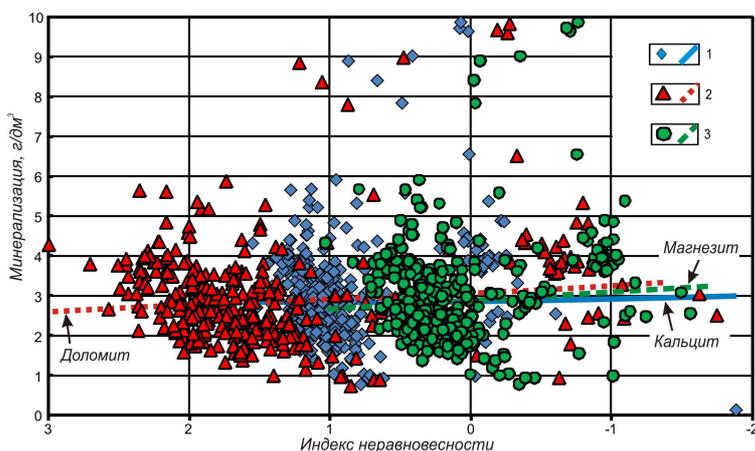
Рис. 11. Соотношение основных катионов и анионов в подземных водах техногенного комплекса ликвидированных шахт Донбасса: 1 – Ростовская область, 2 – Донецкая, 3 – Луганская область

позиции (рис. 10). Циркуляция подземных вод

$$(M_{0,54} \frac{SO_4^{40} Cl^{31} HCO_3^{29}}{Mg^{39} (Na + K)^{36} Ca^{25}})$$

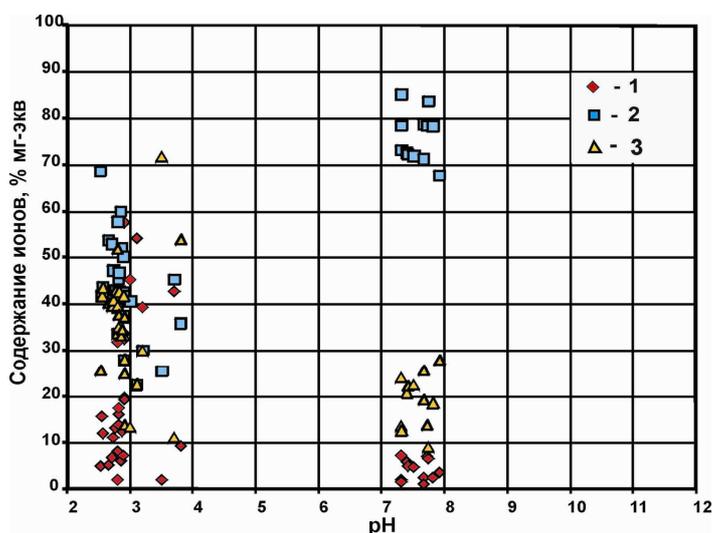
в условиях природно-техногенных структур бассейна приводит к увеличению их минерализации ( $0,9-9,9 \text{ г/дм}^3$ ) и формированию вод сульфатного, хлоридного и смешанного как анионного, так и катионного состава (рис. 11).

рН диапазон ионообменной трансформации при этом варьируется в пределах от 6,5 до 8,9. Макрокомпоненты в подземных водах природного комплекса мигрируют преимущественно в виде собственных незакомплексованных ионов, доля которых для натрия составляет 99,8 %, а для кальция – 94,46 %. В водах циркулирующих в нарушенных горных массивах наблюдается рост доли комплексных соединений. Особенно хорошо это проявлено на примере кальция, который представлен, наряду с ионом  $\text{Ca}^{+2}$  (71,31 %), такими комплексными соеди-



**Рис. 12. Зависимость значений индексов неравновесности кальцита (1), доломита (2) и магнезита (3) от минерализации подземных вод Донецкого бассейна**

В Кизеловском бассейне пресные (0,03–0,58 г/дм<sup>3</sup>), нейтральные (рН = 7,2–7,9), преимущественно сульфатно-гидрокарбонатные магниево-кальциевые воды



**Рис. 13. Изменения концентраций Na<sup>+</sup>+K<sup>+</sup> (1), Ca<sup>2+</sup> (2) и Mg<sup>2+</sup> (3) в водах Кизеловского бассейна в зависимости от рН**

природных комплексов при циркуляции в нарушенных горными работами структурах становятся кислыми (рН = 2,5–3,8) (рис. 13) и сильносоленоватыми (до 24,06 г/дм<sup>3</sup>), сульфатными железистыми, но встречаются и вариации сульфатных кальциево-железистых или натриево-железистых вод.

Результаты расчета форм миграции химических элементов указывают на то, что компоненты в водах техногенного комплекса находятся в виде незакомплексованных ионов и преимущественно сульфатных соединений (FeSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>, NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, MgSO<sub>4</sub> и др.). В водах техногенного комплекса наблюдается накопление ионов железа, а большое количество кремния, присутствующего в виде H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> и H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>, способствует установлению равновесия с каолинитом и другими кремнийсодержащими минералами. Кислая геохимическая среда благоприятна для перевода в воды и накопления в них элементов, концентрирующихся в водовмещающих породах: Be (до 0,12 мг/дм<sup>3</sup>), Co (3,74 мг/дм<sup>3</sup>), Li (1,15 мг/дм<sup>3</sup>), Ni (3,9 мг/дм<sup>3</sup>), Mn (66,57 мг/дм<sup>3</sup>), Pb (до 0,15 мг/дм<sup>3</sup>), Zn (1,58 мг/дм<sup>3</sup>), В (до 2,26 мг/дм<sup>3</sup>), Si (50,35 мг/дм<sup>3</sup>) [Экологический мониторинг ..., 2010].

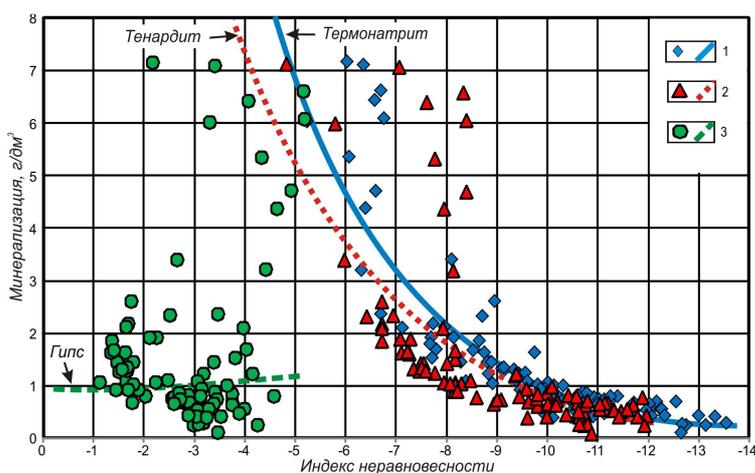
нениями как CaSO<sub>4</sub> (24,15 %), CaHCO<sub>3</sub><sup>+</sup> (3,53 %) и CaCO<sub>3</sub> (1,01 %). На долю комплексных соединений натрия приходится всего 2,49 %. Все рассматриваемые воды техногенного комплекса Донецкого бассейна насыщены карбонатами кальция и магния (рис. 12). С ростом минерализации воды, стремятся к равновесию сульфатные минералы (гипс, ангидрит, гидроарозит).

природных комплексов при циркуляции в нарушенных горными работами структурах становятся кислыми (рН = 2,5–3,8) (рис. 13) и сильносоленоватыми (до 24,06 г/дм<sup>3</sup>), сульфатными железистыми, но встречаются и вариации сульфатных кальциево-железистых или натриево-железистых вод.

Результаты расчета форм миграции химических элементов указывают на то, что компоненты в водах техногенного комплекса находятся в виде незакомплексованных ионов и преимущественно сульфатных соединений (FeSO<sub>4</sub>, CaSO<sub>4</sub>, NaSO<sub>4</sub><sup>-</sup>, MgSO<sub>4</sub> и др.). В водах техногенного комплекса наблюдается накопление ионов железа, а большое количество кремния, присутствующего в виде H<sub>4</sub>SiO<sub>4</sub> и H<sub>3</sub>SiO<sub>4</sub><sup>-</sup>, способствует установлению равновесия с каолинитом и другими кремнийсодержащими минералами. Кислая геохимическая среда благоприятна для перевода в воды и накопления в них элементов, концентрирующихся в водовмещающих породах: Be (до 0,12 мг/дм<sup>3</sup>), Co (3,74 мг/дм<sup>3</sup>), Li (1,15 мг/дм<sup>3</sup>), Ni (3,9 мг/дм<sup>3</sup>), Mn (66,57 мг/дм<sup>3</sup>), Pb (до 0,15 мг/дм<sup>3</sup>), Zn (1,58 мг/дм<sup>3</sup>), В (до 2,26 мг/дм<sup>3</sup>), Si (50,35 мг/дм<sup>3</sup>) [Экологический мониторинг ..., 2010].

Изучение геохимических особенностей подземных вод *Кузнецкого бассейна* свидетельствует о том, что природный водоносный комплекс представлен пресными (до 0,6 г/дм<sup>3</sup>), нейтральными, гидрокарбонатными водами смешанного катионного состава:  $M_{0,41} \frac{HCO_3^{93} Cl^4 SO_4^3}{Ca^{47} (Na + K)^{29} Mg^{24}}$ . С увеличением минерализации в условиях

сформировавшихся природно-техногенных структур подземные воды становятся слабосоленоватыми (0,78–2,6 г/дм<sup>3</sup>), преимущественно гидрокарбонатными или сульфатно-гидрокарбонатными натриевыми. рН варьируется в пределах от 6,0 до 10,4, наблюдается закономерное увеличение концентрации Na<sup>+</sup> с ростом щелочности раствора. Установлено, что по мере увеличения солености раствора степень



**Рис. 14.** Зависимость значений индексов неравновесности термонарита (1), тенардита (2) и гипса (3) от минерализации подземных вод в районах ликвидированных шахт Кузнецкого бассейна

его насыщения относительно карбонатных минералов возрастает, однако равновесия достигают лишь карбонаты кальция и магния. Минералы натрия не достигают равновесия ни в карбонатной, ни в сульфатной форме (рис. 14). Гипс также неравновесен с рассматриваемыми водами, наблюдается обратная зависимость индекса неравновесности гипса от минерализации вод, свойственная содовым водами.

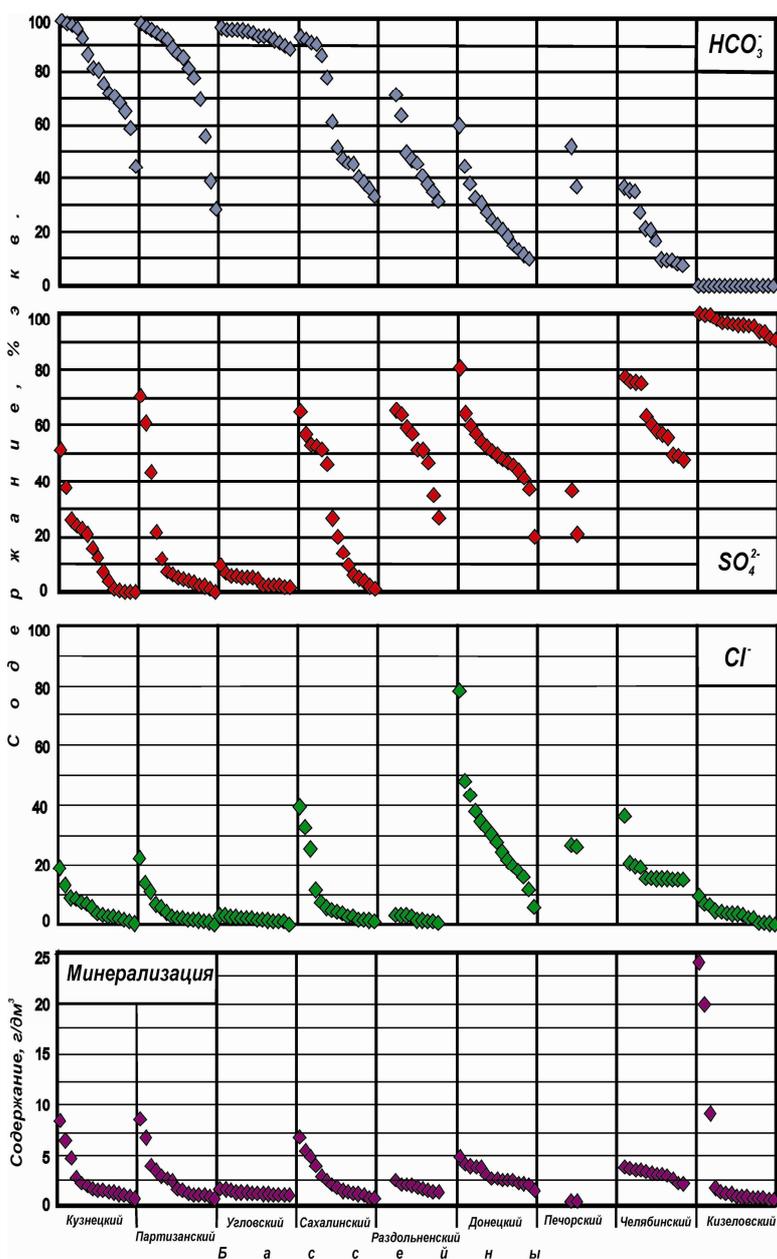
В результате интерпретации данных гидрохимического мониторинга [Экологический мониторинг ..., 2010] в *Печорском бассейне* установлено формирование в природно-техногенных структурах нейтральных и слабощелочных (рН = 7,6–8,2), слабосоленоватых и умеренносоленоватых вод (минерализация 2,34–4,33 г/дм<sup>3</sup>) хлоридно-гидрокарбонатно-сульфатного или хлоридно-сульфатно-гидрокарбонатного натриевого состава.

В *Челябинском бассейне*, по данным гидрохимического мониторинга (РП «Предотвращение подтопления ...», 2006 г.), формируются воды с преобладанием в сосаве ионов хлора, сульфатов, магния, натрия и калия ( $M_{0,68} \frac{Cl^{46} SO_4^{39} HCO_3^{15}}{(Na + K)^{50} Mg^{30} Ca^{14}}$ ).

При их циркуляции в условиях природно-техногенных структур формируются воды преимущественно сульфатного анионного и смешанного катионного состава

( $M_{3,12} \frac{SO_4^{63} HCO_3^{19} Cl^{18}}{(Na + K)^{44} Mg^{35} Ca^{21}}$ ). Диапазон рН ограничен значениями 7,0–8,6.

Таким образом, показано, что воды, формирующиеся в рассматриваемых угольных бассейнах, характеризуются специфическими особенностями и параметрами химического состава. Сопоставление соотношений основных ионов и катионов подземных вод свидетельствует о наличии региональных закономерностей в распределении основных макрокомпонентов (рис. 15). Наиболее четко закономерность изменения макросостава прослеживается по распределению гидрокарбонатных и сульфатных ионов. Подземным водам бассейнов, расположенных на западе России и в Украине (Челябинский, Кизеловский, Донецкий), свойственны повышенные концентрации сульфат-иона (до 100 % экв) и хлора (до 80 % экв). Содержания же гидрокарбонатных ионов здесь снижаются до 7 % экв, а в Кизеловском бассейне до 0 % экв. Бассейны, расположенные восточнее (Кузнецкий, Раздольненский, Партизанский, Угловский и Сахалинский), характеризуются повышенными концентрациями гидрокарбонатов (от 30 до 100 % экв) и колебаниями содержаний сульфат-иона до 70 % экв (см. рис. 15).



**Рис. 15. График рассеивания основных анионов и минерализации в подземных водах техногенного комплекса угольных бассейнов**

сский, Партизанский, Угловский и Сахалинский), характеризуются повышенными концентрациями гидрокарбонатов (от 30 до 100 % экв) и колебаниями содержаний сульфат-иона до 70 % экв (см. рис. 15).

Региональные закономерности изменения составов вод, формирующихся в районах ликвидированных шахт, обладают генетическими особенностями, при изучении которых возможно понимание непрерывно изменяющейся и сохраняющейся при этом индивидуальности рассматриваемых гидрогеологических объектов. По характерным для того или иного ионного типа вод формам компонентов, можно судить о геохимической обстановке среды и, следовательно, о происходящих в ней процессах. Поэтому представлялось весьма целесообразным выполнить систематизацию составов под-

земных вод, формирующихся в районах ликвидированных угольных шахт. В качестве основы выбрана классификация О.А. Алекина [1953], с учетом дополнений Ю.П. Никольской [1961] и Е.В. Посохова [1969]. Используя расчет общепринятых соотношений, определена принадлежность формирующихся в рассматриваемых районах типов вод к тому или иному классу и группе. При обобщении материалов и графической интерпретации полученных результатов учитывались минерализация, характерные соли и соотношения компонентов в подземных водах, при этом внимание уделялось как абсолютным величинам происходящих изменений, так и их характеру и последовательности (рис. 16, табл. 1).

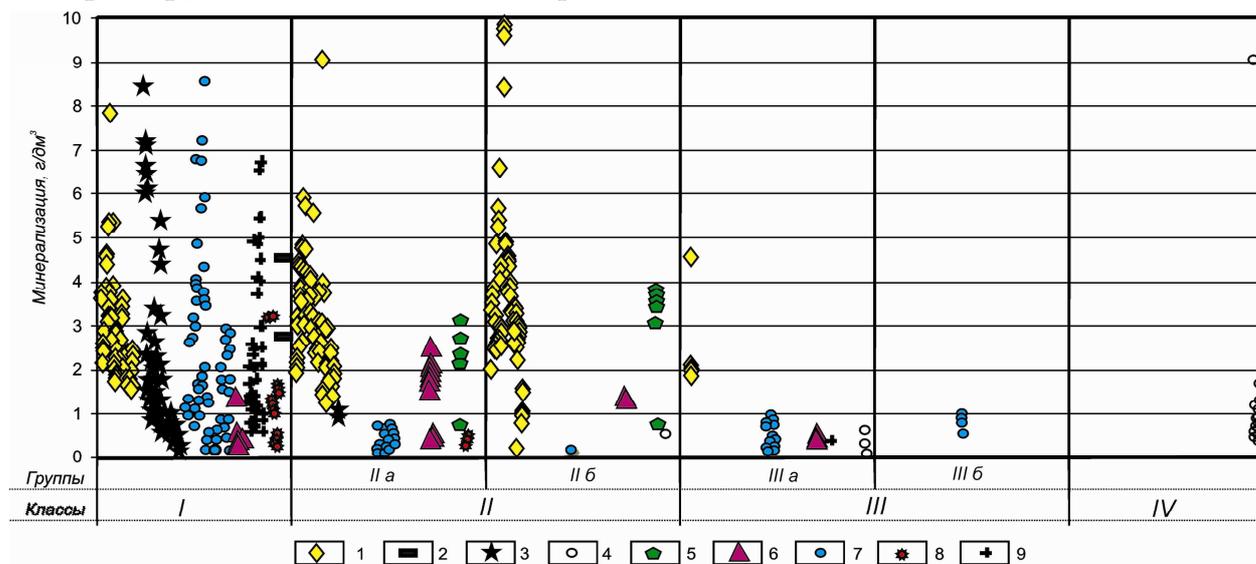


Рис. 16. Принадлежность выделенных типов подземных вод районов ликвидированных угольных шахт к классам (I–IV) и группам (II а, II б, III а, III б) по классификации О.А. Алекина [1953], с дополнениями Ю.П. Никольской [1961] и Е.В. Посохова [1969]. Фигуративные точки составов подземных вод угольных бассейнов (1–9): 1 – Донецкий, 2 – Печорский, 3 – Кузнецкий, 4 – Кизеловский, 5 – Челябинский, 6 – Раздольненский, 7 – Партизанский, 8 – Угловский, 9 – Сахалинский

Систематизация подземных вод районов ликвидированных шахт позволила отразить внешние особенности межрегионального распространения типов вод и внутренние особенности распространения ионов и комплексных соединений выделенных типов вод в фиксированных пространственных границах, т.е. в пределах отдельного угольного бассейна, а также поэтапно проследить ход химических и минеральных трансформаций вещества в условиях природно-техногенных гидрогеологических структур, установить направления изменений состава подземных вод с ростом их минерализации. Показано, что подземные воды *природного комплекса* рассматриваемых районов относятся как к I, так и ко II и III классам. Несмотря на то, что большинство природных вод относится к сульфатному и хлоридному классам, сульфатные и хлоридные ионы в типовых формулах отсутствуют. В водах преобладают гидрокарбонатные ионы, исключение составляет лишь Угловский бассейн, где зафиксировано формирование  $SO_4-Mg$  типа вод, и Челябинский бассейн, в котором формируются воды  $Cl-Na$  типа сульфатного класса.

**Таблица 1. Систематизация подземных вод районов ликвидированных угольных шахт**

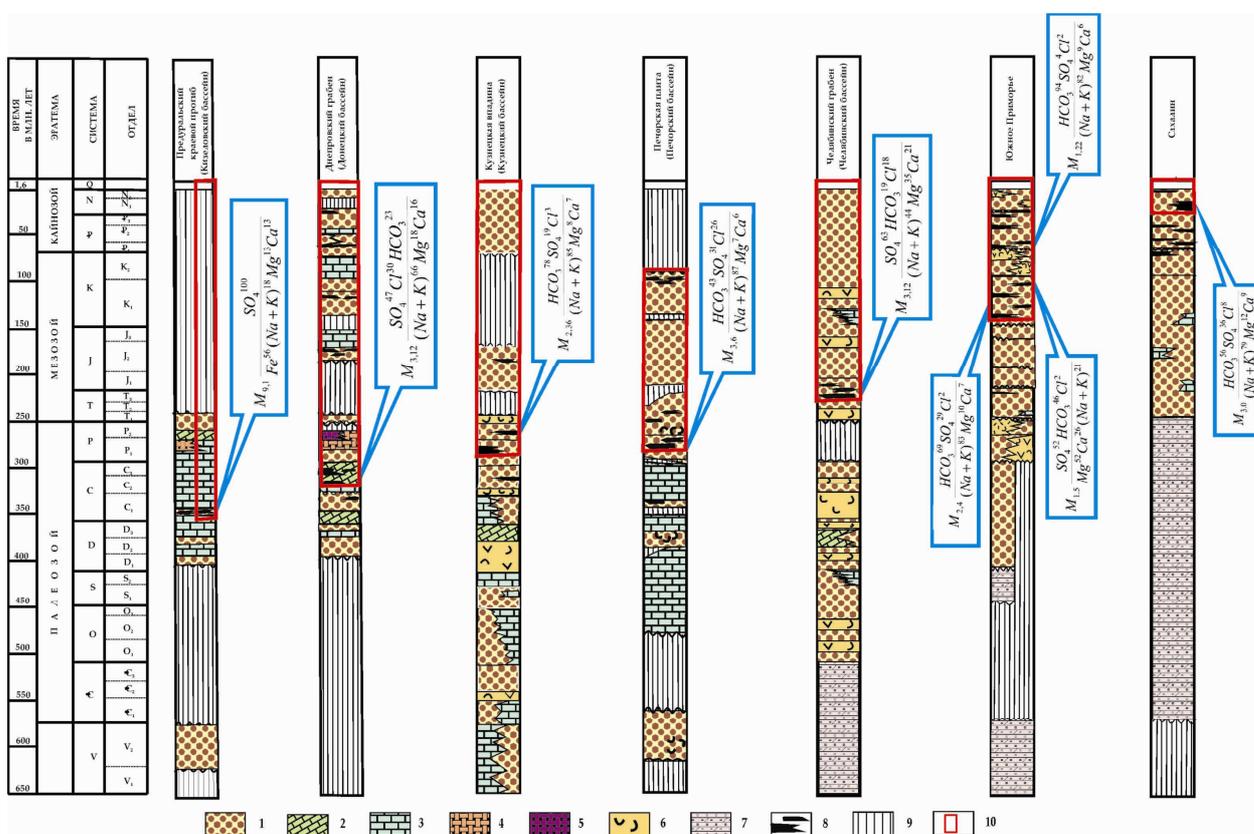
Бассейн	Воды природного комплекса ( $M < 0,6 \text{ г/дм}^3$ )			Воды техногенного комплекса ( $M > 0,6 \text{ г/дм}^3$ )				
	Класс	Группа	Тип	Класс	Группа	Тип	Минерализация, $\text{мг/дм}^3$	pH
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Донецкий</b>	II (сульфатный)	Пб (кальциевая)	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	I (гидрокарбонатный)	–	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	2361,07	8,40
						$\text{SO}_4\text{-Na}$	2651,40	8,26
						$\text{Cl-Na}$	4685,37	8,26
				II (сульфатный)	IIa (магниева)	$\text{SO}_4\text{-Na}$	2864,47	8,13
						$\text{Cl-Na}$	4335,44	7,85
					IIб (кальциевая)	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	764,00	8,10
						$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	924,00	7,80
						$\text{SO}_4\text{-Ca}$	2220,05	7,80
						$\text{SO}_4\text{-Mg}$	2819,60	7,80
						$\text{SO}_4\text{-Na}$	3306,82	7,78
				III (хлоридный)	IIIa (магниева)	$\text{Ca-SO}_4$	1980,67	7,57
						$\text{Cl-Na}$	4516,00	8,10
<b>Кизеловский</b>	II (сульфатный)	Пб (кальциевая)	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	IV (кислые)	–	$\text{SO}_4\text{-Na}$	805,90	2,90
	III (хлоридный)	IIIa (магниева)	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$			$\text{SO}_4\text{-Al}$	1845,05	2,77
						$\text{SO}_4\text{-Fe}$	4028,36	2,90
						$\text{SO}_4\text{-Mg}$	15655,96	3,50
<b>Кузнецкий</b>	I (гидрокарбонатный)	–	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	I (гидрокарбонатный)	–	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	668,00	7,30
			$\text{HCO}_3\text{-Mg}$			$\text{HCO}_3\text{-Na}$	2267,97	8,19
			$\text{HCO}_3\text{-Na}$			$\text{CO}_3\text{-Na}$	6013,90	10,38
						$\text{SO}_4\text{-Na}$	7151,00	8,77
			II (сульфатный)	IIa (магниева)	$\text{HCO}_3\text{-Mg}$	912,00	8,20	
		$\text{HCO}_3\text{-Ca}$	1052,00	8,10				
<b>Печорский</b>	Н.д.	Н.д.	Н.д.	I (гидрокарбонатный)	–	$\text{HCO}_3\text{-Na}$	3587,48	7,95

Окончание табл. 1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Челябинский</b>	II (сульфатный)	IIa (магниева)	Cl-Na	I (гидрокарбонатный)	–	SO <sub>4</sub> -Na	3134,86	7,09
			Cl-Na	II (сульфатный)	IIa (магниева)	SO <sub>4</sub> -Na	2539,83	7,39
		IIб (кальциевая)	Cl-Na		IIб (кальциевая)	SO <sub>4</sub> -Mg	3419,27	8,00
				SO <sub>4</sub> -Na		3592,16	7,56	
<b>Партизанский</b>	I (гидрокарбонатный)	–	HCO <sub>3</sub> -Ca	I (гидрокарбонатный)	–	HCO <sub>3</sub> -Mg	986,29	7,50
			HCO <sub>3</sub> -Mg					
			HCO <sub>3</sub> -Na					
	II (сульфатный)	IIa (магниева)	HCO <sub>3</sub> -Ca			HCO <sub>3</sub> -Ca	1069,21	6,77
			HCO <sub>3</sub> -Mg					
	III (хлоридный)	IIIa (магниева)	HCO <sub>3</sub> -Ca			HCO <sub>3</sub> -Na	2022,9	7,70
			HCO <sub>3</sub> -Mg					
		IIIб (кальциевая)	HCO <sub>3</sub> -Ca			SO <sub>4</sub> -Na	5905,30	7,39
<b>Раздольненский</b>	I (гидрокарбонатный)	–	HCO <sub>3</sub> -Ca	I (гидрокарбонатный)	–	HCO <sub>3</sub> -Mg	1351,48	8,11
			HCO <sub>3</sub> -Mg					
			HCO <sub>3</sub> -Na					
	II (сульфатный)	IIa (магниева)	HCO <sub>3</sub> -Ca	II (сульфатный)	IIa (магниева)	HCO <sub>3</sub> -Mg	1790,69	7,22
			HCO <sub>3</sub> -Mg			SO <sub>4</sub> -Mg	1945,77	6,77
III (хлоридный)	IIIa (магниева)	HCO <sub>3</sub> -Ca	IIб (кальциевая)	IIб (кальциевая)	HCO <sub>3</sub> -Ca	1340,22	7,14	
		HCO <sub>3</sub> -Mg						
<b>Угловский</b>	I (гидрокарбонатный)	–	HCO <sub>3</sub> -Ca	I (гидрокарбонатный)	–	HCO <sub>3</sub> -Na	1216,15	7,53
			HCO <sub>3</sub> -Mg					
			HCO <sub>3</sub> -Na					
	II (сульфатный)	IIa (магниева)	HCO <sub>3</sub> -Mg					
SO <sub>4</sub> -Mg								
<b>Сахалинский</b>	III (хлоридный)	IIIa (магниева)	HCO <sub>3</sub> -Ca	I (гидрокарбонатный)	–	HCO <sub>3</sub> -Na	1670,86	7,84
						SO <sub>4</sub> -Na	3771,43	7,63

Состав вод *техногенного комплекса* отличается от состава природных вод. В природно-техногенных структурах формируются нейтральные и слабощелочные воды гидрокарбонатного, сульфатного и хлоридного классов, а в Кизеловском бассейне – кислые.

Детальное рассмотрение с позиции межрегионального распространения выделенных типов (классов) подземных вод, установление особенностей распространения в них ионов и комплексных соединений позволило определить условия их формирования и интерполировать иногда ясные, иногда трудноуловимые соответствия между составом воды и составом вмещающих пород. Показано, что состав вод техногенных комплексов находится в тесной зависимости от особенностей геологического строения осадочных бассейнов и строго коррелируется с наличием в надугольной и угольной толщах определенных геологических формаций (рис. 17).



**Рис. 17. Схема стратиграфических позиций природно-техногенных гидрогеологических структур и типовых составов подземных вод техногенных комплексов** (составлена с использованием материалов: Геология и полезные ископаемые России. Т. 1, кн. 1, 2006; Геология угольных месторождений ..., 1990): 1–6 – группы геологических формаций: 1 – терригенных, 2 – карбонатно-терригенных, 3 – терригенно-карбонатных, 4 – соленосных, 5 – сульфатсодержащих, 6 – осадочно-вулканогенных; 7–9 – прочие обозначения: 7 – кристаллические сланцы, филлиты, прослой и линзы кварцитов и мраморов, 8 – угленосность, 9 – перерыв в осадконакоплении, 10 – контур потенциального расположения природно-техногенной структуры

В Донецком, Кизеловском и Челябинском бассейнах состав вод определяется чередующимися фациями различной солености – морскими, соленосными и пресноводными. Для Печорского бассейна характерны однородные морские фации, а для

Кузнецкого, Раздольненского, Партизанского, Угловского и Сахалинского бассейнов – пресноводные. Определена зависимость состава подземных вод техногенных комплексов от стратиграфических позиций природно-техногенных структур относительно горизонтов гипсоносных, карбонатных и соленосных отложений.

Установлено, что формирование I  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , I  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ , IIa  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , IIa  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ , IIa  $\text{SO}_4\text{-Mg}$  вод происходит исключительно при инконгруэнтном растворении минералов вулканогенно-терригенных водовмещающих пород пресноводных фаций. Формирование IIa  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , IIб  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Mg}$ , IIIa  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ , I, IIa, IIб и IIIa  $\text{Cl-Na}$  вод происходит в результате конгруэнтного растворения минералов сульфатных и хлоридных пород, в парагенезисе которых участвуют известняки и доломиты. Формирование IIa  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Mg}$  и IIIa  $\text{SO}_4\text{-Ca}$  вод происходит при растворении порообразующих минералов гипсо-карбонатных, преимущественно несоленосных толщ. Воды I  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ , I  $\text{SO}_4\text{-Na}$  и IIб  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  типов могут формироваться как при конгруэнтном, так и при инконгруэнтном растворении порообразующих минералов (табл. 2).

**Таблица 2. Закономерности формирования катионного состава подземных вод техногенного комплекса в зависимости от формационной принадлежности пород надугольной толщи**

Инконгруэнтное растворение минералов терригенных пород	Конгруэнтное растворение минералов карбонатных, сульфатных и хлоридных пород
<b>I класс (гидрокарбонатный)</b>	
$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (M = 668,0–1069,2 мг/дм <sup>3</sup> )	–
$\text{HCO}_3\text{-Mg}$ (M = 986,29–1351,48 мг/дм <sup>3</sup> )	–
$\text{HCO}_3\text{-Na}$ (M = 1216,2–больше 2268,0 мг/дм <sup>3</sup> )	$\text{HCO}_3\text{-Na}$ (M = 2364,1 мг/дм <sup>3</sup> )
$\text{SO}_4\text{-Na}$ (M = 3771,4–7151,0 мг/дм <sup>3</sup> )	$\text{SO}_4\text{-Na}$ (M = 2651,4–3434,0 мг/дм <sup>3</sup> )
–	$\text{Cl-Na}$ (M = 4685,37 мг/дм <sup>3</sup> )
<b>II класс (сульфатный)</b> <i>Магниева группа</i>	
$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (M = 1052,0 мг/дм <sup>3</sup> )	–
$\text{HCO}_3\text{-Mg}$ (M = 912,0–1790,7 мг/дм <sup>3</sup> )	–
$\text{SO}_4\text{-Mg}$ (M = 1945,8 мг/дм <sup>3</sup> )	–
–	$\text{SO}_4\text{-Na}$ (M = 2539,8–2864,5 мг/дм <sup>3</sup> )
–	$\text{Cl-Na}$ (M = 4335,4 мг/дм <sup>3</sup> )
<i>Кальциевая группа</i>	
$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (M = 1340,2 мг/дм <sup>3</sup> )	$\text{HCO}_3\text{-Ca}$ (M = 924,0 мг/дм <sup>3</sup> )
–	$\text{HCO}_3\text{-Na}$ (M = 764,0 мг/дм <sup>3</sup> )
–	$\text{SO}_4\text{-Ca}$ (M = 2220,1 мг/дм <sup>3</sup> )
–	$\text{SO}_4\text{-Mg}$ (M = 2819,6–3419,3 мг/дм <sup>3</sup> )
–	$\text{SO}_4\text{-Na}$ (M = 3306,8–3592,2 мг/дм <sup>3</sup> )
–	$\text{Cl-Na}$ (M = 5081,4 мг/дм <sup>3</sup> )
<b>III класс (хлоридный)</b> <i>Магниева группа</i>	
–	$\text{SO}_4\text{-Ca}$ (M = 1980,7 мг/дм <sup>3</sup> )
–	$\text{Cl-Na}$ (M = 4516,0 мг/дм <sup>3</sup> )

Таким образом, показано, что особенности геохимии подземных вод районов ликвидированных угольных шахт носят преимущественно естественно-природный характер. Выделенные типы вод (I  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ; I  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ ; IIa  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ ; IIa  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ ; IIa  $\text{SO}_4\text{-Mg}$ ; IIa  $\text{SO}_4\text{-Na}$ ; IIб  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ; IIб  $\text{SO}_4\text{-Na}$ ; IIб  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ; IIб  $\text{SO}_4\text{-Mg}$ ; IIIa  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ ; I, IIa, IIб и IIIa  $\text{Cl-Na}$ ) характеризуют условия и процессы их формирования в природно-техногенных структурах, являются региональными маркерами формационной принадлежности водовмещающих пород и могут использоваться при гидрохимическом прогнозе последствий затопления угольных шахт.

Для подтверждения сделанных выше выводов, касающихся генезиса того или иного типа вод, разработаны имитационные модели растворения пород карбонатных, гипсоносных и соленосных отложений. Созданы модели систем «известняк–вода», «доломиты–вода», «гипс–вода» и «каменная соль–вода». В качестве исходного материала использован средний химический состав водовмещающих пород, пересчитанный на количество молей каждого компонента.

В результате моделирования установлено, что при растворении известняков в условиях закрытой по  $\text{CO}_2$  и атмосферному газу системы формируются пресные ( $< 703,09 \text{ мг/дм}^3$ ) гидрокарбонатные кальциевые воды, сходные по составу с обнаруженными в природно-техногенных структурах Донецкого бассейна. При увеличении соотношения масс Т/Ж отчетливо наблюдается тенденция роста минерализации воды, содержания карбонатных и хлоридных ионов в направлении движения фильтрата, сохраняется концентрационный ряд типа  $\text{Ca} > \text{Mg} > \text{Na}$ . При минерализации раствора  $> 1263,49 \text{ мг/дм}^3$  наблюдается трансформация  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  вод в  $\text{Cl-Ca}$ . В условиях открытой по  $\text{CO}_2$  системы «известняк–вода» область существования  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$  типа вод расширяется, что приводит к формированию  $\text{Cl-Ca}$  вод на более поздних стадиях взаимодействия воды с породой ( $\text{T/Ж} = 0,046$ ; минерализация  $> 5002,8 \text{ мг/дм}^3$ ;  $P_{\text{CO}_2} = 6,85\text{e-}01$  бар) и образованию в последствие (при  $\text{T/Ж} = 0,064$ , минерализации  $6181,3 \text{ мг/дм}^3$ ,  $P_{\text{CO}_2} = 8,135\text{e-}01$  бар и  $P_{\text{O}_2} = 3,8746\text{e-}02$  бар) вод  $\text{Cl-Mg}$  типа. Таким образом, на основании результатов физико-химического моделирования показано, что соотношения между анионами  $\text{Cl}^-$  и  $\text{HCO}_3^-$  в водной фазе системы «известняк–вода» определяются балансами между  $P_{\text{CO}_2}$  и отношениями масс Т/Ж.

В результате имитационного моделирования закрытой по  $\text{CO}_2$  и атмосферному газу системы «доломиты–вода» установлено, что на первых стадиях взаимодействия воды с породой формируются  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$  воды, которые с ростом минерализации переходят в  $\text{Cl-Mg}$ . Показано, что закрытая по  $\text{CO}_2$  и атмосферному газу система «доломиты-вода» последовательно продуцирует водные растворы, соответствующие  $\text{HCO}_3\text{-Mg} \rightarrow \text{Cl-Mg}$  ряду изменения состава.

При моделировании закрытой по  $\text{CO}_2$  и атмосферному газу системы «гипс–вода» установлено, что при соотношении масс Т/Ж = 0,004 наступает насыщение воды гипсом, формируются  $\text{SO}_4\text{-Ca}$  воды с минерализацией до  $1773,97 \text{ мг/дм}^3$ . В

условиях открытой по  $\text{CO}_2$  системы ( $\text{CO}_2 = 0,06\text{--}1,00$  кг/1кг $\text{H}_2\text{O}$ ) продуцируются растворы, соответствующие  $\text{SO}_4\text{--Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{--Ca}$  ряду изменения состава.

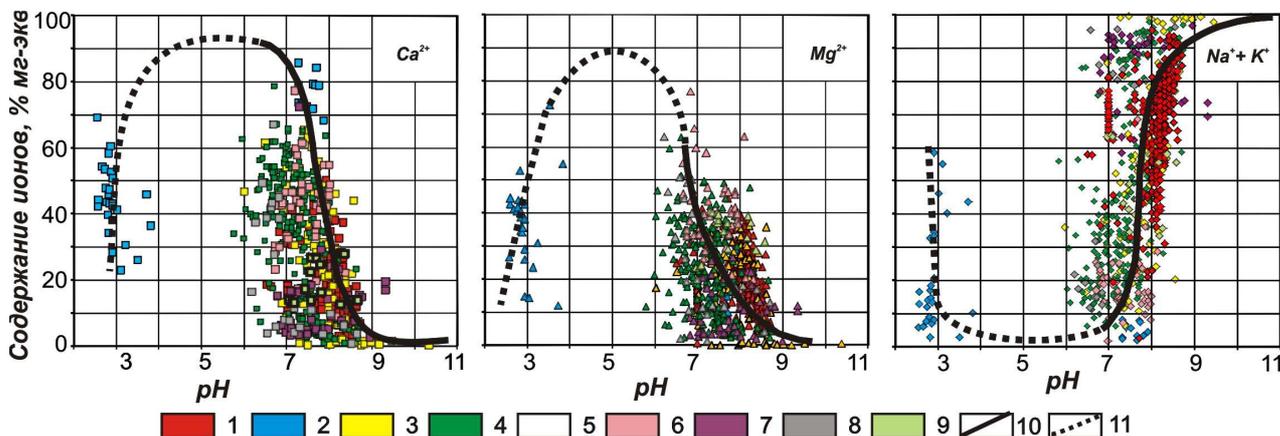
В системе «каменная соль–вода» формируются весьма кислые и кислые ( $\text{pH} = 0,81\text{--}3,80$ ) воды  $\text{Cl--Na}$  типа с минерализацией  $1054,84\text{--}34048,36$  мг/дм $^3$ . Открытие системы по  $\text{CO}_2$  существенного влияния на состав водной фазы не оказывает.

На основании результатов физико-химического моделирования показано, что смещение величины  $\text{pH}$  вод в кислотную область происходит тогда, когда количество  $\text{CO}_2$  в растворе начинает превышать количество  $\text{HCO}_3^-$ , а рост концентрации водородного иона приводит к образованию угольной кислоты (табл. 3). Воды с  $\text{pH} = 2\text{--}4$  могут иметь смешанный катионный состав, в диапазоне  $\text{pH} 4\text{--}6$ , они приобретают кальциевый (магниево-кальциевый) катионный состав, а при  $\text{pH} > 8,0$  – становятся натриевыми (рис. 18).

**Таблица 3. Зависимость  $\text{pH}$  от содержаний угольной кислоты и ее производных, мг/1кг $\text{H}_2\text{O}$**

Форма	$\text{pH}$							
	2***	3***	4***	6**	7**	8**	9*	10**
$\text{H}_2\text{CO}_3$	6,65e+02	1,05e+03	8,73e+02	1,77e+03	4,50e+01	8,18e-01	1,87e-01	1,57e-05
$\text{HCO}_3^-$	7,64e-02	3,14e-01	3,35e+00	1,00e+03	2,39e+02	5,51e+01	2,88e+01	6,41e-02
$\text{CO}_3^{2-}$	1,17e-09	1,20e-08	1,47e-06	7,63e-02	1,49e-01	4,84e+01	5,62e-01	3,27e-02
$\text{CO}_2$	4,14e+01	5,94e+01	5,03e+01	8,23e+01	3,10e+00	6,00e-02	1,00e-02	0,00
$\text{H}^+$	5,02e+00	1,77e+00	1,19e-01	9,72e-04	8,81e-05	7,88e-06	3,52e-06	1,23e-07
$\text{PCO}_2$	3,11e-01	4,85e-01	3,99e-01	7,53e-01	2,05e-02	3,75e-04	8,78e-05	7,20e-09

*Примечание.* Системы: \* – «доломиты–вода»; \*\* – «известняк–вода»; \*\*\* – «вода–порода» Кизелбасса



**Рис. 18. Зависимость концентрации  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Na}^+\text{+K}^+$  от  $\text{pH}$  в подземных водах угольных бассейнов (1–9): 1 – Донецкий, 2 – Кизеловский, 3 – Кузнецкий, 4 – Партизанский, 5 – Печорский, 6 – Раздольненский, 7 – Сахалинский, 8 – Угловский, 9 – Челябинский; 10, 11 – линия, усредняющая положение фигуративных точек: 10 – [по: Геохимия подземных вод ..., 2004], 11 – по данным автора**

В результате анализа особенностей вариаций составов подземных вод в природно-техногенных структурах Донецкого, Кизеловского, Кузнецкого, Печорского, Челябинского, Партизанского, Раздольненского, Угловского и Сахалинского бассейнов, детального рассмотрения с позиции межрегионального распространения

формирующихся генетических типов (классов) подземных вод установлено, что состав вод техногенных комплексов находится в тесной зависимости от особенностей геологического строения осадочных бассейнов, стратиграфического расположения природно-техногенных структур и строго коррелируется с наличием в угольных и надугольных толщах морских, соленосных и пресноводных групп геологических формаций. Растворение сульфатных, хлоридных и карбонатных солей идет конгруэнтно, по механизму приповерхностных реакций, и зависит, по всей видимости, от скорости движения подземных вод, а процессы инконгруэнтного выщелачивания плохо растворимых силикатов определяются главным образом количеством задействованной в процессе растворения породы, т.е. площадью сформировавшейся природно-техногенной структуры.

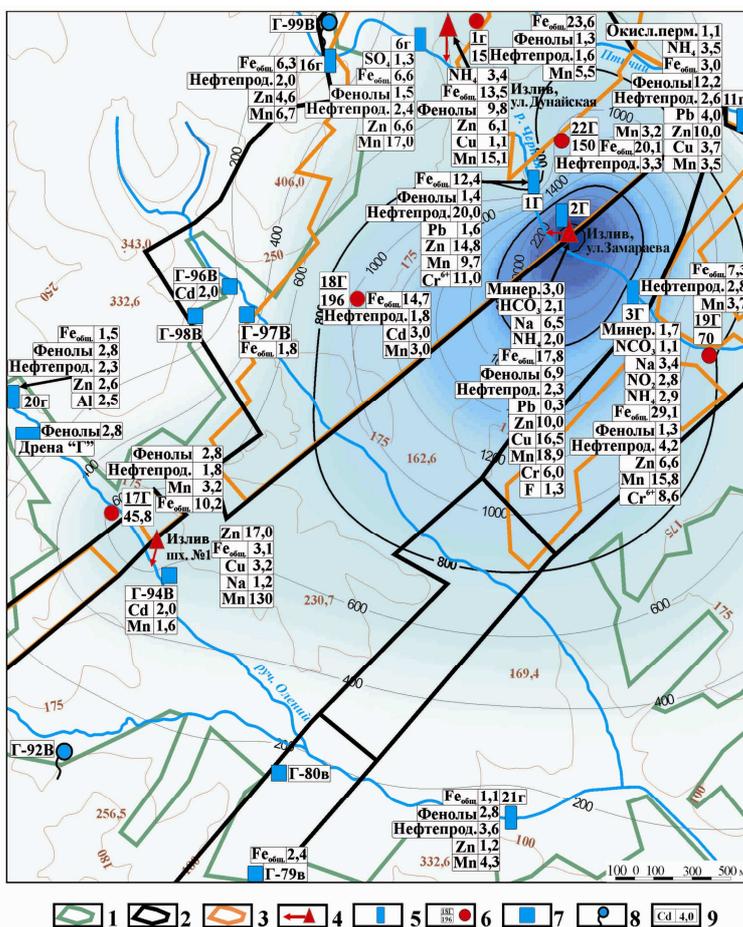
## **Глава 6. ОЦЕНКА ЭКОЛОГИЧЕСКОЙ БЕЗОПАСНОСТИ ТЕХНОГЕННОГО ВОДОНОСНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СОПРЯЖЕННЫХ СРЕД**

В зависимости от региональных особенностей размещения природно-техногенных структур формируются геохимические ореолы подземных вод с повышенными (относительно «Перечня ПДК и ОБУВ ...», 1997 г. и СанПиН 2.1.4.1074-01) содержаниями различных компонентов, обусловленными естественными геохимическими процессами. Набор компонентов, их миграционные формы и концентрации детерминированы и соответственно термодинамически лимитированы. Кислые с высокими значениями окислительно-восстановительного потенциала воды ( $\text{pH} < 5$ ;  $E_h > 400$  мВ) Кизеловского угольного бассейна концентрируют следующие элементы: Fe, Si, Al, Cd, Mn, Pb, Zn, Co, Ni, B, а также могут накапливать Hg, As, S, Cr (VI), Be, Li,  $\text{NO}_3^-$  и др. Близнейтральные воды с высокими значениями окислительно-восстановительного потенциала ( $\text{pH} = 6-9$ ;  $E_h > 400$  мВ) (бассейны Приморья и Сахалина, Кузбасса) концентрируют такие компоненты как: Na,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ , Mg, Fe, Pb, Cd, Zn, Cu,  $\text{NH}_4^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ , As, Cr, Mn, F, а также Sr, Be, Sb, Se и др. Растворение и диффузионное рассоление пород карбонатных, сульфатных и галогенных формаций (Донецкий, Челябинский бассейны) способствуют концентрированию в водном растворе ионов  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$  и  $\text{SO}_4^{2-}$ . При этом очевидно, что чем больше мощность карбонатных, сульфатных и галогенных горизонтов в надугольной толще, тем более опасными, с позиции загрязнения, являются подземные воды техногенных комплексов природно-техногенных структур.

На примере затопленных угольных шахт Дальневосточного региона выполнена оценка влияния вод техногенного комплекса на безопасность бассейна подземных вод и, как следствие, на основные источники водоснабжения, а также на поверхностные водотоки, имеющие важное рыбохозяйственное значение. С помощью программы Surfer 8 реализована интерполяция значений минерализации подземных вод для всех узлов регулярной двумерной сети и построены визуализированные цифровые модели гидрохимических полей для районов ликвидированных

угольных шахт. Показано, что в природно-техногенных структурах формируются воды, которые своим химическим составом инициируют очаг загрязнения.

Техногенные воды шахты «Глубокая» характеризуются повышенными, по сравнению с СанПиН 2.1.4.1074-01, минерализацией, концентрациями  $\text{HCO}_3$ , Na,  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , нефтепродуктов, Pb,  $\text{NH}_4$ , F и фенолов (рис. 19). Очаг загрязнения распространяется на воды трещинного комплекса меловых отложений до глубин 45,8–196,0 м от поверхности земли, т.е. до глубины формирования зоны водопродящих трещин. Цифровая модель наглядно демонстрирует зону распространения вод техногенного комплекса. Показано, что воды меловых отложений в зоне влияния шахты имеют минерализацию 700–820 мг/дм<sup>3</sup>, а в их катионном составе доминируют ионы натрия (107–168 мг/дм<sup>3</sup> при фоновом значении 9,4 мг/дм<sup>3</sup>). В водах меловых отложений фиксируются высокие содержания  $\text{Fe}_{\text{общ}}$ , Mn, нефтепродуктов, а в некоторых пробах – фенолов и Cd (см. рис. 19). Воздействия техногенного водо-



**Рис. 19. Цифровая модель гидрохимических полей значений минерализации подземных вод в районе шахты «Глубокая»: 1 – селитебная зона г. Партизанск; 2 – граница горного отвода; 3 – подработанные участки; 4 – излив вод техногенного комплекса; 5 – пункт гидрохимического мониторинга; 6 – наблюдательная скважина, в числителе ее номер, в знаменателе глубина, м; 7 – колодец; 8 – родник; 9 – компоненты, превышающие ПДК, в разгах**

носного комплекса на воды аллювиального горизонта в районе шахты не обнаружено. Зафиксировано наличие хозяйственно-бытового загрязнения, выражающегося в повышенных содержаниях в водах фенолов (2,8 ПДК) при небольших концентрациях ионов  $\text{Na}^+$  – маркера вод техногенного комплекса.

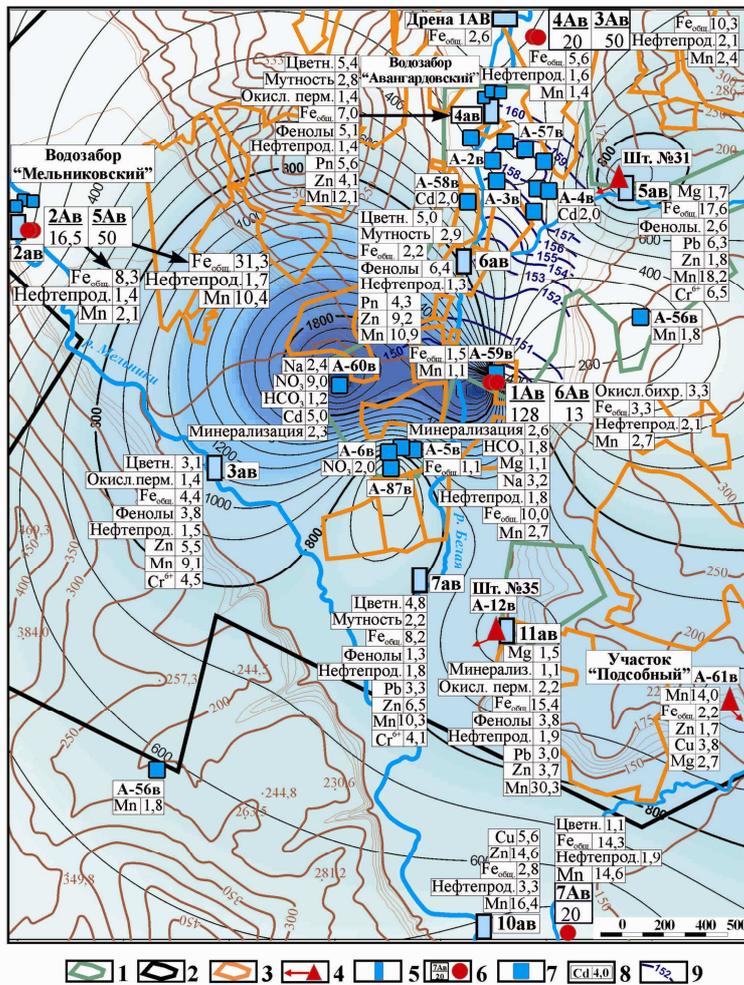
Мониторинговые обследования источников нецентрализованного водоснабжения в районе шахты «Глубокая» показали, что воды в большинстве колодцев не испытывают воздействия от техногенного водоносного комплекса. Однако в водах колодца Г-94в (см. рис. 19) фиксируется техногенное воздействие, вызванное инфильтрацией вод, изливающихся на земную поверхность через устье шахты № 1. Химический тип воды в колодце гидрокарбонатный кальциево-натриевый.

Подтопление территорий на отметках ниже +133,8 м и сосредоточенные выходы вод техногенного комплекса на земную поверхность в районах ул. Замараева (абс. отм. 136,5 м), ул. Дунайской (абс. отм. 133 м) и шахты № 1 (абс. отм. 132 м) приводят к загрязнению поверхностных водотоков (см. рис. 19).

Подобные исследования выполнены для районов всех рассматриваемых в работе ликвидированных шахт Дальневосточного региона («Нагорная», «Авангард», «Углекаменская», «Северная», № 4, «Ильичевская», «Мгачи» и «Бошняково»). Показано, что в выработанном пространстве шахты «Нагорная», на которой организован водоотлив (скв. 27н) и искусственно поддерживается уровень на глубине 35,0 м от поверхности (абс. отм. +75...+76 м), образовавшийся очаг загрязнения характеризуется повышенными концентрациями  $\text{Na}^+$  (1,4–2,2 ПДК),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (3,2–22,5 ПДК), фенолов (2,6–12,2 ПДК), нефтепродуктов (1,3–2,0 ПДК),  $\text{Mn}$  (2,1 ПДК) и  $\text{Cd}$  (3 ПДК). Не соответствуют требованиям СанПиН показатели окисляемости и минерализации. Благодаря тому что в настоящее время в районе шахты искусственно поддерживается уровень подземных вод, проникновение вод техногенного комплекса в водоносный горизонт меловых отложений происходит локально, загрязнения вод аллювиальных отложений не обнаружено. Влияния шахты «Нагорная» на качество воды действующего водозабора «Северный» не установлено. При прекращении откачки следует ожидать ухудшения гидрохимической обстановки вследствие проникновения вод техногенного комплекса в вышележащие горизонты. Возможно формирование участков разгрузки вод, что приведет к ухудшению качества поверхностных вод.

В результате анализа гидрохимической обстановки, сложившейся в районе шахты «Авангард», установлено, что образовавшийся в природно-техногенной структуре очаг загрязнения характеризуется повышенной минерализацией (2,6 ПДК), концентрациями  $\text{HCO}_3^-$  (1,8 ПДК),  $\text{Na}^+$  (3,2 ПДК),  $\text{Mg}$  (1,1 ПДК),  $\text{Fe}_{\text{общ}}$  (10 ПДК), нефтепродуктов (1,8 ПДК) и  $\text{Mn}$  (2,7 ПДК). Отмечаются повышенные содержания фенолов – 0,01 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{NH}_4^+$  – до 5,0 мг/дм<sup>3</sup>,  $\text{Pb}$  – до 0,19 мг/дм<sup>3</sup> (рис. 20). Окисляемость бихроматная достигает 44,8 мг/дм<sup>3</sup>  $\text{O}_2$  (при норме 15,0 мг/дм<sup>3</sup>  $\text{O}_2$ ), а перманганатная – 9,6 мг/дм<sup>3</sup>  $\text{O}_2$  (при норме 5,0 мг/дм<sup>3</sup>  $\text{O}_2$ ).

Установлено, что подъем уровня подземных вод существенно сказался на качестве воды аллювиального горизонта и, как следствие, на качестве вод источников нецентрализованного водоснабжения, каптирующих данный горизонт. В водах колодцев, находящихся в зоне подтопления, содержатся высокие концентрации  $\text{HCO}_3^-$  (1,22 ПДК),  $\text{Na}^+$  (2,4 ПДК),  $\text{Cd}$  (5 ПДК) и  $\text{NO}_3$  (9 ПДК). Минерализация воды в колодце А-60в достигает 2300 мг/дм<sup>3</sup> (см. рис. 20). Повышенная концентрация нитратов свидетельствует о комплексном техногенном воздействии, где загрязнение водами техногенного комплекса является одной из составляющих. Влияние на качество поверхностных водотоков (рек Белая и Мельники) оказывают изливы вод



**Рис. 20. Цифровая модель гидрохимических полей значений минерализации подземных вод в районе шахты «Авангард»: 1 – селитебная зона пос. Авангард; 2 – граница горного отвода; 3 – подработанные участки; 4 – излив вод техногенного комплекса; 5 – пункт гидрохимического мониторинга; 6 – наблюдательная скважина, в числителе ее номер, в знаменателе глубина, м; 7 – колодец; 8 – компоненты, превышающие ПДК, в разгах; 9 – гидроизогипсы первого от поверхности водоносного горизонта**

Опасение вызывает тот факт, что признаки загрязнения отмечаются и по скважинам (9С, 10С, 11С), находящимся в непосредственной близости от водозабора «Углекаменский». С учетом того, что региональное направление движения подземных вод ориентировано с севера на юг, существует вероятность ухудшения качества воды на водозаборе. Излив вод техногенного комплекса на земную поверхность на участке «Старая насосная» оказывает существенное влияние на воды р. Тигровая-1. Наблюдается изменение не только состава воды в реке, но и ее химического типа. Отмечаются повышенные значения минерализации,  $SO_4^{2-}$ , Na,  $Fe_{общ}$ , фенолов, Mn и некоторых других компонентов. Влияние излива из шт. № 25 на воды р. Мельники происходит в меньшей степени. Химический состав речной воды, ее минерализация и жесткость

техногенного комплекса на земную поверхность. Воздействие на качество воды водозаборов «Авангардовский» и «Мельниковский» не обнаружено.

В результате изучения состава подземных и поверхностных вод в районе шахт «Углекаменская» и «Северная» установлено, что со стороны трещинного водоносного горизонта существует подпор, который выражается в повышенной уровне поверхности подземных вод. Абсолютная отметка вод зоны трещиноватости коренных образований стабильно находится на отметке 127–130 м, в связи с этим подземные воды меловых и аллювиальных отложений имеют признаки загрязнения. Это отражается на качестве воды источников централизованного водоснабжения. Наибольшая загрязненность подземных вод отмечается в пос. Казанка, где воды в колодцах и скважинах по своему качеству близки к водам техногенного комплекса.

остаются в основном без изменений. Наблюдается превышение ПДК по  $Fe_{\text{общ.}}$ , нефтепродуктам и Mn.

Также экологические обследования выполнялись в Раздольнском бассейне (шахты «Ильическая» и № 4). Влияние техногенного комплекса на подземные и поверхностные воды в рассматриваемых районах проявлено локально. На примере шахт Сахалина («Мгачи» и «Бошняково») рассмотрено воздействие вод техногенных комплексов на поверхностные водотоки, имеющие важное рыбохозяйственное значение. Построены карты антропогенной нагрузки.

Таким образом, установлено, что затопление угольных шахт Дальневосточного региона привело к формированию вод, которые своим химическим составом инициируют возникновение очага загрязнения. Воды техногенных комплексов оказывают влияние на безопасность бассейна подземных вод и, как следствие, на основные источники водоснабжения регионов, а также на поверхностные водотоки, имеющие важное рыбохозяйственное значение. Показано, что наблюдаемые загрязнения носят локальный в пространстве характер и определяются масштабами распространения зоны водопродящих трещин и установившимся уровнем вод техногенного комплекса. Ухудшение химического состава подземных вод в районах ликвидированных шахт возможно в результате активизации геомеханических процессов, сдвижений земной поверхности и, как следствие, увеличения площади взаимодействия воды с горной породой. На основании результатов физико-химического моделирования можно утверждать, что при соотношении масс Т/Ж  $> 0,08 > 0,128$  в районах ликвидированных шахт, надугольная толща которых сложена алюмосиликатными породами, минерализация воды составит  $> 7,95 > 11,76$  г/дм<sup>3</sup>. Это отразится на качестве воды в децентрализованных источниках водоснабжения. Возможно формирование новых участков разгрузки вод техногенного комплекса и ухудшение качества вод поверхностных водотоков.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе представлены принципы оценки и прогнозирования геохимических особенностей и эмпирических закономерностей состава подземных вод, формирующихся в природно-техногенных структурах районов ликвидированных угольных шахт. Выдвинут ряд положений, касающихся механизма и геохимических последствий процессов, происходящих в природно-техногенных гидрогеологических структурах, направленных на решение сложной научно-практической проблемы рационального природопользования, мониторинга и прогнозирования состояния окружающей среды, предотвращения и ликвидации ее загрязнения:

1. Режим затопления шахт определяется особенностями современной гидрогеологической стратификации надугольной и угольной толщ, условиями отработки угольных пластов, масштабами распространения над выработанным пространством зоны водопродящих трещин, величиной водопритока и емкостными характеристиками сдренированного массива. Подземные водоносные горизонты

при затоплении угольных шахт не восстанавливаются в прежних параметрах, а формируют гидравлически связанный техногенный водоносный комплекс, отличающийся от природного фильтрационными и уровневыми характеристиками.

2. Геохимическая специфика подземных вод техногенного комплекса природно-техногенных структур угольных бассейнов (месторождений) Приморья и Сахалина закладывается в области питания и трансформируется в направлении фильтрационного потока. Увеличение соотношения реагирующих масс Т/Ж приводит к росту минерализации вод и последовательному продуцированию растворов, соответствующих  $\text{HCO}_3\text{-Ca} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-Na(Mg)} \rightarrow \text{HCO}_3\text{-SO}_4\text{-Na(Mg)} \rightarrow \text{SO}_4\text{-Na(Mg)}$  ряду. Ионообменная трансформация ограничена диапазоном рН значений от 5,8 до 9,4. Накопление  $\text{Na}^+$  или  $\text{Mg}^{+2}$  в ряду определяется типом пород. Появление сульфатных ионов обусловлено наличием сульфидов и определяется  $P\text{CO}_2$  ( $10^{2,0}$ ) и  $P\text{O}_2$  ( $10^{-1,0}$ ). Увеличение равновесного парциального давления  $\text{CO}_2$  ( $10^{-1,0}$ ) и уменьшение  $P\text{O}_2$  ( $10^{-2,0}$ ) расширяет область существования в угольных бассейнах  $\text{HCO}_3\text{-Na}$  типа вод.

3. Состояние неравновесности в растворах и преобразования химического состава подземных вод в природно-техногенных структурах угольных бассейнов (месторождений) поддерживают физико-химические особенности таких элементов и соединений, как  $\text{CO}_3^{-2}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{OH}^-$ ,  $\text{H}_3\text{O}^+$ ,  $\text{H}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  и  $\text{Cl}^-$ . рН диапазон геохимической трансформации подземных вод определяется карбонатным равновесием и устанавливает соотношение между концентрациями  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  и  $\text{Na}^+$  в подземных водах бассейнов.

4. Миграция компонентов в природных водах осуществляется преимущественно в виде собственных незакомплексованных ионов, с ростом минерализации доля комплексных соединений миграционных форм растет. Трансформация состава подземных вод с тенденцией возрастания концентраций компонентов ведет к усложнению состава аутигенных минеральных фаз. Процессы образования вторичных минералов контролируют содержания химических элементов в водах.

5. Состав вод техногенных комплексов находится в тесной зависимости от особенностей геологического строения осадочных бассейнов и строго коррелируется с наличием в угольной и надугольной толщах морских, соленосных и пресноводных групп геологических формаций, которые определяют направленность процессов растворения в системе «вода–порода».

6. Формирование I  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , I  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ , IIa  $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ , IIa  $\text{HCO}_3\text{-Mg}$ , IIa  $\text{SO}_4\text{-Mg}$  типов вод свидетельствует об инконгруэнтном растворении минералов вулканогенно-терригенных водовмещающих пород пресноводных фаций; образование вод IIa  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , IIб  $\text{HCO}_3\text{-Na}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Mg}$ , IIIa  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ , I, IIa, IIб и IIIa  $\text{Cl-Na}$  типов характеризует условия и процессы конгруэнтного растворения минералов гипсо-соленосных отложений, в парагенезисе которых участвуют известняки и доломиты, а формирование IIa  $\text{SO}_4\text{-Na}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Ca}$ , IIб  $\text{SO}_4\text{-Mg}$

Na, IIb SO<sub>4</sub>-Mg и IIIa SO<sub>4</sub>-Ca вод свидетельствует о растворении минералов гипсокарбонатных, преимущественно несоленосных толщ. Установленная зависимость выделенных типов вод от формационной принадлежности водовмещающих пород может использоваться при разработке гидрохимических прогнозов, мероприятий по управлению качеством подземных вод и минимизации воздействия на окружающую среду на стадиях проектирования, эксплуатации и ликвидации угледобывающих предприятий.

7. Воды техногенных комплексов природно-техногенных структур районов ликвидированных угольных шахт своим химическим составом инициируют очаг загрязнения и оказывают влияние на безопасность бассейна подземных вод и, как следствие, на основные источники водоснабжения, а также на поверхностные водотоки. Загрязнения носят локальный в пространстве характер, определяются масштабами распространения зоны водопроводящих трещин и установившимся уровнем вод техногенного комплекса. Ухудшение химического состава подземных вод возможно в результате активизации геомеханических процессов.

## СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

### *Статьи в журналах, рекомендованных ВАК*

1. Чепкая Н.А., **Тарасенко И.А.**, Елисафенко Т.Н., Челноков Г.А. Оценка экологических последствий ликвидации шахт Партизанского угольного бассейна (Приморский край) // Вестн. Томского гос. ун-та. Серия «Науки о Земле». Томск: Изд-во ТГУ, 2003. № 3 (5). С. 228–231.

2. Буянова Л.Г., Елисафенко Т.Н., **Тарасенко И.А.** Результаты гидрохимических исследований на полях ликвидированных шахт Сахалинской области // Горный информ.-аналит. бюл. 2004. № 10. С. 166–171.

3. **Тарасенко И.А.**, Чепкая Н.А., Елисафенко Т.Н., Зиньков А.В., Катаева И.В., Садардинов И.В. Экологические последствия закрытия угольных шахт и меры по предотвращению их отрицательного воздействия на регион // Вестн. ДВО РАН. 2004. № 1. С. 87–93.

4. Tshepkaia N.A., Chelnokov G.A., Karabtsov A.A., **Tarasenko I.A.** Hydrochemical characteristics of Lastochka SPA (Primorye, Far east of Russia) // J. of Geochemical Exploration. 2006. Vol. 88. P. 148–152.

5. **Тарасенко И.А.**, Тарасова Т.В., Зиньков А.В. Моделирование техногенного гидродинамического режима Ургальского каменноугольного месторождения // Инженерные изыскания. 2010. № 11. С. 64–71.

6. **Тарасенко И.А.** О состоянии окружающей природной среды в районах ликвидированных угольных шахт (на примере Партизанского района Приморского края) // Вестн. ДВО РАН. 2010. № 3. С. 113–118.

7. **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.

8. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В., Буянова Л.Г. Инженерно-экологические изыскания на стадии ликвидации шахты «Ильичевская» (Приморский край) // Инженерные изыскания. 2011. № 7. С. 60–67.

9. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В., Оводова Е.В. Инженерно-экологические изыскания при оценке последствий ликвидации шахт в Раздольненском каменно-угольном бассейне Приморского края // Инженерные изыскания. 2013. № 3. С. 28–37.

10. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Особенности современного химического состава подземных вод угленосных районов о. Сахалин // Тихоокеан. геология. 2013. Т. 32, № 4. С. 100–110.

11. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Оценка техногенного загрязнения подземного водного бассейна в районе ликвидированной шахты (Липовецкое каменно-угольное месторождение, Приморский край) // Вестн. ДВО РАН. 2013. № 2. С. 106–115.

12. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Оценка экологической безопасности подземного водного бассейна при закрытии шахт Приморского края (на примере шахты «Липовецкая») // Горный информ.-аналит. бюл. 2013. № 2. С. 362–373.

13. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Условия формирования и особенности химического состава подземных вод при «мокрой» ликвидации угольных шахт в Приморье // Вода: химия и экология. 2014. № 7. С. 92–98.

### *Монографии*

14. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Экологические последствия минералогеохимических преобразований хвостов обогащения Sn–Ag–Pb–Zn руд (Приморье, Дальнегорский район). Владивосток: Дальнаука, 2001. 194 с.

15. Перспективы освоения угольных месторождений Дальнего Востока. В 2 т. Т. 1. Горно-экологические условия / колл. авторов; под общ. ред. И.В. Садардинова. Владивосток: Изд-во Дальневост. ун-та, 2004. 348 с.

### *Статьи в журналах и сборниках*

16. Елисафенко Т.Н., **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В., Катаева И.В. Пути ликвидации отрицательного воздействия шахтных вод // Геология угольных месторождений. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. академии, 2003. Вып. 13. С. 270 – 274.

17. Садардинов И.В., **Тарасенко И.А.**, Буянова Л.Г. Оценка влияния шахты «Авангард» на санитарное состояние подземных и поверхностных вод // Экол. вестн. Приморья. 2004. Вып. 5. С. 11–15.

18. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В., Садардинов И.В. Прогнозирование изменений химического состава вод шахты «Ургал» // Геология угольных месторожде-

ний. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. академии, 2004. Вып. 14. С. 253–258.

19. **Тарасенко И.А.**, Буянова Л.Г. Гидрохимические исследования на полях ликвидированных шахт Сахалинской области // Геология угольных месторождений. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. академии, 2005. Вып. 15. С. 248–257.

20. **Тарасенко И.А.**, Буянова Л.Г. Состояние природных и техногенных вод в зоне влияния ликвидированной шахты «Ильичевская» (Приморский край) // Геология угольных месторождений. Екатеринбург: Изд-во Уральской гос. горно-геол. академии, 2006. Вып. 16. С. 219–227.

21. **Тарасенко И.А.**, Тарасова Т.В., Зиньков А.В. Гидрогеологические особенности Ургальского каменноугольного месторождения // Литология и геология горючих ископаемых. Екатеринбург: Изд-во Уральского гос. горного ун-та, 2008. Вып. 2 (18). С. 331–337.

22. Седых А.К., **Тарасенко И.А.**, Оводова Е.В. Геоэкологическая ситуация и ранжирование угольных месторождений Дальнего Востока России // Проблемы геоэкологии, природопользования и охраны окружающей среды Дальнего Востока: сб. статей / под ред. В.И. Петухова. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2010. С. 22–32.

23. **Тарасенко И.А.**, Седых А.К., Зиньков А.В., Павлов Н.И. Геоэкологические особенности и оценка воздействия на окружающую среду разработки Солнцевского месторождения (Сахалинская область) // Проблемы геоэкологии, природопользования и охраны окружающей среды Дальнего Востока: сб. статей / под ред. В.И. Петухова. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2010. С. 49–66.

24. Седых А.К., **Тарасенко И.А.**, Павлов Н.И. Геоэкологическое районирование угольных месторождений Дальнего Востока России // Проблемы геоэкологии, природопользования и охраны окружающей среды Дальнего Востока: сб. статей / под ред. В.И. Петухова. Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2010. С. 4–21.

25. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Природно-техногенные преобразования гидrolитосферы в районах ликвидированных угольных шахт // Вестн. Инженер. школы ДВФУ. 2013. № 3 (16). С. 52–59.

26. **Tarasenko I.A.**, Zinkov A.V. Modern conditions of underground and superficial waters in area of liquidated mine «Mgachi» (Sakhalin island, Russia) // Вестн. Инженер. школы ДВФУ. 2014. № 1. С. 47–59.

#### *Материалы научных конференций*

27. Садардинов И.В., Елисафенко Т.Н., **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В., Чепкая Н.А. Экспериментальное моделирование очистки загрязненных шахтных вод (Южное Приморье) // Тр. Междунар. форума по проблемам науки, техники и образования. 2002. Т. 3. С. 131–133.

28. Елисафенко Т.Н., Чепкая Н.А., **Тарасенко И.А.**, Челноков Г.А. Геоэкологические последствия ликвидации шахт Партизанского угольного бассейна // Ма-

териалы годичной сессии Научного совета РАН по проблемам геоэкологии, инженерной геологии и гидрогеологии: Сергеевские чтения. М.: ГЕОС, 2003. Вып. 5. С. 250–255.

29. Tchepkaia N., **Tarassenko I.**, Elisaphenko T. Hydrochemistry of coalwater in primorsky region // Proceedings of the 4th European Conference on Regional Geoscientific Cartography and Information System. Bologna, Italy, 2003. P. 700–703.

30. Tchepkaia N., **Tarassenko I.**, Elisaphenko T. Abandoned coal mines in the Primorye region (Far East Russia) and its impact on water quality // Scientific Sessions abstracts 32nd IGC Florence, Italy, 2004. Vol. 1. P. 342.

31. **Тарасенко И.А.** Типизация природно-техногенных преобразований гидrolитосистем при ликвидации угольных шахт // Проблемы экологии, безопасности жизнедеятельности и рационального природопользования Дальнего Востока и стран АТР: материалы II Междунар. конф. Владивосток, 2006. С. 203–208.

32. **Tarassenko I.A.**, Tchepkaia N.A., Sadardinov I.V., Bragin I.V. Abandoned mines drainage at a coal mine in Sakhaline island, Far East of Russia // Proceeding of the 5th European Congress on Regional Geoscientific Cartography and information system. Barcelona, Espana, 2006. P. 621–623.

33. Zinkov A.V., Shorokhova S.A., **Tarassenko I.A.**, Petukhov V.I. Correlation of Late Triassic geological structures of Primory of Russia and northeastern China // Intl Symposium on Paleontology and Stratigraphy. Benxi, China, 2007. P. 37.

34. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Опыт прикладных геохимических исследований техногенных ландшафтов // Минералогия и геохимия ландшафта горно-рудных территорий. Современное минералообразование: тр. II Всерос. симпоз. с междунар. участием и VIII Всерос. чтений памяти академика А.Е. Ферсмана. Чита, 2008. С. 124–126.

35. Ветошкина А.В., **Тарасенко И.А.**, Окулов А.К. Безреагентная очистка шахтных вод (на примере шах. «Углекаменская» Приморского края) // Проблемы экологии, геологии и рационального природопользования: материалы конференции. Владивосток, 2009. С. 48–50.

36. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Природно-техногенные преобразования гидrolитосистем при ликвидации угольных шахт // Экология и безопасность жизнедеятельности, охрана окружающей среды, экономика: материалы науч.-техн. конф. «Вологдинские чтения». Владивосток: Изд-во ДВГТУ, 2009. С. 58–61.

37. **Тарасенко И.А.**, Буянова Л.Г., Зиньков А.В. Состояние гидросистем при ликвидации угольных шахт // Материалы III Междунар. экол. форума «Природа без границ». Владивосток, 2009. С. 306–309.

38. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. К вопросу о природно-техногенных преобразованиях гидrolитосистем при ликвидации угольных шахт // Материалы научно-технической конференции «Вологдинские чтения»: Экология и безопасность жизнедеятельности, охрана окружающей среды, экономика. Владивосток: Изд-во

ДВГТУ, 2010. С. 194–198.

39. Kharitonova N.A., **Tarassenko I.A.**, Chelnokov G.A. Hydrogeochemistry and origin of cold high pCO<sub>2</sub> waters of Gonjinskoe spa (Priamurye, Russia) // Mineralogical Magazine. 2011. Vol. 75 (3). P. 1178.

40. **Тарасенко И.А.**, Зиньков А.В. Современное состояние подземной гидросферы угленосных районов о. Сахалин // Материалы XX Совец. по подземным водам Сибири и Дальнего Востока. Иркутск, 2012. С. 134–137.

41. **Тарасенко И.А.**, Чудаев О.В., Зиньков А.В. Особенности трансформации состава подземных вод в районах ликвидированных угольных шахт // Всероссийская конференция «Водные и экологические проблемы, преобразование экосистем в условиях глобального изменения климата»: сб. докладов [Электронный ресурс]. Хабаровск, 2014. С. 154–158.