



**РАЗВИТИЕ ГИДРОГЕОЛОГИИ В МИРЕ И ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ  
В ИНСТИТУТЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК НАН УКРАИНЫ**

**В.М. Шестопалов<sup>1</sup>, А.Б. Климчук<sup>2</sup>, И.П. Онищенко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина,  
E-mail: vmshest@gmail.com*

*Доктор геолого-минералогических наук, профессор, академик НАН Украины, заведующий отделом гидрогеологических проблем.*

<sup>2</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина,  
E-mail: klim@speleogenesis.info*

*Доктор геологических наук, член-корреспондент НАН Украины, ведущий научный сотрудник отдела гидрогеологических проблем.*

<sup>3</sup> *Институт геологических наук НАН Украины, Киев, Украина,  
E-mail: iony@meta.ua*

*Кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник отдела гидрогеологических проблем.*

Представлен обзор развития гидрогеологии в мире и гидрогеологических исследований в Институте геологических наук НАН Украины. Рассмотрены проблемы и достижения в некоторых ключевых направлениях гидрогеологии в общемировом контексте, охарактеризованы история и содержание этих исследований в институте. С учетом имеющихся достижений и мировых трендов намечены перспективные направления гидрогеологических исследований.

*Ключевые слова:* гидрогеология; история гидрогеологии; ключевые проблемы и тренды гидрогеологии; перспективные направления гидрогеологии; гидрогеология в Институте геологических наук НАН Украины.

**DEVELOPMENT OF HYDROGEOLOGY IN THE WORLD AND HYDROGEOLOGICAL  
RESEARCH IN THE INSTITUTE OF GEOLOGICAL SCIENCES OF THE NAS OF UKRAINE**

**V.M. Shestopalov<sup>1</sup>, A.B. Klimchouk<sup>2</sup>, I.P. Onyshchenko<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine  
E-mail: vmshest@gmail.com*

*Doctor of Science (Geol.), Professor, Academician of NAS of Ukraine, Head of the Department of Hydrogeological Problems.*

<sup>2</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine  
E-mail: klim@speleogenesis.info*

*Doctor of Science (Geol.), Corresponding Member of NAS of Ukraine, Leading Scientist of the Department of Hydrogeological Problems.*

<sup>3</sup> *Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine, Kiev, Ukraine  
E-mail: iony@meta.ua*

*Candidate of Science (Geol.), Senior Scientist of the Department of Hydrogeological Problems.*

The article provides an overview of the development of hydrogeology in the world and of hydrogeological research in the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine. Problems and achievements in some key branches of hydrogeology in the global context are considered, the history and directions of these studies at the Institute are characterized. Taking into account the existing accomplishments and world's trends, perspective directions of hydrogeological research are outlined.

*Key words:* hydrogeology; history of hydrogeology; key issues and trends in hydrogeology; promising directions in hydrogeology; hydrogeology in the Institute of Geological Sciences of the NAS of Ukraine.

# РОЗВИТОК ГІДРОГЕОЛОГІЇ У СВІТІ ТА ГІДРОГЕОЛОГІЧНІ ДОСЛІДЖЕННЯ В ІНСТИТУТІ ГЕОЛОГІЧНИХ НАУК НАН УКРАЇНИ

**В.М. Шестопалов<sup>1</sup>, О.Б. Климчук<sup>2</sup>, І.П. Онищенко<sup>3</sup>**

<sup>1</sup> *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,*

E-mail: vmshest@gmail.com

*Доктор геолого-мінералогічних наук, професор, академік НАН України, завідуючий відділом гідрогеологічних проблем.*

<sup>2</sup> *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,*

E-mail: klim@speleogenesis.info

*Доктор геологічних наук, член-кореспондент НАН України, провідний науковий співробітник відділу гідрогеологічних проблем.*

<sup>3</sup> *Інститут геологічних наук НАН України, Київ, Україна,*

E-mail: iony@meta.ua

*Кандидат геолого-мінералогічних наук, старший науковий співробітник відділу гідрогеологічних проблем.*

Подано огляд розвитку гідрогеології в світі і гідрогеологічних досліджень в Інституті геологічних наук НАН України. Розглянуто проблеми і досягнення в деяких ключових напрямках гідрогеології в загальносвітовому контексті, охарактеризовано історію і склад цих досліджень в інституті. З урахуванням наявних досягнень і світових трендів окреслено перспективні напрями гідрогеологічних досліджень.

*Ключові слова:* гідрогеологія; історія гідрогеології; ключові проблеми та тренди гідрогеології; перспективні напрями гідрогеології; гідрогеологія в Інституті геологічних наук НАН України.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Цель данного обзора – обозначить основные вехи и направления гидрогеологических исследований в мире в течение последнего столетия и таких исследований в Институте геологических наук (ИГН) НАН Украины, а также обсудить перспективы и вероятные будущие тренды. Основные вехи и тренды намечены в результате синтеза и обобщения ряда обзорных статей по истории развития гидрогеологии в мире [Schwartz, Ibaraki, 2001; Narasimhan, 2005; Anderson, 2008; Anderson, Siegel, 2013], соответствующих глав монографических работ и учебников [Пиннекер и др., 1980; Шварцев, 1996; Всеволожский, 2007], материалов спецвыпусков журналов и сборников [Voss, 2005; Будущее..., 2008], а также других релевантных публикаций и собственных представлений авторов.

При анализе и обсуждении перспектив развития гидрогеологии важно учитывать особенности объекта и предмета этой науки. Объектами гидрогеологии традиционно считаются подземные воды (Ф.П. Саваренский, К. Кейльгак, Ж. Кастани, О.Е. Мейнцер, С. Дэвис, Р. де Уист) [Геологический..., 1978] или подземная гидросфера [Пиннекер, 1984; Шварцев, 1996], рассматриваемые во взаимодействии со средой, которая их вмещает (осадки, породы, литосфера

в целом). Подземная гидросфера, являясь частью единой гидросферы Земли, связана процессами водообмена с атмосферой и поверхностными водами, чем определяется тесная связь гидрогеологии с дисциплинами водного цикла наук о Земле (метеорологией, гидрологией суши, океанологией и др.). Свойства среды, в которую «вложена» подземная гидросфера, определяют состояние, состав и подвижность подземных водных флюидов, что обуславливает неразрывную взаимосвязь гидрогеологии с другими основными науками геологического цикла. Как будет показано ниже, в развитии гидрогеологии последних десятилетий прослеживается отчетливый тренд от фокуса на самих подземных водах к пониманию ее как науки о геологических процессах, происходящих под влиянием водных флюидов [Narasimhan, 2005]. С этим коррелирует представление П.Ф. Швецова о гидролитосфере как объекте изучения гидрогеологии и определение С.Л. Шварцева гидрогеологии как науки о геологии воды [Шварцев, 1996]. Имманентным свойством жидкой и газообразной воды является подвижность, и изучение состояний, количества и формы движения воды в литосфере обеспечивается на основе наук физического цикла. Поскольку возможности прямых измерений параметров движения подземных вод

крайне ограничены, в количественных оценках преобладают расчетные методы и методы моделирования, что определяет большую роль математики в гидрогеологии. Все подземные воды являются сложными по составу природными системами, поэтому их изучение с необходимостью пересекается с предметными областями и методами различных разделов химии, микробиологии и биохимии.

Исключительная сложность объекта гидрогеологии и многообразие его практической значимости обуславливает многоаспектность предметной области этой науки [Пиннекер и др., 1980; Пиннекер, 1984; Всеволожский, 2007 и др.]. В фундаментальной части гидрогеологии принято, помимо общей гидрогеологии (основы учения о подземной гидросфере), выделять такие разделы: 1) региональная гидрогеология; 2) гидрогеодинамика; 3) гидрогеохимия; 4) гидрогеотермия; 5) палеогидрогеология. Выделяются также разделы гидрогеологии особых сред и обстановок – карста, вулканических областей, морского дна, криолитозоны и пр. К прикладным разделам относятся: 1) оценка ресурсов подземных вод; 2) гидрогеология месторождений твердых полезных ископаемых; 3) нефтегазовая гидрогеология; 4) мелиоративная гидрогеология; 5) инженерная гидрогеология; 6) экологическая гидрогеология; 7) минеральные воды; 8) мониторинг подземных водных объектов.

## ОСНОВНЫЕ ВЕХИ И ТRENДЫ РАЗВИТИЯ ГИДРОГЕОЛОГИИ

### Зарождение гидрогеологии и становление теоретических основ

Подземные воды и связанные с ними феномены всегда имели практическое значение и привлекали внимание человека. Важные и в отдельных аспектах адекватные (с позиций современного знания) суждения о подземных водах обнаруживаются в высказываниях многих мыслителей древности, но первыми научными работами в области гидрогеологии считаются труды французских исследователей Пьера Перро (1674) и Эдма Мариотта (1717), в которых впервые развиты количественные представления о формировании подземных вод вследствие инфильтрации атмосферных осадков. В 1802 г. выдающимся натуралистом Ж.Б. Ламарком была опубликована книга «Гидрогеология». Работами Э. Мариотта, а в первой половине XIX в. Ф. Араго и А. Гум-

больта были заложены основы современного понимания гидрогеологических систем как нижней части гидрологического цикла. На основе исследований по проблемам водоснабжения города Дижон французским инженером А. Дарси в 1856 г. был установлен основной закон фильтрации в пористой среде, который является базовым в гидродинамике подземных вод (линейный закон фильтрации), а Ж. Дюпюи в 1857 г. исследовал движение воды и притоки к скважинам в проницаемых водоносных горизонтах и представил основной закон фильтрации в дифференциальной форме. В 1863 г. он же концептуализировал напорный (артезианский) водоносный горизонт в контексте регионального бассейна подземных вод. В 1877 г. Ж. Буссинеск вывел дифференциальное уравнение нестационарного движения подземных вод. Работами этих ученых и ряда их современников в Австрии, Германии, Великобритании и других странах, вызванными необходимостью отвечать на резко возросшие потребности бурно развивающейся промышленности и интенсивной урбанизации, ко второй половине XIX в. были определены ряд важных закономерностей региональной гидрогеологии и сформированы основы подземной гидравлики. Считается [Пиннекер и др., 1980; Шварцев, 1996], что становление гидрогеологии как науки состоялось именно в это время.

Такие же практические потребности плюс освоение новых территорий двигали развитие гидрогеологии в США, к которым к концу XIX в. перешло лидерство в развитии этой науки [Narasimhan, 2005]. С созданием в 1879 г. по рекомендации Национальной академии наук, Геологической службы США (USGS), на разведывание ресурсов подземных вод и связанные с этим исследования стали выделяться крупные средства федерального бюджета и бюджета штатов, а региональные гидрогеологические исследования, связанные с именами Н. Дарттона, В. Менденхалла, Ч. Ли и О. Мейцнера, приобрели систематический характер. В Российской империи, также отвечая на практические запросы, систематические исследования подземных вод в различных регионах получили развитие в конце XIX – начале XX вв. (С.П. Крашенинников, И.В. Мушкетов, С.Н. Никитин Г.Е. Щуровский, В.В. Докучаев, Н.Н. Павловский, В.Ф. Зуев, В. Оппоков, П.В. Отоцкий, Г.П. Гельмер, Г.Е. Щуровский, В.С. Ильин, О.К. Ланге, С.Н. Никитин, А.Ф. Лебедев, А.П. Герасимов, А.Н. Огильви, Н.Н. Славянов,

А.В. Львов и др.] и продолжились в бывшем СССР в 1920–1930-х гг., когда становление гидрогеологии оформилось в виде учебников, фундаментальных публикаций, кафедр и специальностей в вузах, проведении гидрогеологических съездов (1931 г.), конференций и пр.

В первой половине XX в. все более отчетливо выделяются направления, сфокусированные на разных аспектах изучения подземных вод: региональных закономерностях формирования и движения, динамике и количественном анализе, генезисе, химическом составе и условиях его формирования. Впоследствии к ним добавляется палеогидрогеологическое. Во второй половине XX в. гидрогеология вступила в качественно новый этап развития, связанный с освоением огромного количества нового фактического материала, пересмотром многих теоретических положений, переходом от стадии собирания и систематизации фактов к их объяснению и разработке прогнозов, к активному развитию различных разделов прикладной гидрогеологии на основе новых технологий и с учетом новых потребностей развития. С развитием представления о геологическом круговороте воды в земной коре, получением значимых результатов исследований в системе «вода – порода» и разработкой основ палеогидрогеологии гидрогеология становится по-настоящему геологической наукой – из учения о подземной ветви гидрологического цикла она превратилась в науку о процессах и их закономерностях в широком геологическом измерении.

### **Развитие и зрелость – некоторые ключевые проблемы и тренды**

#### ***Фильтрация пластовых вод, гидродинамика слоистых водоносных комплексов, прикладная гидрогеология***

Наиболее существенные продвижения в развитии теоретических основ фильтрации пластовых вод в первой половине XX в. связаны с осознанием изменчивости состояния потока подземных вод во времени и разработкой принципов нестационарного течения в пластах. На опыте изучения артезианского бассейна в Южной Дакоте О.Е. Meinzer в 1928 г. была выдвинута концепция эластичного поведения пористых пород и упругой емкости водоносных пластов [Meinzer, 1928]. Она была математически реализована С.В. Theis [Theis, 1935], который связал изменение упругой емкости пласта с изменением

гидравлического напора и вывел уравнения нестационарного течения подземных вод к скважине. С.Е. Jacob [Jacob, 1940] выполнил анализ тейсовского коэффициента упругоэластичности пород с учетом вертикальной сжимаемости пористой среды и сжимаемости воды и показал его соответствие напорным горизонтам. В СССР динамика подземных вод оформилась как направление гидрогеологии в 1930-х гг., что связывается с работами Г.Н. Каменского по применению положений теории фильтрации к решению гидрогеологических задач. Огромное количество последующих работ по подземной гидродинамике в странах Северной Америки, Европы и в СССР было посвящено усовершенствованию метода Тейса и его приложению к различным ситуациям. Большое значение не только для решения задач практической гидрогеологии, но и для последующего прогресса в понимании гидродинамики слоистых гидрогеологических структур и оценки ресурсов подземных вод в региональном масштабе имели исследования А.Н. Мятиева [Мятиев, 1946, 1947], С.Е. Jacob [Jacob, 1946], Н.К. Гириного [1947], М.С. Hantush, С.Е. Jacob [Hantush, Jacob, 1955], расширившие анализ нестационарного течения на систему этажных водоносных горизонтов, с учетом перетекания через слабопроницаемые слои и взаимодействия с верхним безнапорным горизонтом. В капитальном труде С.К. Абрамова с соавторами [Абрамов и др., 1960] было показано, что на интенсивность вертикального водообмена через слабопроницаемые слои влияют не только параметры этих слоев, но и соотношение коэффициентов фильтрации слабопроницаемых и водоносных слоев, а также общая длина потока.

В 1950-е годы в связи с интенсивным развитием водоснабжения городов подземными водами в СССР вводится понятие «эксплуатационные запасы подземных вод», разрабатывается система их оценки и утверждения, публикуется «Положение о классификации запасов подземных вод». В этот же период выполняются различные методические разработки по проведению полевых работ. В частности, Б.В. Боровским, Б.Г. Самсоновым, Л.С. Язвиным, Д.А. Манукьяном и другими гидрогеологами были разработаны методики проведения опытно-фильтрационных работ для условий нестационарной фильтрации с учетом большого количества фильтрационных схем, не утративших своего



значения до сих пор. Проблему адаптации гидрогеологических расчетов к скважинам успешно решают Н.Н. Веригин и Ф.М. Бочеввер (1961). Опубликованная в 1968 г. монография Ф.М. Бочеввера по расчетам запасов подземных вод [Бочеввер, 1968] стала на долгие годы практически руководством гидрогеологов-разведчиков в СССР. В 1960–1970-е годы под методическим руководством Н.Н. Биндемана, Ф.М. Бочеввера и Л.С. Язвина в СССР впервые осуществляются региональные прогнозные оценки эксплуатационных ресурсов подземных вод. В Украине они выполнялись по основным гидрогеологическим структурам (ответственные исполнители – Э.Э. Соболевский, В.М. Шестопапов, Д.Р. Литвак, Л.С. Крыжановский и др.). В 1976 г. публикуется важная работа по разведке и оценке эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах [Боревский и др., 1976], в значительной мере снявшая остроту проблемы практических работ в этих условиях.

Внедрение в практику инженерно-гидрогеологических работ метода математического моделирования связано с такими учеными, как Н.А. Плотников, И.К. Гавич, Ф.М. Бочеввер, Н.Н. Лапшин, А.М. Орадовская, Л.К. Гохберг, В.М. Шестаков и др. В Украине моделирование внедряли в гидрогеологическую практику И.Е. Жернов, А.Б. Ситников, Д.Р. Литвак, В.Ф. Рыбин, В.М. Шестопапов, Н.С. Огняник, Н.А. Белокопытова и др. Методические основы оценки подтопления селитебных и промышленных территорий и их защиты изложены в ряде работ С.К. Абрамова с соавторами. В 60-70-е годы XX ст. активно развиваются исследования в мелиоративной гидрогеологии. С.Ф. Аверьянов и его ученики разработали методики прогнозирования уровней подземных вод и расчетов дренажей, оценки засоления и рассоления грунтов при их промывке и др. Свой весомый вклад в решение различных вопросов осушительной и увлажнительной мелиорации внесли В.М. Шестаков, Д.М. Кац, А.Я. Олейник, В.С. Усенко, В.А. Барон, И.С. Пашковский и др. В этот же период активно развиваются исследования в области гидрогеологии шахт и карьеров. Научное обеспечение этих работ осуществляли С.К. Абрамов, В.А. Мироненко, Ю.А. Норватов, А.И. Арсеньев, И.Ф. Оксанич, В.М. Шестаков и др.

### **Региональная структура потоков подземных вод**

Основы гидродинамического анализа в региональном масштабе были заложены в работе М.К. Hubbert [Hubbert, 1940], который математически охарактеризовал движение подземных вод в системе, ограниченной водоразделами и непроницаемыми барьерами, под действием движущих и тормозящих сил и энергетического потенциала. Канадский гидрогеолог J. Toth в 1960-х гг. расширил анализ на область гомогенной и изотропной фильтрационной среды, включающую разномасштабные водоразделы и понижения поверхности, показав иерархическую организацию подземных потоков в локальные, промежуточные и региональные системы, контролируемые рельефом и конфигурацией бассейна [Toth, 1962, 1963]. Дальнейшая важная разработка проблемы была выполнена в серии статей R.A. Freeze, P.A. Witherspoon [Freeze, Witherspoon, 1966, 1967, 1968], где представлены теоретический анализ и результаты численного моделирования потоков подземных вод в сложных неоднородных и анизотропных средах. Эти исследования, наряду с упомянутыми в предыдущем разделе работами по гидродинамике наиболее широко распространенных слоистых структур, оказали большое влияние на понимание гидрогеологического единства бассейнов и региональной структуры потоков подземных вод.

Теоретические разработки по наиболее распространенным слоистым гидрогеологическим структурам (Де Гли, А.Н.Мятнев, Н.К.Гирицкий, С.К.Абрамов и др.) противоречили «классическим» представлениям гидрогеологии о пространственной разобщенности областей питания, транзита и разгрузки напорных водоносных горизонтов, их гидравлической изолированности и преобладании латерального движения подземных вод в области транзита артезианских бассейнов [Семихатов, 1954 и др.]. Вместе с тем они находили подтверждение многочисленными исследованиями региональных гидрогеологических систем [Гатальский, 1954; Шагоянц, 1959; Гармонов и др., 1961; Шестопапов, 1968, 1974, 1981; Llamas, Cruces de Abia, 1978; Castany, 1981; Bredehoeft et al., 1982 и др.], которые демонстрировали отчетливое влияние орографии, речных долин разных порядков и вертикальных перетоков через слабопроницаемые слои на структуру подземных потоков в напорных водоносных комплексах бассейнов. К концу XX в.

представления о важнейшей роли вертикальной фильтрации в водообмене и формировании ресурсов и химического состава подземных вод этажных напорных водоносных комплексов в пределах верхних гидродинамических зон получили широкое признание и стали основным трендом в региональной гидрогеологии [Водообмен..., 1989; Toth, 1995, 2009; Всеволожский, 2007].

В период 1978–1995 гг. Геологическая служба США осуществила обширную программу анализа 25 региональных гидрогеологических систем (RASA) [Sun, Johnson, 1994]. Подобные исследовательские программы, включающие разработку региональных численных моделей, сейчас стали инструментом регионального развития и управления и реализуются во многих странах. В последние десятилетия гидрогеологическое моделирование в масштабах речных и гидрогеологических бассейнов рутинно осуществляется посредством хорошо развитых мощных программных средств [Zhou, Li, 2011], однако его адекватность по-прежнему критически зависит от уровня геологической изученности регионов, представительности параметров и адекватности формализации гидрогеологических условий.

### ***Глубинная гидрогеология и гидродинамическая зональность***

На протяжении большей части истории гидрогеологии в ней доминировали исследования водообмена и связанных с ним процессов в приповерхностной части коры, ограниченной глубиной в первые сотни метров, подземные воды которой широко использовались для водоснабжения и прямо влияли на хозяйственную (в том числе горнодобывающую) деятельность. Лишь с середины XX в., сначала под влиянием потребностей разведывания и добычи углеводородов, началась серьезная разработка вопросов гидрогеологии глубоких частей осадочного чехла в нефтегазоносных бассейнах. Эта тенденция резко усилилась к концу XX в. в связи с появлением новых практических нужд: углублением нефтегазодобычи, геологической изоляцией высокорadioактивных и токсичных отходов и CO<sub>2</sub>, ростом использования геотермальных ресурсов и неуглеводородных глубинных флюидов как полезных ископаемых, вовлечением глубоких водоносных комплексов в водоснабжение (что актуализировалось из-за развития и удешевле-

ния технологий опреснения и текущим и прогнозируемым возрастанием вододефицитности во многих регионах). Одновременно, в связи с ростом осознания роли водных флюидов в разнообразных геологических процессах, усиливалась научная мотивация интереса к проблемам глубинной гидрогеологии.

Появление новых данных выявило противоречивость и неадекватность многих традиционных гидрогеологических концепций о происхождении, причинах и характере движения и составе водных флюидов в глубоких частях бассейнов и в целом в верхней коре. Вместе с тем новые данные остаются фрагментарными, в основном косвенными, и в целом – крайне недостаточными для построения хорошо обоснованных моделей. Остро встали проблемы сочетания и синтеза методологий, применяемых к изучению флюидов в разных науках о Земле: гидрогеологии как таковой, геодинамики, геологии нефти и газа, литологии и петрологии, рудной геологии, геохимии и минералогии, а также проблемы масштабирования процессов и явлений во времени и пространстве.

Одним из важных противоречий, относящихся к проблематике предыдущего раздела, является популярное в западной и советской гидрогеологии представление о протяженных (до 1000 км и более) латеральных потоках гравитационных или элизионных гидродинамических систем в глубоких горизонтах бассейнов [Пиннекер и др., 1982; Garven, 1985; Garven et al., 1993, 1999; Ge, Garven, 1992]. Оно основано на сомнительной интерполяции на больших площадях ограниченных разобщенных данных и опытах моделирования с проблемными допущениями, не согласуется с физическими и геологическими ограничениями и не подтверждается данными детальными исследованиями. Допускаемая многими исследователями (Е.А. Басков, Н.Б. Вассоевич, И.К. Зайцев, А.А. Карцев, И.Г. Киссин, В.В. Колодий, Ю.В. Мухин и др.) возможность длительного существования регионально распределенного давления, обусловленного элизионным питанием, опровергается расчетами [Дюнин, 2001; Дюнин, Корзун, 2005], а также выявлением многочисленных каналов дегазации, по которым происходит активный вертикальный флюидообмен [Andersen, 2012; Moss et al., 2012; Шестопапов, Макаренко, 2013, 2014]. По мере детализации опробования в глубоких горизонтах выявляются многочисленные аномалии

барических, термальных и гидрогеохимических параметров флюидов и показателей проницаемости, обычно связанные с зонами сквозьформационных тектонических нарушений. Аномалии в этажных системах часто сопряжены вертикально, демонстрируя важность вертикальных путей транспорта. Незакономерное распределение параметров и наличие разнонаправленных градиентов в глубоких горизонтах многих регионов характеризует пластово-блоковые гидродинамические системы с ячеистой структурой, в которых латеральные связи ограничены, а вертикальные играют большую роль [Всеволожский, Дюнин, 1996; Лукин, 1997; Дюнин, 2000; Коробов, Малюшко, 2002; Дюнин, Корзун, 2005; Шестопалов, 2014; Шестопалов и др., 2018]. Таким образом, условия для существования в глубоких горизонтах протяженных региональных потоков подземных вод, питаемых от «основных областей питания» или элизионных источников, отсутствуют.

Эти вопросы являются аспектами более общей проблемы гидродинамической зональности. Популярная долгое время схемы, основанные на представлениях о прогрессирующем снижении интенсивности водообмена с глубиной (зоны активной и затрудненной циркуляции и застойного режима) [Игнатович, 1950], в последнее время сменяются представлениями о зональности, основанной на учете преобладания в верхней зоне гравитационной гидродинамической системы (со своей иерархией и структурой потоков под влиянием орографо-климатических факторов), а в нижней зоне – блоково-пластовой системы, находящейся под влиянием флюидогеохимических (эндогенных) воздействий [Crossey et al., 2006; Всеволожский, 2007; Хаустов, 2011; Всеволожский, Киреева, 2014; Шестопалов, 2014], с промежуточной зоной между ними, где влияние обеих групп факторов может быть ослабленным [Шестопалов, 2014]. Появляется множество данных, как от практики добычи углеводородов, так и от реконструкций в рудной геологии, литологии и петрологии и геофизических исследований, что динамика процессов в нижней зоне, хотя часто имеет импульсный характер, в целом является намного более высокой, чем считалось ранее, что делает неприемлемой концептуализацию этой зоны как «застойной». Новые представления о гидродинамической зональности верхней коры отражают важный

тренд, сформировавшийся в последние десятилетия – осознание большого влияния на гидродинамику и физико-химические процессы в глубоких частях бассейнов глубинных флюидов, как генерируемых на месте, так и (главным образом) восходящих из средней-нижней коры и мантии (см. следующий раздел). Основываясь на результатах исследований флюидных процессов в мантии и их воздействия на литосферу, в работе [Шестопалов и др., 2018, гл. 8] выдвинута гипотеза об областях глубинного ювенильного питания.

В настоящее время наблюдается парадоксальная ситуация в отношении осмысления роли глубинных флюидов в процессах, происходящих в верхней части коры. С одной стороны, данные литологии и физико-химической петрологии выявили огромную роль глубинной флюидной составляющей в процессах диагенеза, эпигенетических преобразований пород, метаморфизма, метасоматоза, магматизма и рудообразования в широком диапазоне температур и давлений [Григорьев, 1971; Гавриленко, Дерпгольц, 1971; Fyfe et al., 1978; Лукин, 1997, 2014; Shmulovich et al., 1994; Ague, 2003; Cathles, Adams 2005; Киссин, 2009; Yardley, Bodnar, 2014]. Появилось большое число исследований по разным регионам вне областей активного рифтогенеза и вулканизма, демонстрирующих прямые доказательства (соотношения  $^3\text{He}/^4\text{He}$ , изотопный состав  $\text{CO}_2$ ) проникновения мантийных флюидов в водоносные горизонты осадочного чехла и их разгрузки на поверхность [Sherwood-Lollar et al., 1997; Weinlich et al., 1998; Kulongoski et al., 2005, 2011; Newell et al., 2005; Kennedy, van Soest, 2007; Crossey et al., 2009, 2016; Italiano et al., 2013; Karlstrom et al., 2013 и мн. др.]. С другой стороны, многие региональные гидрогеологические модели и модели формирования стратиформных рудных и нефтяных месторождений до сих пор не учитывают не только влияние глубинных флюидов, но и вообще взаимодействие флюидных систем чехла с таковыми фундамента.

В свете упомянутых в начале раздела практических потребностей, а также в силу потенциала интеграции основных геологических дисциплин можно уверенно предположить, что проблематика глубинной гидрогеологии (и шире – флюидогеологии) составит в обозримом будущем одно из наиболее важных направлений гидрогеологической науки.



### **Глубинная дегазация Земли как глобальный процесс ее саморазвития и некоторые гидрогеологические следствия**

В основе новых представлений о глубинной гидрогеологии лежат результаты исследования флюидных процессов в мантии и внешнем ядре, в частности мантийных плюмов, и их ведущей роли в создании и деструкции литосферы и формировании региональных геологических структур [Wilson, 1963; Morgan, 1971; Larson 1991; Летников, 1992; Добрецов, 1997; Летников, Дорогокупец, 2001; Condie, 2001; Ernst, Buchan 2001; Лукин, Пиковский, 2004; Yuen et al., 2007]. Важнейшим аспектом этой проблемы являются процессы глубинной дегазации Земли, значение которых отмечалось в работах В.И. Вернадского. В изучении механизмов, форм и последствий глубинной дегазации Земли ведущую роль играют работы ученых в России и Украине [Чекалюк, 1965; Tolstikhin, 1975; Кропоткин, 1986; Семенов, 1990; Валяев, 1997; Дегазация..., 2002, 2010; Дмитриевский, Валяев, 2002; Пиковский, 2002; Ларин, 2005; Gilat, Vol, 2005, 2012; Маракушев, Маракушев, 2008; Лукин, 2014, 2015; Шестопапов, Макаренко, 2014; Шестопапов и др., 2018].

Обобщение многочисленных геофизических и геологических данных [Шестопапов и др., 2018] указывает на существование в верхней мантии и консолидированной коре сложнопостроенной глобальной дренажной системы дегазации Земли, по которой преимущественно осуществляется транслитосферный теплоперенос, с плюмами в основании, многочисленными вертикальными (глубинные разломы, трубы и магматические колонны) и латеральными (флюидонасыщенные интервалы-волноводы) крупными проводящими элементами и очагами магмообразования в пределах нижней-средней коры. Локализованные импульсные прорывы глубинных флюидов через границу Мох и литосферу, в частности через глобальный флюидоупор на границе хрупкого/пластического состояний пород, определяют возникновение и распространение барических, термальных и геохимических аномалий флюидов в верхней коре [Иванов, 1970; Ежов, Вдовин, 1970; Etheridge et al., 1983; Ежов, Лысенко, 1986, 1988; Bailey, 1990; Fournier, 1991; Ivanov, Ivanov, 1993; Connolly, 1997, 2010; Connolly, Podladchikov, 2013], соответствующее воздействие на глубокие водоносные горизонты чехла и эпигенетическое

преобразование структуры, состава и проницаемости вмещающих пород. В верхней коре, особенно в нижней части чехла, структура дренажной системы глубинной дегазации Земли сгущается и усложняется, включая в себя глубокие водоносные горизонты и разнообразные сквозьформационные флюидопроводящие структуры (типа даек, инжектитов, каналов грязевых вулканов, подзападинных каналов, труб брекчий, каналовых систем гипогенного карста с рифто- и трубообразными элементами), которые в целом картируются современными методами как в континентальной, так и в океанической обстановке.

Изучение взаимодействия глубинной дегазации Земли и восходящего потока глубинных флюидов с породами и подземными водами в верхней части коры составляет важнейшую проблему современных наук о Земле, в разработке которой гидрогеологии, несомненно, будет принадлежать ведущая роль.

### **Численные методы и моделирование**

В современной науке, в том числе в гидрогеологии, существует мощный тренд к количественному анализу и представлениям о том, что достоинства новых идей проверяются численными моделями. С конца 1960-х годов, с появлением компьютерной техники в более широком научном обиходе, численное моделирование гидрогеологических систем на основе методов конечных разностей и конечных элементов стало одним из ведущих подходов к решению научных и практических задач. Последующее резкое увеличение производительности компьютеров позволило усложнять/расширять области моделирования и исследовать различные процессы в их сопряжении и взаимодействии. В гидрогеологических системах стали рассматриваться и моделироваться взаимодействия процессов течения многофазных жидкостей, деформации среды, транспорта тепла и растворенных и взвешенных компонентов, химических реакций в системе «вода – порода».

В результате начиная с конца XX в. наблюдается экспоненциальный рост применения численного моделирования как для теоретических исследований, так и для изучения региональных гидрогеологических систем [Zhou, Li, 2011]. Особую роль в этом сыграла разработка Геологической службой США и доступность программных комплексов линейки MODFLOW с от-



крытым кодом, первый из которых выпущен в 1988 г., а базовой до последнего времени была версия MODFLOW-2005 [Harbaugh, 2005]. В 2017 г. выпущена новейшая версия – MODFLOW 6 [Hughes et al., 2017], способная поддерживать множественные модели различных типов, как независимо, так и во взаимодействии. Начиная с версии 2005, MODFLOW включает модуль, обеспечивающий возможность построения гибридных дискретно-сплошных моделей для симуляции процессов в средах с многоуровневой емкостью (порово-трещинно-карстовых) [Shoemaker et al., 2007]. Большую роль в широком применении регионального и локально-объектного моделирования, в том числе для задач мониторинга и управления, играет интеграция программ гидрогеологического моделирования со стандартными геоинформационными системами.

Хотя осознание ограниченности возможностей моделирования всегда присутствовало среди серьезных исследователей, бурный прогресс в развитии технических средств и численных методов, давление «моды» и ожиданий стейкхолдеров и грантодателей, вызвали на рубеже столетий во многом завышенные ожидания в отношении эффективности регионального и локально-объектного моделирования. Важнейшими ограничениями, особенно в отношении прогнозного моделирования, по-прежнему остаются проблемы: 1) масштабирования основных параметров, особенно проницаемости; 2) неоднородности среды и неопределенности параметров; 3) ошибочности или несовершенства концептуальных основ моделей. При масштабировании лабораторных или локальных значений проницаемости на большие неоднородные участки геологической среды возрастает проблематичность аппроксимаций. Проблема неоднородности среды (геологической неоднородности) остается, в условиях принципиальной ограниченности возможностей ее адекватной характеристики, ключевой проблемой гидрогеологии [Шестаков, 2003] и неустранимой проблемой гидрогеологического моделирования [Freeze, 1975], обуславливающей неопределенность используемых в моделях параметров. Ожидания 1980-1990-х гг., связанные с применением стохастического подхода к решению проблемы неоднородности, оказались неоправданными [Dagan, 2002]. Наконец, проблема адекватности концептуальных основ моделей всегда будет

зависеть от продвинутого теоретического знания гидрогеологии, применяемого в данной модели, и от уровня региональной изученности. По оценке J.D. Bredehoeft [Bredehoeft, 2005], 20–30% гидрогеологических моделей оказываются неадекватными, поскольку включают «сюприз» – выявление новыми данными необходимости отказа от первоначально принятой концептуальной основы и ее полного пересмотра (смены парадигмы).

Обозначенные выше риски получения неверных результатов при моделировании могут снижаться последовательным уточнением и совершенствованием моделей. *«Модель, имитирующая водоносный горизонт, является не чем иным, как приближенным подобием сложных природных условий. Всегда остается возможность для совершенствования этой аппроксимации. Следовательно, модель надо рассматривать как динамическое подобие природной системы, подлежащее дальнейшему уточнению и усовершенствованию. По мере поступления новой информации предшествующие прогнозы могут и должны модифицироваться. Обратная связь натурных исследований с предварительными моделями не только помогает исследователю установить более обоснованные приоритеты в системе сбора данных, но и позволяет осуществить проверку гипотез, касающихся ведущих процессов, и тем самым разработать усовершенствованную модель системы и решить стоящие задачи»* [Konikow, Patten, 1985, p. 24 ] (перевод наш. – Авт.). Именно поэтому при решении многих практических задач весьма важным приемом для существенного повышения достоверности, адекватности и прогностической надежности гидрогеологических моделей является переход от разовых решений к мониторинговым, или к так называемым постоянно действующим моделям [Гавич и др., 2002]. Мониторинг в данном случае может включать как показатели наблюдений, отражающие состояние (изменение) системы во времени, так и дополнительные данные по граничным условиям, распределениям параметров, процессам, уточняющим или изменяющим концепцию модели в стационарной или нестационарной постановке.

Многочисленные сложности моделирования процессов массопереноса (в том числе в дискретной и, в частности, в «канальной» среде) рассмотрены в трехтомной капитальной монографии

В.А. Мироненко и В.Г. Румынина [Мироненко, Румынин 1998, 1999, 2002], где намечен ряд методических новаций. Тем не менее многие трудности еще ждут своего разрешения. Гидрогеологическое моделирование, как и любое значимое целевое гидрогеологическое исследование, должно опираться на ряд принципов. Отметим наиболее важные принципы: последовательных приближений; стадийности, а не одноактности решений; неравномерного изучения и детализации исследований на опорных участках; аналогии (подобия), предусматривающие максимальное использование результатов и подходов, полученных на объектах-аналогах; обратной связи – взаимной корректировки по мере накопления новых данных; комплексирования исследований разными методами, позволяющими существенно повысить достоверность получаемых результатов исследований (Б.В. Боровский, В.М. Шестопапов в [Водообмен..., 1989]). Не менее важным является также уровень квалификации, опыт и интуиция исследователя, создающего и анализирующего модель и полученные на ней результаты.

Методы моделирования будут, несомненно, по-прежнему увеличивать свое значение – и как мощный инструмент исследования сложных систем путем проигрывания различных сценариев и тестирования альтернативных гипотез, и вследствие этого, как инструмент прогнозирования. Представляется перспективным применение алгоритмов и методик оценки неопределенностей моделей с целью последующего целевого планирования прироста информации и получения эффективных параметров на последующих этапах моделирования [Hill et al., 2000; Beven, 2005; Feyen, Caers, 2006; Ch, Mathur, 2010; Gororhovski, 2012 и др.].

### **Многоуровневая (дискретная) среда**

Теоретические основы гидродинамики долгое время разрабатывались преимущественно применительно к сплошной поровой среде, процессы течения в которой хорошо поддаются математическому описанию и анализу. Соответственно, для такой среды прикладные гидрогеологические задачи (ресурсные, эксплуатационные, миграционные и пр.) имеют хорошо разработанные решения. Теория и практика гидрогеологии трещиноватых и, особенно, закарстованных скальных пород были и остаются в числе наиболее проблемных разделов гидрогеологии.

Присутствие в горнопородном массиве так называемых каналов (крупных трещин с раскрытостью свыше 10 мм и карстовых каналов) с линейными размерами в сотни метров и километры доводит до крайности фильтрационную неоднородность, обуславливает аномальную концентрацию подземного стока и кардинально изменяет структуру и динамику водообмена. Хотя доля каналовой пустотности остается в большинстве случаев незначительной в общей емкости коллекторов (от 0,05 до 2,8%), структуры каналовой проницаемости обеспечивают от 94 до 99,7% подземного стока [Worthington et al., 2000].

Важнейшее значение для рассмотрения нестационарной фильтрации в неоднородной среде имел подход, предложенный G.I. Varenblatt et al. [Varenblatt et al., 1960] в виде концепции «двойной пористости» для трещиновато-пористых пород (известной также как «модель гетерогенно-блоковой среды»). Трещиноватая порода рассматривается в виде двух емкостей разных порядков, вложенных одна в другую. Движение подземных вод в этих средах рассматривается отдельно, с учетом водообмена между ними. При распространении этой концепции на трещиноватые породы [Прогноз..., 1972; Боровский и др., 1976] в качестве емкости второго порядка обычно принимается фоновая трещиноватость, а в качестве емкости первого порядка – карстовые каналы. К концу XX в. стало очевидно, что закарстованные породы должны рассматриваться как среды с многоуровневой емкостью (по меньшей мере тройной: поровой, фоновой трещиноватости, каналов). Решения теоретических и практических задач в такой постановке сложны, и в большинстве имеющихся моделей рассматривается двухуровневая неоднородность.

Центральной проблемой гидрогеологии карста (а карст является наиболее ярким выражением гетерогенных гидрогеологических систем и представительным «полигоном» для их исследования) остается несоответствие распределения каналов критериям сплошной среды – оно обычно не является равномерным или хаотическим, а отражает сложную организацию в силу закономерностей саморазвития карстовых каналовых систем (спелеогенеза). Поскольку линейные размеры таких систем могут измеряться сотнями метров и километрами, для адекватного решения большинства средне- и крупномасштабных задач необходимы их индивидуальные характеристики,

получаемые прямым спелеологическим исследованием или геофизическим картированием (что редко достижимо), мощными специально организованными кустовыми откачками (что требует больших затрат), либо выводимые на основе знания закономерностей их развития, локализации и геометрии, что пока достигнутым уровнем этого знания, как правило, не обеспечивается.

### ***Динамическая природа проницаемости***

Проницаемость пород, основной параметр в гидрогеологических исследованиях, изменчива в масштабах времени длительных геологических процессов (седиментогенеза, диагенеза и эпигенеза, тектогенеза и др.), однако в большинстве гидрогеологических задач она принимается статическим или, по крайней мере, консервативным свойством фильтрационной среды. Такое допущение, приемлемое для краткосрочных оценок и прогнозов гидрогеологических процессов в относительно инертных породах, оказывается неправомерным в задачах, включающих временные масштабы порядка 100-1000 лет и/или радикальные изменения гидродинамических и гидрохимических условий под воздействием энергичных геодинамических процессов или деятельности человека. Оно также неприемлемо в ретроспективных и прогностических моделях региональной флюидодинамики, поскольку флюидообмен и взаимодействия в системе «флюид – порода» являются важными факторами преобразования структуры проницаемости. Динамические изменения проницаемости проявляются в средах, характеризующихся высокими напряжениями и/или сильной химической или термальной неравновесностью [Ingebritsen, Gleeson, 2017].

Ярким примером динамического изменения проницаемости является карст, приводящий к самоорганизации структуры проницаемости, изменению структуры и динамики водообмена, резкому возрастанию неоднородности свойств горнопородного пространства, аномальной концентрации подземного стока и развития деформаций пород [Климчук, 2011, 2013]. Работы по численному моделированию карстообразования последних десятилетий показали, что формирование структур высокой (каналовой) проницаемости во временных масштабах сроков жизни крупных сооружений возможно не только в наиболее легкорастворимых породах (гипсы, соли), а и в карбонатных породах [Dreybrodt et al.,

2005]. Также выявлено, что карстовые структуры каналовой проницаемости, способные сильно влиять на гидродинамическое поле, могут формироваться и в силикатных породах [Worthington et al., 2016; Wray, Sauro, 2017]. Бурное развитие в последние десятилетия теории гипогенного карстообразования [Климчук, 2017; Klimchouk, 2017] и региональных исследований гипогенного карста [Klimchouk et al., 2017] показали потенциал развития каналовых структур в том числе на больших глубинах, где в жестких термобарических условиях флюиды могут быть высокоагрессивными по отношению к широкому спектру пород, а динамика процессов может быть весьма высокой (хотя и пульсационной).

Другим распространенным процессом динамического изменения проницаемости пород является естественное гидравлическое трещинообразование вследствие избыточного флюидного давления – механизм, выявленный в 60-х годах XX в. и детально изученный впоследствии [Phillips, 1972; Engelder, Lacazette, 1990]. Возникновение и разгрузка через естественный гидроразрыв аномально высоких флюидных давлений перманентно происходят в ходе эволюции осадочных бассейнов вследствие выжимания седиментогенных вод, глубинной дегазации, термокаталитического газовыделения и дегидратации пород [Fall et al., 2017 и др.]. Динамика изменения проницаемости осадочных толщ большинством этих процессов изучена слабо и редко учитывается в палеогидрогеологических построениях.

Она, однако, осознана и активно изучается в петрологии, рудной геологии и геохимии, где проницаемость нижней-средней тектонически активной коры рассматривается как динамическая переменная, изменяющаяся под влиянием метаморфической и магматической деволатизации [Rojstaczer et al., 2008]. Средствами этих дисциплин выявляются множественные фазы создания и деструкции проницаемости, в том числе в течение геологически коротких промежутков времени [Ingebritsen, Gleeson, 2017]. Весьма динамичным фактором генерирования естественного гидроразрыва являются пульсационные прорывы глубинных флюидов через слабопроницаемые интервалы нижней-средней коры (см. раздел по глубинной гидрогеологии), генерирующих высокопроницаемые структуры, что хорошо изучено на моделях, исследующих процессы деволатизации при прогрессивном



метаморфизме [Connolly, 1997, 2010; Connolly, Podladchikov, 2013]. Проницаемость может увеличиваться до 20 раз под влиянием землетрясений [Wang, Manga 2010; Manga et al., 2012], хотя эти изменения обратимы в течение промежутков времени от месяцев до десятилетий. Также установлено, что динамические напряжения могут мгновенно изменять проницаемость в региональном масштабе [Rojstaczer et al., 1995].

### **Гидрофации и пути преимущественной фильтрации**

Важным продвижением в изучении роли в гидрогеологических процессах различных типов геологической неоднородности явилась концепция гидрофаций, предложенная в конце XX в. [Poeter, Gaylord, 1990] в развитие представлений о региональных гидростратиграфических подразделениях [Махев, 1964]. Гидрофации в пределах литологически относительно однородной геологической формации определяются наличием зон повышенной латеральной гидравлической связности, обусловленных седиментационными причинами или особенностями трещинообразования в слоистых толщах. Такие зоны характеризуются повышенной проницаемостью и сильно влияют на гидродинамическое поле. Идентификация гидрофаций для использования (детерминистически) в моделях водообмена и транспорта осуществляется, помимо прямых гидродинамических исследований, на основе геологических методов [Fraser, Davis, 1998], в частности фациального анализа [Anderson, 1989; Webb, Anderson, 1996], анализа механо- и трещинной стратиграфии [Laubach et al., 2012], а также гидрохимических исследований. Стохастический подход к проблеме ожидаемой эффективности не проявил [Anderson, 1997].

В карбонатных толщах одной из причин обособления гидрофаций является формирование стратиграфически контролируемых горизонтов повышенной закарстованности, определяемое седиментогенно-диагенетически обусловленными геохимическими особенностями отдельных прослоев и поверхностей напластования (концепция «горизонтов зарождения» (insertion horizons) в карстологии) [Lowe, 1992] или особенностями трещинной стратиграфии.

В отношении субвертикальных (сквозьформационных) геологических неоднородностей, помимо давно осознанного значения крупных разломов, проводящих или барражирующих

подземный сток, выявлена важная флюидопроводящая роль кластеров сквозных трещин в различных интервалах слоистых толщ, совокупно (и во взаимодействии с латеральными высокопроницаемыми элементами) образующих «коридоры», или зоны высокой вертикальной проницаемости через многослойные толщи [Gross, Eyal, 2007; Singh et al., 2008; Bush, 2010; Questiaux et al., 2010]. В таких зонах, используемых вертикальным водообменом и вовлеченных в дренажную систему глобальной дегазации [Шестоपालов и др., 2018], происходят вещественная трансформация и дальнейшее изменение фильтрационных свойств пород и отложений, в том числе в отдельных и покровных слабоконсолидированных толщах, с усилением водо- и массообменной функции этих зон. Исследованиями последних десятилетий, в том числе выполненными в ИГН НАН Украины по подзападинным каналам и гипогенным карстовым системам [Водообмен..., 2001; Шестоपालов и др., 2007; Shestopalov et al., 2015; Климчук, 2013], раскрывается их особая роль в водообмене, формировании ресурсов подземных вод и понижении их защищенности, миграционных процессах, эволюции бассейнов и формировании месторождений углеводородов [Лукин, 2004; Andersen, 2012].

Исследование природы и гидрогеологической роли латеральных и сквозьформационных путей преимущественной фильтрации является ключевым в решении проблемы неоднородности и составляет одну из важных областей междисциплинарных исследований, теснейшим образом связывающих гидрогеологию с другими основными науками геологического цикла.

### **Гидрогеохимия**

За немногими исключениями (важнейшими из которых были труды В.И. Вернадского в 1930-е годы, заложившие основы гидрогеохимии), исследования химии подземных вод долгое время оставались в рамках определения и описания характеристик, связанных с их потреблением в питьевых и хозяйственных целях. Однако накопление данных о химическом составе подземных вод сопровождалось их систематизацией и попытками выявить закономерности формирования и распространения вод различного состава. В первой трети XX в. важные работы по интерпретации химического состава подземных вод в аспектах его формирования и эволюции были выполнены в США [Palmer, 1911; Rogers, 1917;

Renick, 1924, и др.]. В 1944 г., в ответ на потребность в систематике, классификации и визуализации данных, анализа источников растворенных веществ и эволюции химического состава вод, была разработана удобная тройная диаграмма [Piper, 1944], широко используемая до настоящего времени. В западных странах формирование гидрогеохимии как научного направления относят к 1940-м гг. [Back, Freeze, 1983; Narasimhan, 2005], что в целом совпадает с периодизацией ее истории в СССР. В 1960-х гг. появились важные исследования бассейновых рассолов [White, 1965] и поровых вод слабопроницаемых формаций [Berry, Hanshaw, 1960], которыми выявлена роль последних как мембран с избирательной гидрогеохимической проницаемостью, введено понятие гидрохимических фаций [Back, 1960].

В СССР в 1930-е годы были разработаны учения о минеральных водах (Н.Н. Славянов, Н.И. Толстихин, А.М. Овчинников, А.И. Дзенс-Литовский и др.), о зональности грунтовых вод (В.С. Ильин, Ф.П. Саваренский, Г.Н. Каменский и др.), о вертикальной гидрогеохимической зональности (Ф.А. Макаренко, Н.К. Игнатович, А.И. Силин-Бекчурин и др.). С 1940-х гг. усиливается внимание к проблемам формирования химического состава подземных вод и их генезиса, поставленным В.И. Вернадским в «Истории природных вод» (Г.Н. Каменский, Н.К. Игнатович, К.И. Маков, А.Н. Бунеев, М.С. Гуревич, Н.И. Толстихин и др.). В 1950-х гг. в связи с развитием региональных гидрогеологических исследований усиливается региональное направление в гидрогеохимии (И.К. Зайцев, Н.И. Толстихин, А.Е. Бабинец, М.С. Гуревич, Е.А. Басков, Н.В. Роговская и др.).

Начиная с 1960-х гг. гидрогеохимические исследования были революционизированы работами R.M. Garrels [Garrels, 1960; Garrels, Christ, 1965], которыми внедрялись *Eh*-рН диаграммы и методы расчета термодинамических равновесий в системе «вода – порода». Этот подход получил интенсивное развитие в изучении равновесий различных систем в разных *Eh*-рН условиях, эволюции химического состава вод и форм водной миграции элементов и соединений [Stumm, Morgan, 1970; Hem, 1985], а также в разработке теории массопереноса. Выражение взаимодействия в системе дифференциальных уравнений в частных производных [Helgeson, 1968] открыло большие возможности

для численного моделирования гидрогеохимических процессов. Начиная с программы WATEQ и ее модификаций [Truesdell, Jones, 1974; Plummer et al., 1976], появился широкий спектр программ, позволяющих рассчитывать равновесные состояния и перенос элементов между твердыми фазами, газами и водными растворами и спецификацию ионов в последних: SOLMNEQ [Kharaka, Barnes, 1973], BALANCE [Parkhurst et al., 1982], NETPATH [Plummer et al., 1994; El-Kadi et al., 2011]. Позднее, на основе WATEQ была разработана программа PHREEQ и ее производные PHREEQC и PHAST [Parkhurst et al., 1980, 2010; Parkhurst, Appelo, 1999], объединившие анализ баланса масс, химических равновесий и изотопной эволюции. Эти и подобные программы сейчас включают огромное разнообразие геохимических ситуаций, позволяют характеризовать эволюцию системы «флюид – порода» с учетом всех основных процессов и эффектов, стали важнейшими инструментами гидрогеохимических исследований и хорошо описаны в специализированных пособиях.

Также начиная с 1960-х гг., в связи с развитием высокоточной масс-спектрометрии, обширное применение получили методы изотопной гидрогеохимии. Работы Н. Craig [Craig, 1961] по изотопам кислорода и водорода природных вод стимулировали их широкое использование для стратификации подземных вод, решения вопросов источников их питания (генезиса) и транзита и палеогидрогеологических реконструкций. Тогда же начато использование углерода-14 для оценки скорости движения и возраста подземных вод [Hanshaw et al., 1965], а позднее и для независимых оценок средних региональных значений проницаемости [Hanshaw, Back, 1974]. Широкое применение получили также радиоактивные изотопы урана, тория и их рядов [Чердынцев, 1969; Ферронский и др., 1975; Ivanovich, Harmon, 1992; Гудзенко, Дубинчук, 1987]. В 1985 г. опубликована фундаментальная работа S.N. Davis с соавторами по изотопным и другим методам трассирования [Davis et al., 1985], а чуть позднее – книга по использованию этих методов для выбора мест захоронения радиоактивных отходов [Davis, Murphy, 1987]. Изотопия гелия, других благородных газов и углерода  $CO_2$  используется для индикации глубинных флюидов [Якуцени, 1968; Tolstikhin, 1975; Мамырин, Толстихин, 1981; Ballentine et al., 2002;

Kulongoski, Hilton, 2011]. Важные обобщения по использованию изотопных методов для оценки времени нахождения подземных вод в гидрогеологических системах выполнены Ф.М. Phillips [Phillips, 1998], а недавно – I. Cartwright с соавторами [Cartwright et al., 2017]. В последние десятилетия для определения возраста подземных вод широко используются соединения хлорфлюорокарбона [Busenberg, Plummer, 1992].

Сегодня С.Л. Шварцевым и другими исследователями развивается перспективный подход к рассмотрению проблематики гидрогеохимии через призму геологической эволюции и процессов самоорганизации в системе «вода – порода» [Геологическая..., 2005; Шварцев и др., 2007], теоретической основой которого, помимо базовых положений В.И. Вернадского в этой области, являются теория неравновесной термодинамики (необратимых процессов и диссипативных структур) и учение о самоорганизации (синергетика) [Пригожин, 1960; Пригожин, Стенгерс, 1986; Хакен, 1980].

### **Гидрогеология загрязнений**

Гидрогеология загрязнений возникла в 1960-х и оформилась как направление в 1970-1980-х гг. в связи с исследованиями по выбору мест захоронения радиоактивных отходов и общественным осознанием проблемы загрязнений подземных вод [Winograd, 1981; Anderson, Sieger, 2013]. С драматическим возрастанием антропогенной нагрузки на среду растет разнообразие и опасность загрязнений, связанных с горнодобывающей, сельскохозяйственной и промышленной деятельностью, утечками из хранилищ токсических отходов, бытовых свалок, септических систем, топливных хранилищ и пр. Многие загрязняющие соединения являются токсичными и канцерогенными при низких концентрациях. Число актуальных и потенциальных загрязнителей постоянно возрастает, а знания о физических и химических аспектах транспорта загрязнителей подземными водами были и во многом остаются недостаточными.

Важнейшие достижения в изучении гидрогеологии загрязнений связаны с междисциплинарными экспериментальными исследованиями в местах концентрации промышленных и бытовых отходов и на специальных полигонах в США, Канаде, Германии и других странах [Anderson, McCray, 2011], в частности на авиабазе Борден

в Онтарио [Cherry, 1983; Sudicky, Illman, 2011], авиабазе Колумбус в Миссисипи (эксперимент MADE) [Boggs et al., 1992; Rehfeldt et al., 1992; Adams, Gelhar, 1992; Zheng et al., 2011], мысе Год в Массачусетсе (экспериментальный полигон Геолслужбы США – см. публикации на <https://toxics.usgs.gov/bib/bib-cape-cod.html>), полигоне Хоркхеймер в Германии [Butler et al., 2007; Herold et al., 2011; Zlotnik et al., 2001]. Использование новейшего и специально сконструированного мониторингового оборудования на таких полигонах позволило получить детальную трехмерную картину распространения плумов загрязнений и новые представления о физических, химических и биологических процессах, контролирующих миграцию растворов. Эти исследования показали важнейшую роль геологических неоднородностей, в частности путей преимущественной фильтрации [Zheng et al., 2011], в контроле транспорта загрязнений. При том, что общее направление миграции контролируется региональными и локальными напорными градиентами, неоднородности обуславливают макродисперсию и адвекцию по путям преимущественной фильтрации, серьезно влияют на химические реакции, состояние бактерий и эффективность реабилитации [Smith, Schwartz, 1981; Anderson, Sieger, 2013]. Аналогичные результаты были получены в ходе исследований в Украине, в частности в связи с изучением защищенности и уязвимости подземных вод в связи с последствиями Чернобыльской аварии [Водообмен..., 2001; Шестопалов и др., 2007; Shestopalov et al., 2015].

Одной из основных теоретических проблем была и остается применимость модели адвекции-дисперсии к решению задач по миграции загрязнений в подземных водах [Anderson, 1983; Anderson, Sieger, 2013], особенно в гетерогенных средах. Были исследованы различные подходы к преодолению имеющихся ограничений и повышению адекватности прогнозных решений [Anderson, Sieger, 2013]. Тогда как расчетные трудности в той или иной мере снижаются или преодолеваются предложенными подходами, необходимость исчерпывающего учета в моделях транспорта загрязнений основных неоднородностей остается неустранимым требованием и основной проблемой [Smith, Schwartz, 1981; de Marsily et al., 2005; Zheng et al., 2011], (см. также предыдущие разделы).



Основы современной гидрогеохимии загрязнений, позволяющие описывать транспорт многокомпонентных реакционноспособных растворов с учетом химических равновесий и физики транспорта, были заложены в работе J. Rubin, R.V. James [Rubin, James, 1973]. Этот подход был впоследствии реализован в сложных моделях-программах TOUGH [Pruess, 2004] и MT3DMS [Zheng, Wang, 1999]. Была показана эффективность изотопных и других индикаторных методов для трассирования загрязнений и измерения дисперсии [Baedecker, Back 1979; Egboka et al., 1983]. Важное значение имеют исследования взаимодействия органических и неорганических компонентов с участием микробов [Baedecker et al., 1993; Essaid et al., 2011], транспорта и взаимодействия (включая роль в распространении органических и неорганических соединений) коллоидов в гранулярных и трещинных коллекторах [Wan, Wilson, 1994; Ibaraki, Sudicky, 1995], миграция легких и плотных неводных жидкостей [Pankow, Cherry, 1996]. Важными работами по миграции загрязнений являются капитальный труд В.А. Мироненко и В.Г. Румынина [Мироненко, Румынин 1998, 1999, 2002], а также исследования В.М. Шестакова, Ф.М. Бочевера, А.Е. Орадовской, А.А. Рошала, Е.Л. Минкина, В.М. Гольдберга, И.С. Пашковского и др.

С учетом дальнейшего усиления и диверсификации антропогенной нагрузки, исследования в области гидрогеологии загрязнений будут оставаться одним из важнейших направлений гидрогеологии, в частности ее раздела, выделяемого как экогидрогеология [Мироненко, Румынин, 1999].

### **Экогидрогеология**

Проблематика взаимодействия человека с подземными водами через их использование, горнодобывающую, сельскохозяйственную, промышленную и прочие виды деятельности, в частности проблематика защиты их от загрязнений [Роговская, 1976; Гольдберг, 1987; Foster, 1987; Vrba, Zaporozec, 1994; Zwahlen, 2004; Мироненко, Румынин, 1999; Шестопалов и др., 2007], хотя и входит в сферу внимания экогидрогеологии, но далеко не исчерпывает ее предметную область, как это иногда представляется в отечественных и российских источниках. Предметом экогидрогеологии (за рубежом в основном гидрогеоэкологии), как он обычно понимается в международной литературе, есть

изучение связей и взаимодействий между подземными водами и экосистемами, в частности экосистемами, которые прямо зависят от подземных вод (groundwater-dependent ecosystems – GDE). Основными среди них являются водные экосистемы – собственно подземных вод (особенно развитых в карстовых регионах), озер, рек и болот (включая их рипарианские и гипорейные зоны), а также особые морские экосистемы, существующие в местах субмаринной разгрузки пресных вод и глубинных флюидов (гидротермальных систем). Сюда также включаются микробные сообщества в пределах плюмов загрязнений в водоносных горизонтах [Hancock et al., 2009]. Основным фокусом экогидрогеологических исследований является взаимодействие поверхностных и подземных вод. В 1992 г. была проведена Первая международная конференция по гидрогеоэкологии [Stanford, Simons, 1992], впоследствии опубликован ряд монографий и учебников [Gibert et al., 1994; Мироненко, Румынин, 1999; Белоусова и др., 2006], а также тематических коллекций статей [Hancock et al., 2009]. Во многих странах введены существенные ограничения на использование подземных вод в свете экологических последствий понижения уровня грунтовых вод, в частности, включающих: снижение дебита или исчезновение источников; снижение почвенной влажности ниже уровня выживания влаголюбивой растительности; изменения микроклимата вследствие снижения эвапотранспирации; уменьшение поверхностного стока. Детальные количественные исследования этих последствий еще редки и недостаточны. Наряду с этим, в Украине выполнены исследования, свидетельствующие о существенном потенцировании негативного воздействия радиоактивного цезия на здоровье детей и соответственно на состояние биоты в увлажненных полесских ландшафтах с минимальной мощностью зоны аэрации, загрязненных чернобыльскими радионуклидами [Шестопалов и др., 2015; Burlakova et al., 2016].

Несомненно, что с учетом возрастания экологической озабоченности современной цивилизации и остроты соответствующих проблем, а также в свете тенденции к рассмотрению поверхностных и подземных вод как единого ресурса [Winter et al., 1998], значение экогидрогеологии как междисциплинарного направления исследований будет возрастать.

## О ПЕРСПЕКТИВАХ И ТРЕНДАХ ГИДРОГЕОЛОГИИ В БУДУЩЕМ

### Геологическая роль воды: гидрогеология как интегральная область наук о Земле

Как отметил С.Л. Шварцев [Шварцев, 2007], представление о геологической деятельности воды было заложено еще Ж.Б. Ламарком, который в своей «Гидрогеологии» (1802) включал в нее любые процессы разрушения и формирования различных типов горных пород посредством воды. Однако понимание гидрогеологии «как науки о роли воды в становлении окружающего нас геологического мира» [Шварцев, 2007, с. 132] не получило дальнейшего развития на ранних этапах становления этой области знания, которая долгое время рассматривалась только как наука о подземных водах или (в некоторых западных странах) как часть гидрологии, изучающая подземную ветвь климатического водного цикла. Лишь в 1930-х гг. фундаментальная «История природных вод» В.И. Вернадского не только вернула гидрогеологии ее геологическую (в широком значении) сущность, но и, определив огромную роль воды в строении и истории развития Земли, обосновала важную роль гидрогеологии в науках о Земле: «Нет природного тела, которое могло бы сравниться с ней [водой] по влиянию на ход основных, самых грандиозных, геологических процессов. Нет земного вещества – минерала, горной породы, живого тела, которое бы её не заключало. Все земное вещество ... ею проникнуто и охвачено» [История..., 2012, с. 47].

Хотя и до, и после выхода «Истории природных вод» многие ученые отмечали геологическую роль подземных вод и исследовали различные ее аспекты, лишь к последней четверти XX в. гидрогеология начала реализовывать все многообразие и глубину идей выдающегося труда В.И. Вернадского, превращаться в науку о геологических процессах, происходящих с участием водных флюидов, серьезно влияя на другие основные науки о Земле.

Из ранних примеров следует упомянуть публикации 1920-х гг. К. Terzaghi [Terzaghi, 1923], выявившие механизм деформации упругих насыщенных жидкостью пористых сред и послужившие впоследствии основой для объяснения оползневых процессов, землетрясений и формирования складчато-надвиговых структур. М.К. Hubbert, W. Rubey [Hubbert, Rubey, 1959] описали механизм надвиговых деформаций

с учетом флюидного давления, в 1976 г. подтвержденный экспериментами Геологической службы США по контролируемому нагнетанию флюидов на нефтяном месторождении в Колорадо [Raleigh et al., 1976]. D.M. Evans [Evans, 1966] была выявлена сильная корреляция между нагнетанием воды в глубокие горизонты и землетрясениями в Скалистых горах (Колорадо, США). Эти работы имели важное значение для современного понимания проблемы наведенной сейсмичности при сооружении крупных водохранилищ и нагнетании флюидов в пласты [Hsieh, Bredehoeft, 1981], например при геологической изоляции CO<sub>2</sub>. Еще в 1920–1930-х гг. была выявлена роль массивного отбора флюидов (подземных вод и нефти) в формировании обширных просадок поверхности [Rappleye, 1933; Meinzer, 1937], впоследствии проявившаяся во многих регионах. Широко исследуется проблема гидрогеологических предвестников землетрясений [Cooper et al., 1965; Roeloffs, 1988; Киссин, 2009], а также роль подземных вод в развитии других опасных геологических процессов.

Начиная с 1970-х годов появляются важные работы, в которых освещены разработки аналитических моделей распределения порового давления флюидов в седиментационных бассейнах с учетом флюидного тепломассопереноса и уплотнения осадков [Sharp, Domenico, 1976; Bethke, 1989; Bethke et al., 1988], исследовавшие роль подземных вод и флюидообмена в эволюции осадочных бассейнов и процессах литогенеза [Back, Freeze, 1983; Konikow, 1985; Sanford, Wood, 1991; Bjørlykke, 1993; Galloway, Hobday, 1996; Kyser, Hiatt, 2003; Warren, 2006; Беленицкая, 2011; Лукин, 2014], в формировании седиментогенных месторождений ряда металлов [Garven et al., 1993, 1999; Hobday, Galloway, 1999] и месторождений углеводородов [Toth, 1988; Лукин, 2015], в тектонических [Rojstaczer, Bredehoeft, 1988; Ge, Garven, 1992; Person, Garven, 1994; López, Smith, 1995] и метаморфических [Gerdes et al., 1998; Yardley, Bodnar, 2014] процессах. В конце XX – начале XXI вв. кардинальные изменения и большой прогресс достигнуты в изучении карстообразования – процесса, наиболее ярко отражающего геологическую роль подземных вод и флюидообмена в трансформации горных пород, как в приповерхностных условиях, так и в глубинных, в том числе в океаническом дне [Ford, Williams, 1989; Klimchouk et al., 2000; 2017; Worthington, Ford, 2009; Климчук, 2010,

2011, 2017]. Разносторонне были исследованы гидротермальные системы в континентальной и океанической обстановках [Norton, 1984; Kühn, 2004], играющие большую роль в преобразовании литосферы и формировании месторождений полезных ископаемых [Ingerbitsen, Appold 2012]. Выполнена оценка проницаемости в масштабах коры для различных геодинамических условий [Ingebritsen, Manning, 2003, 2010]. Появился ряд крупных обобщающих работ, в которых рассмотрены флюидообмен и его геологические следствия в масштабах коры [Григорьев, 1971; Гавриленко, Дерпгольц, 1971; Fyfe et al., 1978; Shmulovich et al., 1994; Ague, 2003; Cathles, Adams 2005; Киссин, 2009; Yardley, Bodnar, 2014]. В 1998 г. вышла этапная фундаментальная монография S. Ingebritsen, W. Sanford, C. Neuzil «Подземные воды в геологических процессах», получившая второе издание в 2006 г. [Ingebritsen et al., 2006].

Содержание предыдущих разделов этой статьи показывает, что во второй половине XX в. гидрогеология начала интегрировать в себя смежные разделы других основных наук геологического цикла. Приведенное тут перечисление, хотя и далеко не полное, отчетливо демонстрирует, что в последней четверти прошлого столетия гидрогеология стала оказывать большое влияние на другие геологические науки, которое явно возрастает в настоящее время. В силу особого положения воды в истории нашей планеты (постулат В.И. Вернадского), «сквозного» характера гидросферы по отношению к другим земным сферам и тесного взаимодействия с ними, предметная область гидрогеологии стала чрезвычайно разнообразной, включающей сильные междисциплинарные связи и пограничные дисциплины. Учитывая еще и «базовое» положение подземной гидросферы в глобальном цикле воды, вероятно, следует согласиться с суждениями некоторых гидрогеологов о том, что гидрогеология имеет потенциал для занятия в обозримом будущем одной из ведущих позиций в науках о Земле, способствуя интеграции геологического знания [Narasimhan, 2006; Шварцев, 2007; Galloway, 2010].

### Перспективные направления

Обсуждение будущих направлений в развитии гидрогеологии существенно осложняется огромной социальной и экономической значимостью подземных вод (их ролью как одного из критически

важных ресурсов) в условиях существующих глобальных вызовов и неопределенности цивилизационных трендов. Поэтому оно не может ограничиваться рассмотрением лишь научных аспектов, собственной идентичности гидрогеологии и «внутренних» трендов ее развития. Будущее гидрогеологии зависит от выбора путей развития цивилизации в условиях уже очевидной ограниченности ресурсов и опасных масштабов антропогенного воздействия на динамические системы Земли для продолжения экстенсивного развития. Несмотря на серьезные научные и технические препятствия на пути к достижению устойчивости в развитии человечества, определять, достижима ли эта устойчивость, будут культурные, социально-экономические и политические факторы [Llamas, 2004], а также экстремальные природные процессы и катастрофические явления. Этим выбором и событиями будут определяться как динамика истощения/деградации ресурсов, так и стратегии финансирования исследований правительственными органами и частными компаниями.

По своему современному состоянию и накопленному потенциалу гидрогеология готова к переходу от задачи обнаружения новых ресурсов и эффективного их использования для максимальной экономической выгоды к задаче разумного управления конечными взаимосвязанными ресурсами, которые жизненно важны для жизнеобеспечения людей и других живых существ [Narasimhan, 2005]. *«Будущее гидрогеологии, вероятно, будет продиктовано деликатным балансом, в котором функционируют гидрологические, эрозионные и питательные циклы, а также решением технологического общества либо адаптироваться к ограничениям, налагаемым балансом, либо продолжать использовать гидрогеологические системы для максимальной текущей выгоды.»* [Narasimhan, 2005, p. 7] (перевод наш. – Авт.).

Очевидно, что тенденция интеграции исследований динамических систем различных геосфер и их взаимодействий, как и потребности обеспечения упомянутого баланса, будут фокусироваться на синтезе различных дисциплинарных знаний и развитии междисциплинарных исследований. Это стимулируется текущей политикой финансирования исследований в развитых странах. Так, с середины 1980-х до 2005 гг. доля федерального бюджетного финансирования в США междисциплинарных исследований



в геонауках возросла от 7 до 25%, тогда как финансирование исследований в «традиционных» геологических дисциплинах уменьшилось на 12%. В период 2000-2005 гг. финансирование из федерального бюджета междисциплинарных исследований геонаук в университетах, колледжах и неприбыльных организациях превысило финансирование исследований во всех вместе взятых «традиционных» геологических дисциплинах [American..., 2008].

Принятая в 2007 г. стратегия науки Геологической службы США ориентирует на синтез дисциплинарных знаний на основе концепции экосистем [US Geological Survey, 2007]. Для гидрогеологии этот фокус означает приоритет исследований приповерхностного водообмена, взаимодействия подземного и поверхностного стоков, экогидрогеологических, геомикробиологических и биогеохимических исследований.

В прикладной области задача управления взаимозависимыми ресурсами (гидролого-гидрогеологическими водохозяйственными и климатическими системами) для обеспечения устойчивого развития в условиях стрессов и ограничений определяет необходимость дальнейшего развития интегрированных систем мониторинга критических параметров динамических систем на современной технологической основе (что уже активно реализуется во многих странах мира, но является проблемной областью в Украине), а также методов количественного анализа и моделирования. В области моделирования основным трендом будет разработка моделей, интегрирующих гидродинамические процессы и процессы тепло- и массопереноса, в частности в приложении к проблематике приповерхностного взаимодействия вод, климатических изменений, использования источников энергии, прогнозирования природных и антропогенных опасных процессов. Однако, с учетом отмеченных в начале этого раздела неопределенностей глобальных социально-экономических и политических трендов, можно согласиться с суждением о том [Narasimhan, 2005], что разумное управление системами подземных вод будет иметь гораздо большее значение для решения прикладных проблем гидрогеологии, чем собственно научные и технологические аспекты.

Обеспечение задач «технологического» и «управленческого» моделирования максимально адекватными базовыми концепциями, а также реализация предполагаемой важной интегрирующей

роли гидрогеологии в науках о Земле (см. предыдущий раздел), потребуют от гидрогеологии дальнейшего интенсивного развития фундаментального, теоретического, знания – прежде всего на основе синтеза знаний соприкасающихся и пересекающихся основных геологических дисциплин, а также в направлениях, ведущих к прогрессу в разрешении ключевой проблемы неоднородности и неопределенности геологических и гидрогеологических параметров. Методы моделирования как мощный инструмент исследования сложных систем путем проигрывания различных сценариев и тестирования альтернативных гипотез будут увеличивать свое значение не меньше, чем в прогнозировании, где влияние факторов неоднородности и неопределенности будет постепенно снижаться комплексированием исследований разными методами, детальным изучением предварительно выбранных опорных участков, результатами анализа мониторинговых наблюдений нестационарных процессов и др.

С учетом совершенствования геохимических (включая изотопные) и геофизических методов получения данных, а также актуальности упомянутых выше направлений для наук о Земле в целом, можно предполагать наибольший потенциал для появления существенно нового теоретического знания в области глубинной гидрогеологии, коровых флюидодинамических процессов и гидрогеологии морского дна.

## ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ В ИНСТИТУТЕ ГЕОЛОГИЧЕСКИХ НАУК НАН УКРАИНЫ

### Краткий исторический обзор

#### *Создание отдела*

Подземные воды Украины, как ценнейшее полезное ископаемое, постоянно находятся в поле зрения ученых ИГН НАН Украины. Несмотря на то, что гидрогеологические исследования в институте организационно оформились в середине 30-х гг. XX ст., отдельные исследователи, которые впоследствии становились ведущими специалистами-гидрогеологами и руководителями разных ее направлений, начинали изучение гидрогеологии в Украине значительно раньше. В частности, будущий директор ИГН – Павел Аполлонович Тутковский еще в 1895 г. подал проект водоснабжения г. Киев подземными водами. Благодаря ему Киев стал одним из первых

европейских городов, потреблявших артезианскую воду. В дальнейшем П.А. Тутковский принимал участие в организации водоснабжения других промышленных центров Украины.

Изучение химического и радиохимического состава подземных вод, почв, лиманных илов, горных пород начал в Украине Евгений Самойлович Бурксер. Покинув после революции 1905 г. Россию, он продолжил учебу в Сорбонском университете в Париже. Там познакомился с Марией Склодовской-Кюри, что в значительной мере определило сферу его научных интересов. После окончания учебы Е.С. Бурксер создал в Одессе первую в России радиологическую лабораторию. Впоследствии накопленные знания он активно использовал, когда в 1938 г. был назначен заведующим отделом геохимии, а позже директором ИГН.

Среди ученых, внесших значительный вклад в развитие региональной гидрогеологии в Украине, следует прежде всего вспомнить Константина Ивановича Макова. Он использовал различные методики оценки запасов подземных вод, анализа их режима, предложил схему зональности различных типов минеральных вод Украины.

В 1937 г. в связи с реорганизацией Института водного хозяйства АН УССР сектор гидрогеологии из его состава был переведен в Институт геологических наук. В результате ИГН стал главной организацией республики по изучению подземных вод. В эти же годы разворачиваются работы по изучению гидрогеологических условий регионов Украины. Результаты этих работ были изложены в опубликованных в 1940–1941 гг. обобщениях по гидрогеологии Причерноморской и Днепровско-Донецкой впадин и Вольно-Подоллии (К.И. Маков, С.З. Сайдаковский). В последние довоенные годы активизировались исследования минеральных, особенно радиоактивных вод (Е.С. Бурксер, А.Е. Бабинец, А.Н. Ничкевич).

После начала войны в 1941 г. коллектив ИГН был эвакуирован в Уфу, где продолжал обобщение предыдущих исследований по Украине, а также участвовал в анализе данных по гидрогеологии и геохимии Башкирии. Группа ученых ИГН проводила специальные исследования по гидрогеологическому и инженерно-геологическому обеспечению войск на фронтах (А.Е. Бабинец, Н.Ф. Кучерявенко, Г.И. Молявко, И.С. Усенко и др.).

### **Послевоенное развитие исследований**

После возвращения в Киев началась работа по организации лабораторий, гидрогеологических стационаров (Феофания под Киевом, Олешки на юге). Активизируется изучение минеральных вод в Карпатском регионе, на Украинском щите и в Причерноморье. В 1947 г. издаются монографии по подземным водам, составляются первые послевоенные картографические обобщения (К.И. Маков, В.И. Лучицкий и др.).

В 1948 г. отдел гидрогеологических проблем возглавил Андрей Евтихиевич Бабинец, с приходом которого начался период особенно активного развития гидрогеологических исследований. Объективной основой этой активизации стало послевоенное восстановление народного хозяйства, рост потребностей в подземных питьевых, минеральных, промышленных водах, необходимость обоснования гидротехнического строительства и др.

Но и личностные особенности А.Е. Бабинца способствовали этому. Он был весьма энергичным, настойчивым, целеустремленным человеком и специалистом, интересовавшимся всеми новациями и достижениями в гидрогеологии, инженерной геологии, морских исследованиях и пытался развивать многие из них. В отличие от современных условий, в то время можно было постепенно наращивать коллектив исследователей в разных направлениях, получать необходимое оборудование. И А.Е. Бабинец активно, настойчиво использовал эти возможности. На протяжении многих лет он подбирал в основном молодых исследователей для продвижения новых (для условий Украины) направлений исследований, поддерживал новаторские подходы, атмосферу самостоятельных поисков. Ему удалось тогда получить оборудование для изучения грунтов радиоактивными и ядерно-физическими методами, подземных вод с применением атомно-абсорбционной спектрофотометрии, газовой хроматографии, изотопных методов и др. Для отжима поровых растворов из консолидированных пород были приобретены мощные прессы, получено химико-аналитическое оборудование и др.

В 1961 г. А.Е. Бабинец защитил докторскую диссертацию на тему «Подземные воды юго-запада Русской платформы (распространение и условия формирования)» и под тем же названием опубликовал монографию, популярную в среде гидрогеологов-исследователей благодаря передовым анализу и обобщениям имевшихся

на то время эмпирических гидрогеологических данных [Бабинец, 1961]. Основные направления исследований гидрогеологов ИГН в этот и последующий периоды (1960–1982 гг.) были такие: региональная гидрогеология (К.Н. Варава, А.А. Фаловский, И.И. Цапенко и др.), ресурсы и динамика подземных вод (В.И. Лялько, Г.А. Шнейдерман, Г.А. Белявский, позднее В.М. Шестопапов, В.Ф. Рыбин, Н.С. Огняник, Г.В. Лисиченко и др.), экспериментальное изучение динамики влаги и солей в зоне аэрации лизиметрическими, ядерно-физическими, гидрофизическими и другими методами (К.Д. Ткаченко, С.Т. Звольский, В.И. Лялько, позднее А.Б. Ситников, Ю.Г. Головченко, С.П. Джепо, А.С. Скальский и др.), ядерно-физические методы оценки физико-механических свойств грунтов и донных отложений (С.Т. Звольский), поровые растворы пород (С.А. Клещенко, позднее А.А. Сухоробрий, М.Д. Руди), минеральные воды (Н.И. Радько, В.И. Марус, Н.П. Моисеева, С.П. Сулейманов, И.П. Онищенко, В.М. Шестопапов и др.), морская гидрогеология (Г.А. Белявский, А.Ю. Митропольский, С.А. Клещенко, М.Г. Костяной, С.П. Ольштынский, В.А. Емельянов, В.Д. Бурлаченко и др.), изотопные методы исследований (Л.А. Давыдюк, В.В. Гудзенко), искусственное восполнение подземных вод, береговые водозаборы водохранилищ (В.К. Янчев, Ю.С. Бут, Б.А. Корженевский, В.Ф. Рыбин, В.М. Шестопапов), гидрогеология угольных месторождений (А.А. Фаловский), постоянно действующие гидрогеологические модели (Н.С. Огняник, С.А. Гавловский, Ю.Ф. Руденко и др.), гидрометрические полевые исследования (И.Д. Багрий и др.), карстолого-спелеологические исследования (А.Б. Климчук и др.), изучение эксплуатационных ресурсов подземных вод (В.М. Шестопапов, Ю.Ф. Руденко, С.А. Гавловский и др.), охрана подземных вод от загрязнения (Ю.С. Бут, В.К. Янчев, Н.С. Огняник и др.).

В этот период издаются монографии по результатам изучения влажности и плотности грунтов с использованием радиоактивных методов (А.Е. Бабинец, С.Т. Звольский), по региональной гидрогеологии (К.Н. Варава, А.А. Фаловский, И.И. Цапенко), по балансу влаги в зоне аэрации (К.Д. Ткаченко).

В 1965 г. была опубликована книга В.И. Лялько и Г.А. Шнейдермана «Формирование ресурсов подземных вод засушливых территорий» [Лялько, Шнейдерман, 1965], в которой впервые

в Украине была выполнена региональная оценка ресурсов подземных вод (в междуречье Днепр – Молочная) с применением гидродинамических методов, с использованием данных лизиметрических наблюдений, нейтронного гамма-каротажа в режимных скважинах.

В последующие годы В.И. Лялько с коллегами разворачивает исследования термальных вод Крыма и Закарпатья, дает оценку возможностей захоронения промышленных стоков в Днепровско-Донецкой впадине, осваивает методы исследования теплопереноса в подземной гидросфере. Все эти исследования В.И. Лялько обобщает в докторской диссертации «Тепло- и массоперенос в подземных водах юго-запада Русской платформы» и защищает ее в 1972 г. [Лялько, 1974 и др.].

Вместе с сотрудниками Института физиологии Академии наук Украины начинаются детальные исследования минеральных вод типа «Нафтуса» в районе Трускавца и Сходниці (А.Е. Бабинец, Б.Е. Есипенко, В.И. Нацик, С.П. Сулейманов, Н.П. Моисеева, А.П. Ясевич и др.). Исследования по этим водам, активизированные в последующие годы, были соответственно оценены – А.Е. Бабинец (посмертно), В.М. Шестопапов, Н.П. Моисеева, С.П. Сулейманов вместе с сотрудниками Геолслужбы за «Открытие и подготовку к освоению Подольской гидрогеологической области минеральных вод типа «Нафтуса» стали лауреатами Премии Совета Министров СССР в 1991 г. [Бабинец и др., 1986].

### **Основные направления исследований**

#### ***Проблемы влагосолепереноса в грунтах зоны аэрации, физическое и математическое моделирование нелинейных процессов***

С 1976 г. в коллективе гидрогеологов ИГН начинает работать А.Б. Ситников с коллегами. К 1980 г. он подготовил и защитил во ВСЕГИНГЕО докторскую диссертацию на тему «Исследование массопереноса подземных вод в ненасыщенно-насыщенных грунтах зоны аэрации». В этой и последующих работах им разрабатываются основы оценки влагопереноса в физическом и математическом моделировании нелинейных процессов, принципы и способы контроля и управления оптимальным водно-солевым режимом грунтов. Ученым были разработаны физико-математические модели равновесной и неравновесной миграции вещества в пористо-трещиноватой



подземной среде, а также совместного влагопереноса в ненасыщенных и фильтрации в насыщенных водой грунтах с учетом солепереноса. Для повышения достоверности оценок предлагаемым методом введено понятие компетентного объема, используются крайне возможные параметры исходных моделей, зависимость объемной влажности и коэффициентов влагопереноса от всасывающего давления подземного водного раствора, учет переосмысленных традиционных сорбционно-десорбционных параметров. Рекомендовано также оценку инфильтрационного питания выполнять с помощью водно-солевого и гидрофизического способов с учетом поверхностного смыва и сдува, корневого отбора и т.п. Для оценки указанных параметров А.Б. Ситников и его коллеги разработали специальные лабораторные методы, а также применяли решение обратных задач по результатам режимных наблюдений. Были также рекомендованы расчетные формулы нелинейных зависимостей параметров влагопереноса и сорбции-десорбции. Для реализации упомянутых моделей на компьютерах были предложены специальные конечноразностные схемы решения.

Эти разработки апробировали на исследовательских участках (полигонах) в междуречье Днепр – Молочная, в Равнинном Крыму, Полесье и др. Физическое моделирование выполняли на фитогеотроне (гидрогеологическая станция «Феофания» на окраине Киева), осуществляли также имитацию орошения солеными водами, дренаж и мн. др. Основные результаты опубликованы в ряде монографий [Ситников, 1978, 1986, 2010; Ситников и др., 2003 и др.]. С 1983 по 2003 г. А.Б. Ситников возглавлял отдел техногенной гидрогеологии, а позже аналогичную лабораторию.

### ***Исследование ресурсов подземных вод и водообмена в гидрогеологических структурах***

В начале 60-х гг. в СССР для изучения естественных ресурсов подземных вод стала широко использоваться гидрометрическая группа методов – генетического расчленения гидрографов рек (Б.И. Куделин, О.В. Попов, В.А. Всеволожский, И.С. Зекцер, И.Ф. Фиделли и др.), межречной гидрометрической съемки рек, оценки межречного стока рек по многолетним наблюдениям на водпостах (Б.М. Доброумов, Г.И. Петров, О.В. Попов, Б.Н. Соколов и др.). А.Е. Бабинец инициировал применение этих методов в Украине.

Г.А. Белявский подготовил и в 1966 г. защитил диссертацию по оценке подземного стока Волынского Полесья. В дальнейшем метод расчленения гидрографа рек им применялся и в других регионах [Бабинец, Белявский, 1973]. Гидрометрический метод исследований широко использовался И.Д. Багрием и другими исследователями в Донбассе, Приднепровье и других регионах.

В.М. Шестопаловым была подготовлена и в 1983 г. во ВСЕГИНГЕО защищена докторская диссертация на тему «Естественные ресурсы подземных вод платформенных артезианских бассейнов Украины». В ней было показано, что максимальный учет естественных ресурсов подземных вод гидрометрической группой методов возможен лишь в районах с существенной вертикальной и горизонтальной расчлененностью рельефа и тесной взаимосвязью отдельных частей водообменной гидрогеологической системы с местными реками (Донбасс, Подолия). Проанализированы ограничения и погрешности, связанные с этими методами, и выполнен анализ других основных методов изучения: гидродинамических, балансовых, тепломассопереноса в зоне аэрации, естественных и искусственных индикаторов, геологических, натурального моделирования (теории подобия). Эти исследования показали, что повышение достоверности оценок естественных ресурсов может быть достигнуто лишь в результате комплексирования методов, широко применяемых в региональных исследованиях, с методами, используемыми для детального изучения естественных ресурсов подземных вод на локальных участках (типовых полигонах). Для региональных оценок рекомендуется последовательное определение подземного стока в реки (гидрометрическая группа методов), подземного стока (гидродинамические методы), полных естественных ресурсов (комплексирование гидродинамических определений с режимными наблюдениями, оценками тепломассопереноса в зоне аэрации, данными индикаторов, применения предложенного автором диссертации метода анализа режима эксплуатации подземных вод на водозаборах и др.). Был предложен алгоритм взаимопроверки результатов, полученных для всех трех компонентов оценки и повышения общей достоверности результатов.

Для повышения достоверности оценки подземного стока гидродинамическим методом, осуществляемой для каждого этажно залегающего горизонта верхнего гидрогеологического этажа,

впервые в бывшем СССР для построения карт гидроизопьез была применена методика, основанная на анализе корреляционных связей между пьезометрическими поверхностями этажно залегающих водоносных горизонтов и современным рельефом. Это позволило существенно изменить представления о характере пьезометрической поверхности этажно залегающих напорных водоносных горизонтов и соответственно о региональной динамике подземных вод и структуре водообмена в гидрогеологической системе. Были также предложены и реализованы методические приемы по повышению достоверности определения водопроницаемости горизонтов.

Выполненные исследования позволили существенно повысить оценку полных естественных ресурсов по сравнению с оценкой разгрузки в реки, посчитанной гидрометрическими методами. Так, в Волынском Полесье она оказалась выше в 9 раз, в Малом Полесье – в 5 раз, в Сумском районе Днепровского бассейна – в 6 раз, Черниговском – в 5 раз! Таким образом, впервые было доказано, что бесконтрольное применение гидрометрических методов может приводить к весьма существенным погрешностям в оценке естественных ресурсов в сторону занижения. Впоследствии это было подтверждено на опытном полигоне в Рыжем лесу Чернобыльской зоны отчуждения (Д.А. Бугай, А.С. Скальский) и других местах.

Доказанная подчиненность распределения гидроизопьез этажно залегающих напорных водоносных горизонтов основным особенностям современного рельефа и применение метода математического моделирования для изучения региональной гидродинамики позволило, вслед за М.А. Гатальским (1934, 1954, 1956), С.А. Шагоянцем [Шагоянец, 1959], И.В. Гармоновым и др. (1960, 1961) и другими исследователями, но на более детальной и достоверной доказательной базе, обосновать применимость схемы фильтрации Де Гли (1930) и А.Н. Мятлева [Мятлев, 1946, 1947] на региональном уровне. В частности, доказано, что не латеральное движение по водоносным пластам, а вертикальное перетекание через слабопроницаемые слои в этажно залегающей системе водоносных горизонтов и водоупоров является основным движителем водообмена. А это, в свою очередь, полностью изменяет представления о региональной динамике подземных вод. Расположение и формирование зон питания и разгрузки как безнапорных, так и напорных

подземных вод связано прежде всего не с характером залегания пластов пород, а с особенностями местной орогидрографии. В результате теряют свое значение такие понятия, как «основные региональные области питания, транзита, разгрузки» артезианских водоносных горизонтов. В действительности, их питание и разгрузка имеют локальный характер, связанный с местными орогидрографическими условиями, энергетически существенно более активными, чем представлялось ранее для аналогичных региональных областей питания и особенно разгрузки. Позднее (см. ниже) это будет убедительно доказано на примере формирования гипогенных карстовых систем (А.Б. Климчук).

Применение математического моделирования позволило также подтвердить действенность этой схемы водообмена до глубин 1600–2000 м. Упомянутая схема водообмена в основных артезианских бассейнах Украины – Днепровском и Волыно-Подольском, а также более полная оценка их естественных ресурсов были использованы для расчетов темпов водообмена до указанных выше глубин. В целом, полученные результаты свидетельствовали, с одной стороны, о наличии значительно больших размеров естественных ресурсов и соответственно темпов водообмена в гидрогеологических структурах, чем считалось ранее. С другой стороны, динамичные условия формирования ресурсов ориентировали исследователей на необходимость более тщательного изучения уязвимости подземных вод по отношению к местным источникам загрязнения [Шестопапов, 1968, 1974, 1981, 1988; Водообмен..., 1988, 1989].

В 1984 г., после утверждения диссертации, В.М. Шестопапов стал заведующим отделом гидрогеологических проблем и возглавил отделение гидрогеологии и инженерной геологии.

### ***Региональные гидрогеологические исследования***

Региональное описание гидрогеологических условий Украины в довоенное время и в первое послевоенное десятилетие было одним из важных направлений деятельности ИГН. Описательные региональные работы Б.Л. Личкова, К.И. Макова, С.З. Сайдаковского, Ф.А. Руденко, К.Н. Варавы, И.И. Цапенко и других ученых занимали в то время важное место. Позднее за ними сохранялась инициатива составления схем гидрогеологического районирования территории.

Впервые принципы гидрогеологического районирования и их реализация на территории Украины предложили В.И. Лучицкий и Б.Л. Личков в 1918 г. В 1930 г. они реализовали свой подход районирования на карте 25-верстного масштаба. В 1947 г. В.И. Лучицкий предложил обновленную схему гидрогеологического районирования Украины.

А.Е. Бабинец в 1961 г. опубликовал свою схему гидрогеологического районирования территории Украины. В начале 1970-х годов Ф.А. Руденко и И.П. Соляков представили уточненную схему гидрогеологического районирования, принятую в некоторых подразделениях Геологической службы. И, наконец, в 1979 г. А.Е. Бабинец уточняет и углубляет свои представления по созданной им ранее схеме гидрогеологического районирования.

Все упомянутые выше схемы базировались на структурно-гидрогеологическом принципе и отличались друг от друга количеством структурных единиц (в соответствии со степенью изученности тектонической структуры территории), названиями, границами, детальностью изображения и т.п. В связи с региональным среднemasштабным изучением ресурсов подземных вод возникла необходимость разработки принципов специального районирования.

Используя подходы, широко реализованные в географии (Д.Л. Арманд, К.Н. Дьяконов, В.В. Сочава и др.), В.М. Шестоपालов разработал принципы и схемы гидрогеологического районирования на двух разных основах: однородности составных частей районов (однородные районы на основе структурно-гидрогеологического единства) и взаимосвязи подземных вод в едином процессе – формировании, распространении и разгрузки подземных вод (функциональное районирование). При этом предполагалось, что среднemasштабное районирование может быть выполнено как с выделением одного вида районов, так и с комбинированным применением двух принципов районирования в одной схеме, позволяющей в единой иерархической системе последовательно учитывать статические (однородные) и динамические (функциональные) свойства объекта [Водообмен..., 1989].

Эти подходы (но без объединения в единую систему) были приняты позднее Геологической службой. В 2010 г. В.М. Шестоपालов, П.В. Блинов, Г.Г. Лютый разработали две схемы гидрогеологического районирования в соответствии

со структурно-гидрогеологическим и водообменным принципами. Если первая из них рассматривала только регионы первого порядка, но детально обосновывала их границы, то вторая по детальности была доведена до водохозяйственных участков Госводхоза, что позволяет учитывать влияние техногенных факторов на взаимодействие подземных и поверхностных вод.

Сотрудники отдела принимали также активное участие в составлении гидрогеологических карт: гидрогеологической карты УССР (1978) – В.М. Шестоपालов; Международных гидрогеологических карт масштаба 1:1 500 000 листов «Варшава», «Будапешт», «Бухарест» (по украинской территории) – В.М. Шестоपालов, Л.Н. Слива; гидрогеологических карт в Национальном атласе Украины – В.М. Шестоपालов, Г.Н. Негода, Л.Н. Слива, Н.Б. Овчинникова.

### *Изучение поровых растворов слабопроницаемых пород*

Основоположником этого направления в Украине был А.Е. Бабинец, который начал изучать поровые растворы с середины 1950-х гг. и постепенно расширял диапазон их определения – от иловых растворов морского генезиса на стадии современного седиментогенеза до поровых растворов глубокозалегающих пород, находящихся на стадиях позднего диа- и катагенеза. В ИГН была создана новая для того времени лабораторная база во главе с С.А. Клещенко для отжатия поровых растворов пород, находящихся на больших глубинах (прежде всего в пределах Днепровско-Донецкой впадины), в зоне так называемого затрудненного водообмена.

В дальнейшем исследование поровых растворов слабопроницаемых отложений были связаны с изучением водообмена в гидрогеологических структурах Украины. При этом главным объектом внимания стала верхняя гидродинамическая зона, к которой приурочены основные ресурсы пресных питьевых вод в этажно залегающих водоносных горизонтах, разделенная слабопроницаемыми слоями. Исследования, выполненные ранее гидродинамическими методами, показали, что формирование ресурсов подземных вод напорных водоносных горизонтов как в естественных условиях, так и при их эксплуатации водозаборами осуществляется путем перетекания через слабопроницаемые слои пород. Поэтому детальное изучение поровых растворов этих слоев было весьма актуальной задачей.



Используя сконструированный в отделе Н.А. Парцевским прибор для отжата связанной воды при малых давлениях (УОР-500), А.А. Сухоревый выполнил обширные исследования поровых растворов слабопроницаемых пород, прежде всего в Днепровском артезианском бассейне. Они стали основой его докторской диссертации на тему «Поровые растворы слабопроницаемых пород платформенных артезианских бассейнов Украины» (1999 г.). Своими исследованиями А.А. Сухоревый подтвердил наличие единой водоносной системы в верхнем этаже гидрогеологических структур, которая представляет собой совокупность подземных вод проницаемых коллекторов и поровых растворов слабопроницаемых слоев. Водная компонента поровых растворов имеет инфильтрационный генезис, а химический состав этих растворов так же, как и подземных вод, формируется в значительной мере вследствие процессов выщелачивания пород. Установлено, что полная вертикальная гидрохимическая зональность артезианского бассейна с длительным континентальным режимом состоит из пресных гидрокарбонатных (или близких к ним) подземных вод, переслаивающихся с более минерализованными, в основном сульфатными или хлоридными поровыми растворами отдельных слоев. В полном гидрогеологическом цикле поровые растворы проходят ту же геохимическую эволюцию, что и подземные воды, – от соленых хлоридных до пресных гидрокарбонатных, но с некоторой задержкой во времени. Изменения химического состава поровых растворов тесно связаны с темпами и длительностью вертикального водообмена. Они весьма разнообразны по территории и зависят от многих геолого-гидрогеологических, ландшафтных и других факторов. Наиболее активное перетекание подземных вод через отдельные слои происходит локально, избирательно по наиболее проницаемым зонам, которые, как показали иные исследования, связаны с системой двойной пористости (трещиноватости), прежде всего в зонах геодинамической активизации [Бабинец, Сухоревый; 1981, Сухоревый, 1993 и др.].

### **Минеральные воды**

Исследования минеральных вод (МВ), начатые по инициативе А.Е. Бабинца в качестве комплексной проблемы для специалистов различной направленности, были продолжены и постепенно существенно расширены. В 1985 и 1986 гг.

публикуются работы, обосновавшие выделение Карпатской и Подольской областей МВ типа «Нафтуса» (В.М. Шестопапов, А.П. Ищенко). В них позднее были выявлены уникальные воды с концентрацией двухвалентного железа, достигающей бальнеологической нормы (Вижницкое месторождение, источник 4 Шешоры). Детальное многолетнее изучение МВ типа «Нафтуса» (Н.П. Моисеева и др.) позволило, кроме показателя концентрации органического углерода, прогнозировать иные химические и биологические показатели их бальнеологического качества. Было, в частности, доказано, что основные лечебные свойства МВ типа «Нафтуса» связаны с полярными неустойчивыми веществами, которые при выходе на поверхность быстро становятся неактивными. Были идентифицированы не только классы, но и отдельные биологически активные соединения. Эти соединения (азотсодержащие, органические кислоты и их производные) следует определять при идентификации новых проявлений МВ данного типа. Была также установлена эффективность проверки действия МВ типа «Нафтуса» на подвижную функцию гладких мышц и показатели кровотворной системы биологических объектов.

После аварии на Чернобыльской АЭС сотрудниками отдела (Н.П. Моисеева, Г.Г. Крыжко и др.) вместе со специалистами Института экспериментальной патологии, онкологии и радиологии – ИЭПОР (Н.А. Дружина, Г.Г. Пухова, Н.К. Родионова, А.Ю. Моисеев) был установлен высокий эффект восстановления функции костномозгового кроветворения при лечении пострадавших «Нафтусей». Он достигался как в санаториях, так и за их пределами при условии применения этой воды, консервированной по методике, разработанной авторами [Патент..., 2010]. В 2013 г. была опубликована монография, в которой приведены результаты многолетнего изучения вод типа «Нафтуса» [Шестопапов и др., 2013].

Длительные исследования многочисленных известных месторождений и новых проявлений различных МВ выявили целесообразность создания новой их классификации, которая была создана и опубликована в 2003 г. [Классификация..., 2003]. Основные ее отличия от других – в более детальном разделении МВ по химическому составу (в частности, впервые выделены полиметалльные воды), в возможности выделения моно-, би- и поликомпонентных МВ, в учете структуры воды как оздоровительного фактора и др.

По результатам изучения распространения различных МВ в Украине было проведено районирование ее территории по разнообразию, условиям залегания и формирования в пределах глубин до 500–700 м (В.М. Шестопапов, Г.Н. Негода, Н.Б. Овчинникова). В соответствии с выполненным районированием сделано монографическое описание МВ Украины [Шестопапов и др., 2009]. Были проведены также комплексные исследования, которые показали, что МВ ряда месторождений характеризуются антиканцерогенными и радиопротекторными свойствами.

С использованием масс-спектрометрии основаны широкие возможности применения МВ для профилактики и лечения микроэлементозных болезней. Выполненные анализы в составе МВ известных месторождений и новых проявлений впервые выявили ряд биологически активных микроэлементов. В МВ, лечебные свойства которых связывали с макрокомпонентами, были определены биологически активные никель, марганец, цинк, медь, селен и другие микрокомпоненты в необходимых для бальнеологических эффектов концентрациях. В результате они становятся би- и поликомпонентными. Благодаря этим исследованиям (А.Ю. Моисеев и др.) получено экспериментальное подтверждение действенности принципов, заложенных в нашей классификации МВ. Новый цикл биологических экспериментов, выполненный на базе ИЭПОР совместно со специалистами этого института (А.Ю. Моисеев, Н.А. Дружина и др.), позволил выявить новые возможности применения МВ Березовского, Голубинского и Синякского месторождений в отношении стабилизации состояния облученных в повышенных и сублетальных дозах биообъектов, а также в качестве профилактики для контактирующих с источниками ионизирующего излучения [Моисеев, 2017].

Впервые прямым экспериментом с использованием высокочувствительных радиоэлектронных методов измерения прозрачности воды в ИК-диапазоне было выполнено сравнительное изучение структуры воды в МВ и водопроводных водах (Саратовский филиал Института радиотехники и электроники РАН – Н.И. Сеницын, В.А. Елкин и др.; В.М. Шестопапов, Н.П. Моисеева, А.Ю. Моисеев – ИГН НАН Украины). Установлено, что МВ «Нафтуся» и «Миргородская» характеризуются структуризацией носителя (самой воды). Обычная водопроводная вода и искусственные МВ не имеют таких свойств.

Полученный результат позволяет выдвинуть важные гипотезы. Минеральные воды влияют на организм не только химическим составом растворенных компонентов, температурой и радиоактивностью, но и структурой самой воды, которая может действовать структурными кластерами и дополнительным резонансно-волновым излучением, влияющим на водную биологическую компоненту организма. Учитывая то, что изученные МВ «Нафтуся» и «Миргородская» весьма различны по своему химическому составу и условиям формирования, можно сделать прогноз, что все или значительная часть природных МВ являются структурированными.

Впервые в Украине с использованием программы GEMS-SELECTOR были выполнены термодинамические расчеты состава МВ нескольких месторождений (Н.Б. Овчинникова). Эти расчеты показали наличие в МВ значительно большего разнообразия химических компонентов, чем определяет обычный химический анализ. Такой подход дает широкие возможности для более эффективного поиска компонентов в различных МВ с наиболее активным биологическим воздействием на организм человека.

#### **Радиоактивные и другие индикаторы**

Вслед за В.В. Чердынцевым, В.В. Гудзенко развил и успешно применил в условиях Украины радий-радоновый метод определения возраста молодых подземных вод. Совместно с коллегами им был разработан метод использования  $^{222}\text{Rn}$  для определения мест сосредоточенной разгрузки подземных вод в поверхностные водотоки, которым пользовались специалисты отдела и Опытного предприятия ИГН (1975 г.). Радий-радоновый метод широко применялся при решении различных гидрогеологических задач, результаты которых были обобщены в кандидатской диссертации В.В. Гудзенко «Исследование водообмена в верхней гидродинамической зоне Украинского щита и сопредельных артезианских бассейнов с использованием радиогенных изотопов». Были использованы также значения парных изотопов урана 234/238. Это соотношение изучалось в минеральных водах Украинского щита, карстовых системах Крыма, в водах шахт Донбасса и Кривого Рога. С помощью этого метода изучалось происхождение подземных вод, источники засоления, пропорции смешения, динамика пополнения подземных вод поверхностными при их нагнетании. В 1987 г. вышла книга

В.В. Гудзенко и В.Т. Дубинчука «Изотопы радия и радон в природных водах» [Гудзенко, Дубинчук, 1987].

В качестве индикаторов и для оценки загрязнения подземных вод применяли также определения пестицидов – ДДТ, ГХЦГ и др. (Е.Г. Моложанова, Н.П. Осокина). В 1980-х годах карстолого-спелеологическим отрядом Опытного предприятия ИГН, работавшим под научным руководством отдела, широко применялись флюоресцентные индикаторы для изучения динамики карстовых вод в карстовых регионах Украины.

### **Исследования в связи с аварией на ЧАЭС**

С первых дней аварии на ЧАЭС сотрудники отдела подключились к выполнению задач, связанных с оценкой степени загрязнения подземных и поверхностных вод и грунтов в зоне радиоактивного загрязнения (начальный мониторинг), разработке различных защитных мероприятий. Решением Оперативной комиссии Президиума Академии наук, заместитель директора ИГН и заведующий отделом гидрогеологических проблем В.М. Шестопапов был назначен главой Специализированной межведомственной комиссии по вопросам водоснабжения населения загрязненных территорий. В состав комиссии вошел сотрудник отдела В.В. Гудзенко. Первым важным решением была рекомендация правительству начать массовое бурение гидрогеологических скважин для организации водоснабжения населения защищенными подземными водами в пределах загрязненных радионуклидами территорий, включая г. Киев. Эти рекомендации были приняты и безотлагательно начали реализовываться. Бурение около 300 скважин на загрязненных территориях существенно улучшило качество водоснабжения населения. В Киеве было пробурено более 70 скважин в различных частях города, что в дальнейшем инициировало строительство сотен бюветов, превратившихся в одну из специфических изюминок города. Исходя из кризисных явлений последних лет в стране, продолжающихся на востоке страны боевых действий с рисками загрязнения поверхностных водоемисточников, в условиях ориентации системы водоснабжения на преимущественное использование уязвимых поверхностных вод, этот документ не утратил своей актуальности и сегодня. В дальнейшем упомянутая комиссия организовала экспедиционные работы с участием сотруд-

ников отдела (А.А. Сухоробрий, В.В. Гудзенко, И.П. Онищенко и др.) и других учреждений Отделения наук о Земле с целью подготовки предложений по различным аспектам защиты подземных и поверхностных вод от загрязнения. Тогда же после анализа ситуации было рекомендовано не создавать гидрозавесы (ряды скважин для откачки загрязненных грунтовых вод) для защиты р. Припять от поступления в нее радиоактивно загрязненных подземных вод.

В конце 1986 – начале 1987 гг. В.М. Шестопапов и Э.А. Морозов, вместе со специалистами Института математических машин и систем НАН Украины, разработали первую региональную гидрогеологическую модель северной части территории Киевской области. Даже при весьма консервативных оценках сорбции было показано, что радиоактивное загрязнение подземных вод происходит крайне медленно и в региональном масштабе будет оставаться на весьма низком уровне. В дальнейшем этот прогноз подтвердился. Тем не менее мониторинговые наблюдения продолжались и совершенствовались. Большая работа (В.Н. Бублясь и др.) была проведена с целью изучения быстрых путей фильтрации и миграции, которые в виде западин достаточно широко распространены на территории Чернобыльской зоны отчуждения и за ее пределами. Было установлено, что инфильтрационное питание подземных вод в западинах существенно превышает фоновое. Миграция радионуклидов в этих зонах также аномальна – загрязнение грунтов в них на порядок выше, чем на сопредельных территориях [Шестопапов и др., 2002; Shestopalov, 2002]. Учет этого феномена позволил разработать новую методику оценки защищенности и уязвимости подземных вод от загрязнения, существенно отличную от известных за рубежом. Результаты этих исследований были опубликованы в Украине и США [Shestopalov et al., 2015].

Накопление исходных данных по гидрогеологическим параметрам и фактическому загрязнению грунтов и подземных вод позволило впервые выполнить модельные прогнозы радиоактивного загрязнения подземных вод в районе действующего Припятского водозабора, осуществленного с учетом зон быстрой фильтрации и миграции (В.М. Шестопапов, Н.Б. Кастельцева, Ю.Ф. Руденко) [Водообмен..., 2001], а также прогнозную модельную оценку миграции радионуклидов из площадки объекта «Укрытие» в сторону р. Припять (А.С. Богуславский, В.М. Шестопапов).



На основе измерений радиоактивности керн скважин, пород в штольнях и при проходке метро в Киеве был выполнен модельный анализ миграции радионуклидов в водной фазе и накопления их в породах геологической среды (В.М. Шестопалов, А.С. Богуславский). Эти результаты были использованы В.М. Шестопаловым для обоснования того, что геологическая среда является главным депо для мигрирующих с водой радионуклидов [Шестопалов, 1999]. Ежегодное поглощение породами геологической среды радионуклидов в результате их нисходящей миграции с водой в среднем существенно выше, чем их вынос водами р. Припять за пределы Чернобыльской зоны отчуждения. Полученный результат позволил сделать важный вывод о том, что Чернобыльская зона отчуждения является не только наиболее загрязнённой и опасной территорией, но и мощным защитным барьером для смежных населённых территорий. Впоследствии эти выводы широко использовались в документах органами исполнительной власти, подчёркивавших важную барьерную функцию зоны отчуждения.

Углублённое изучение зон быстрой фильтрации и миграции, осуществляемое совместно в НИЦ РПИ и отделе гидрогеологических проблем (В.Н. Бублясь и др.), позволило выяснить, что, как минимум, значительная их часть сформировалась в результате глубинной дегазации земли [Шестопалов, Макаренко, 2013; Шестопалов и др., 2018]. Их изучение имеет важное значение для более адекватного понимания гидрогеологических процессов. Но не менее важен их учет и изучение вызванных ими экологических опасностей. В частности, была обоснована гипотеза о совместном воздействии землетрясения, плазмоидной электрической активности и водородной глубинной дегазации на четвертый блок ЧАЭС во время аварии в 1986 г. Проверочные замеры водорода, выполненные в западинах вблизи ЧАЭС в 2017 г., подтвердили их дегазационную активность даже в асейсмический период [Шестопалов, 2016].

### **Полигонные исследования**

Чернобыльский опыт создания детальных исследовательских участков был продолжен совместными усилиями сотрудников отдела и НИЦ РПИ на Лютежском полигоне. Здесь с 1991 г. изучаются различные гидрофизические и гидрохимические процессы в аномальной западинной

структуре и на смежной территории. Среди многочисленных результатов исследований следует выделить исключительно важную роль электрических процессов в обмене влагой между атмосферой и грунтовыми водами через зону аэрации, существенные различия в режиме влагопереноса и химического состава вод аномальной и фоновой зон, влияние режима напряженных состояний пород на флуктуацию массообменных процессов и др. (В.Н. Бублясь и др.).

### **Карстолого-спелеологические исследования, изучение гипогенного карста**

При изучении гидрогеологии отдельных регионов в 1960–1970-х гг. сотрудниками отдела гидрогеологических проблем (А.Е. Бабинец, В.М. Шестопалов) неоднократно затрагивались вопросы карста, однако систематические исследования в этом направлении были начаты в 1980 г. с образованием карстолого-спелеологического отряда в Опытном предприятии ИГН АН УССР (А.Б. Климчук), работавшего под научным руководством отдела до 1991 г. В ходе выполнения многочисленных (19) хоздоговорных тем были получены обширные новые, во многих аспектах уникальные данные по карсту и пещерам Западной Украины, Крыма, Армении, Туркменистана, Эфиопии и других регионов, послужившие основой для теоретических исследований и обобщений, выполненных в отделе в 1990-2000-х гг.

Проведенные в 1970–1980 гг. гидрогеологические и спелеологические исследования в Средней Азии, на Кавказе, в Альпах и других регионах позволили выдвинуть и разработать концепцию эпикарста – приповерхностной зоны массивов открытого карста, играющей важнейшую роль в регулировании питания массивов и морфогенезе карста [Климчук, 1989]. Она получила широкое международное признание и стала неотъемлемым элементом генетических и гидрогеологических моделей карстовых систем, формирующихся в экспонированных условиях [Klimchouk, 2004; Климчук, 2009].

В 1990-х гг. А.Б. Климчуком разработан спелеогенетический подход к проблемам карста, основанный на признании ведущей роли в карстобразовании процессов спелеогенеза – развития макропустотности и структур высокой проницаемости под действием водообмена. Соответственно, основное внимание уделялось выявлению механизмов спелеогенеза в зависимости от изменяющихся в пространстве и времени

граничных условий осуществления водообмена. Этот подход был реализован в рамках широкого международного сотрудничества под эгидой созданной и руководимой А.Б. Климчуком Комиссии по гидрогеологии карста и спелеогенезу Международного спелеологического союза (UIS), результатом чего явилась опубликованная в 2000 г. в США фундаментальная монография «Спелеогенез и эволюция карстовых коллекторов» [Klimchouk et al., 2000]. Впоследствии было показано, что именно спелеогенная самоорганизация водообменных систем с формированием структур высокой проницаемости является центральным механизмом преобразования исходной порово-трещинной среды в карстовую, т.е. формирования и эволюции карста [Worthington, Ford, 2009; Климчук, 2011].

В 1990-х гг. на основе изучения гигантских лабиринтовых пещер в гипсах Западной Украины, была разработана модель артезианского спелеогенеза – формирования карстовых систем поперечными восходящими перетоками между напорными водоносными горизонтами в слоистых комплексах [Климчук, 1990; Klimchouk, 1992]. Она ввела в карстологию развиваемые в отделе передовые представления современной гидрогеологии о гидродинамике верхней части артезианских бассейнов платформенного типа [Шестопапов, 1981; Водообмен..., 1989], предложила принципиально новое решение проблемы генезиса лабиринтовых пещерных систем в слоистых структурах, раскрыла роль артезианского карстообразования в организации водообмена в напорных водоносных комплексах с растворимыми породами и явилась основой для решения ряда проблемных вопросов геологии районов распространения сульфатных пород в миоценовом водоносном комплексе Западной Украины, таких как прогноз карстовой опасности [Klimchouk, Andreychouk, 2005] и генезис серных месторождений Предкарпатья [Klimchouk, 1997]. Эта модель была всесторонне подтверждена последующими исследованиями [Klimchouk, Andreychouk, 2017] и получила широкое международное признание и использование в интерпретации генезиса карста и пещер многих регионов Европы и США.

Этими исследованиями был выявлен особый механизм спелеогенеза восходящими потоками в относительно закрытых условиях напорных водоносных комплексов, включающий «внешний» гидродинамический контроль над расходом в

формирующихся карстовых каналах и скоростью их роста, осуществляемый наименее проницаемыми слоями нерастворимых пород покрова. Он был подтвержден и детально изучен работами по численному моделированию [Birk et al., 2005; Klimchouk et al., 2006; Rehrl et al., 2008, 2010] в рамках международных проектов Европейской комиссии (ROSES – Risk of Subsidence due to Evaporite Solution, 1998—2001) и немецкого фонда исследований (Void evolution in soluble rocks: Development and validation of numerical models by field evidence, 2004–2006), а также работами по моделированию карстообразования в сквозьформационных гидротермальных системах [Rajaram et al., 2005; Chaudhuri et al., 2013].

В 2000-х гг. исследования в этом направлении были расширены и углублены с целью синтеза и теоретического обобщения данных по малоизученной до тех пор проблеме гипогенного карста, который ранее связывался со специфичными механизмами растворения (гидротермальным и сернокислотным), а не с характером водообменных систем, и рассматривался как экзотический феномен, а не распространенный и важный тип карста.

В 2007 г. в США была опубликована монография А.Б. Климчука «Гипогенный спелеогенез: гидрогеологическая и морфогенетическая перспектива» [Klimchouk, 2007], в которой обоснован гидрогеологический подход к выделению гипогенного карста, обобщены доступные данные о нем и разработаны критерии идентификации карстовых полостей гипогенного происхождения. Было показано, что основные особенности формирования и функционирования гипогенных карстовых систем обусловлены гидродинамическими факторами (прежде всего восходящим вектором водообмена в напорных условиях), а не спецификой отдельных механизмов растворения. Эта книга дала значительный импульс исследованиям гипогенного карста во многих странах, что позволило выявить его широкое глобальное распространение и фундаментальное значение как одного из двух основных генетических типов карста (наряду с «традиционным» эпигенным карстом).

Дальнейшее развитие теории гипогенного карстообразования было освещено в последующей монографии и докторской диссертации А.Б. Климчука «Гипогенный спелеогенез, его гидрогеологическое значение и роль в эволюции карста» [Климчук, 2013]. Выявлены региональ-

ные закономерности развития гипогенного карста, выделены три его типа: 1) артезианский, связанный с сквозьпластовыми перетоками в слоистых водоносных комплексах верхних частей бассейнов; 2) эндогенный, связанный с глубоководными флюидопроводящими структурами и восходящей разгрузкой глубинных флюидов; 3) комбинированный, когда локализованный подток глубинных флюидов активизирует водообмен и карстообразование в слоистых водоносных комплексах бассейнов. Гипогенный карст распространен в различных геоструктурных условиях (рифтогенных, коллизионных, активированных зон платформ), в породах различного состава (включая силикатные) и возраста (от протерозойского до позднеэоценового), как в континентальных условиях, так и в океаническом дне. Выявлено, что территория Украины характеризуется преобладанием активного и/или реликтового гипогенного карста в большинстве регионов распространения растворимых пород.

Работы в этом направлении активно продолжаются [Климчук, 2017] и признаны Президиумом НАН Украины (Постановление № 243 от 27.09.2017 г.) одним из приоритетных направлений фундаментальных и прикладных исследований в науках о Земле. В 2017 г. издательством Springer опубликована фундаментальная международная монография «Регионы и пещеры гипогенного карста мира» [Klimchouk et al., 2017], демонстрирующая кардинальное увеличение данных о гипогенном карсте в течение последнего десятилетия. Интенсивные исследования гипогенного карста и развитие соответствующей теории вызвали изменение общей парадигмы карстовых исследований [Klimchouk, 2015]. Традиционные представления о карсте как исключительно гипергенном явлении теперь соответствуют лишь одному из генетических типов карста (эпигенному), а понятие о карсте определяется через геогидродинамическую систему с особыми свойствами (преобладанием организованных структур каналовой проницаемости), а не через геоморфологические признаки. Гипогенное карстообразование, развивающееся в широком спектре реакционно-способных горных пород, играет важную роль в формировании дренажной системы верхней коры, локализации процессов дегазации Земли, процессах флюидного литогенеза и формирования месторождений флюидогенных полезных ископаемых. Кардинальные различия закономерностей развития, строения, распространения и функцио-

нирования карстовых систем гипогенного и эпигенного происхождения и изменчивость их эволюционных состояний определяют необходимость эволюционного подхода [Климчук, 2010] к решению связанных с карстом практических проблем гидрогеологии, инженерной геологии, нефтегазовой и рудной геологии.

### ***Взаимодействие в системе «вода – порода», прогноз эволюции химического состава подземных вод и водовмещающих пород***

Качество подземных вод определяется прежде всего их химическим составом. В гидрохимии традиционно выявляется только общий состав макрокомпонентов в ионной форме и микрокомпонентов в воде, а также такие показатели, как рН, общая минерализация, различные виды жесткости, растворенный кислород и др. Эти показатели совершенно не отображают многообразие химических компонентов в воде в момент ее отбора из каптажей и не дают возможности прогнозировать их изменение во времени. Для таких оценок и прогнозов весьма перспективно применение метода термодинамического моделирования. Оно базируется на принципах частичного и локального равновесия и сводится к определению закономерностей смены химического состава и условий существования последовательных равновесных состояний. Разработаны программы, которые позволяют рассчитывать состав системы (значительно более полный, чем при аналитических определениях) в состоянии термодинамического равновесия. Особое место среди них занимает программа GEMS, с использованием которой И.Л. Калябиной разработана и верифицирована модель системы «лессовые породы – природная, проникающая через них вода» с учетом химических элементов, минеральных фаз, компонентного состава водной и газовой фаз. Эта модель отражает начальный инфильтрационный этап формирования состава подземных вод, с высокой точностью соответствует экспериментальным данным по водным вытяжкам лессовых пород Украины. Предложенная методика моделирования, объединяющая использование метода балансов и метода расчета равновесного состава, уже апробирована на примере определения состава подземных вод четвертичных отложений в одном из районов Киевской области и позволяет прогнозировать изменения во времени состава как подземных вод, так и вмещающих пород.



В дальнейшем планируется создать комплексную модель формирования состава подземных вод этажной системы водоносных горизонтов в условиях их взаимодействия через слабопроницаемые слои в естественных и нарушенных эксплуатацией водозаборов условиях.

### **Перспективы развития гидрогеологии в ИГН НАН Украины**

Неопределенности, отмеченные при рассмотрении общих перспектив гидрогеологии, еще в большей мере относятся к Украине, которая уже свыше четверти века не выходит из кризисов и турбулентности. Текущее состояние науки в Украине близко к катастрофическому, а перспективы выхода из кризиса, на фоне долговременного недофинансирования и непонимания политическими и управленческими лидерами роли науки в развитии страны (стратегия которых до сих пор не определена), внятно не просматриваются. Обсуждение перспектив развития отдельной научной дисциплины в таких условиях является, во многом, условным и может рассматривать лишь тактику «развития в условиях выживания». Основной такой тактики может быть сохранение и, с использованием всех открывающихся возможностей, усиление тех имеющихся направлений, в которых наработан наибольший потенциал производства научного продукта высокого уровня, с учетом общих трендов и наиболее важных потребностей практики, а также ограниченности перспектив радикального обновления материально-технической базы исследований.

Исходя из этих рамок, наметим основные направления развития гидрогеологических исследований в ИГН НАН Украины в среднесрочной перспективе.

1. Фундаментальные исследования по проблеме «геологическая роль воды». Это направление определено как одно из ведущих в современной гидрогеологии ввиду его прогнозируемой огромной, интегрирующей, роли в науках о Земле, потенциала генерирования принципиально нового знания на междисциплинарной основе, а также важности в плане обеспечения задач «технологического» и «управленческого» моделирования максимально адекватными базовыми концепциями. Его развитию в ИГН способствует общегеологический профиль института и нахождение в системе Отделения наук о Земле НАН Украины, где возможно и необходимо тесное взаимодействие с другими основными

геологическими дисциплинами (геофизика, литология и петрология, геохимия и минералогия, нефтегазовая геология и пр.). Это направление включает проблемы, разработка которых в ИГН находится на передовом мировом уровне, получила международное признание (водообмен в геологических структурах, дегазация Земли, глубинная гидрогеология, гипогенное карстообразование, аномальные зоны и зоны преимущественной фильтрации) и имеет хорошие перспективы привлечения конкурсного финансирования из украинских и зарубежных источников.

2. Региональные гидрогеологические исследования как основа решения практических проблем, связанных с подземными водами: изучение, оценка и пополнение ресурсов, оценка уязвимости и защита от загрязнений, развитие системы мониторинга. Это направление было традиционно сильно представлено в ИГН, а его практическая значимость будет определенно возрастать ввиду потребностей развития и усиления связанных с этим вызовов (включая региональное измерение глобальных вызовов, таких как изменение климата). В соответствии с мировыми трендами развития гидрогеологии, приоритетными должны быть исследования верхнекорового водообмена, взаимодействия подземного и поверхностного стоков и экогидрогеологические исследования.

3. Развитие методов моделирования гидрогеологических систем и процессов. При относительно невысокой ресурсоемкости моделирование является обязательным и мощным инструментом современной науки и решения задач вышеупомянутых направлений. В ИГН накоплен большой опыт создания и развития численных моделей, но требуется существенное обновление вычислительной базы и программного обеспечения, а также усиление кадрового потенциала. Основными направлениями могут быть создание региональных и локальных моделей гидрогеологических структур, моделирование процессов миграции загрязнений и моделирование сопряженных гидро(флюидо)динамических, геодинамических и геохимических процессов. Иницируется также исследование системы «вода – порода» методами химической термодинамики, с использованием принципов и подходов термодинамики открытых систем И.Р. Пригожина и объединением различных геофильтрационных и термодинамических моделей в сопряженную систему, позволяющую решать проблему фор-

мирования подземных вод и изменения геологической среды в естественных и техногенно-нарушенных условиях на единой основе.

4. Комплексное изучение минеральных вод. Это направление занимало и продолжает занимать важнейшие позиции в ИГН. Недавно выполненный обзор достижений в этой области в мире показал, что мы находимся на передовых позициях [Моисеев, 2017]. Внедрение методов химической термодинамики в изучение минеральных вод существенно расширяет перспективы будущих исследований.

5. Продолжение и развитие полигонных экспериментальных исследований (совместно с НИЦ РПИ), позволяющее выявлять зависимость влаго- и солепереноса через зону аэрации в водоносный горизонт от изменяющихся во времени электрических полей, а также от различной геодинамической активности в аномальных и фоновых зонах и др.

Следует, однако, отметить, что продолжение большей части этих исследований в настоящее время выглядит проблематично из-за недофинансирования, исключительно низкого уровня зарплат, невозможности осуществить пополнение коллектива отдела молодыми специалистами и отсутствия современного оборудования. Речь идет об угрозе прерывания эстафеты передачи знаний и умений молодым исследователям и прекращения существования созданной в ИГН гидрогеологической школы. В годы войны для сохранения кадрового потенциала институты Академии наук эвакуировались на восток и там продолжали работать. Сейчас они, по сути, постепенно уничтожаются на месте без иностранной оккупации. Фактическое разрушение науки в нашей стране неизбежно выводит ее на задворки цивилизации. Черта невозврата в ряды преуспевающих уже рядом.

## ВЫВОДЫ

Развиваясь в течение долгого времени как наука о подземных водах, в последней четверти XX ст. гидрогеология эволюционировала в науку о гео-

логических процессах, происходящих с участием водных флюидов, и стала серьезно влиять на другие основные науки о Земле. Предметная область современной гидрогеологии является чрезвычайно разнообразной и включает сильные междисциплинарные связи и пограничные дисциплины. В силу особого положения воды в истории Земли, «базового» положения подземной гидросферы в глобальном цикле воды, ее «сквозного» характера по отношению к другим земным сферам и тесного взаимодействия с ними, гидрогеология имеет потенциал для занятия в обозримом будущем важной, интегрирующей, позиции среди наук о Земле.

Фокус огромного практического значения гидрогеологии смещается от задачи обнаружения новых ресурсов и эффективного их использования для максимальной экономической выгоды к задаче разумного управления конечными взаимосвязанными ресурсами, которые крайне важны для жизнеобеспечения людей и существования экосистем.

Гидрогеологические исследования в ИГН НАН Украины, со времени своего организационного оформления в середине 30-х гг. XX ст. развивались в русле основных мировых трендов этой науки, а на отдельных этапах формировали ее передовые рубежи в ряде направлений (водообмен в геологических структурах, дегазация Земли, глубинная гидрогеология, эволюция карста и гипогенное карстообразование, аномальные зоны и зоны преимущественной фильтрации). С учетом имеющихся заделов и мировых трендов целесообразно продолжать: фундаментальные исследования по проблеме геологической роли воды (в упомянутых выше направлениях); региональные гидрогеологические исследования как основу решения практических проблем, связанных с подземными водами, и управления ресурсами; развитие методов моделирования гидрогеологических систем и процессов; комплексные исследования минеральных вод; полигонные экспериментальные исследования влаго- и солепереноса через зону аэрации.

## Список литературы

*Абрамов С.К., Биндеман Н.Н., Бочеввер Ф.М., Веригин Н.Н.* Влияние водохранилищ на гидрогеологические условия прилегающих территорий. Москва: Госстройиздат, 1960. 319 с.

*Бабинец А.Е.* Подземные воды юго-запада Русской платформы. Киев: Изд-во АН УССР, 1961. 378 с.

*Бабинец А.Е., Белявский Г.А.* Естественные ресурсы подземных вод зоны интенсивного водообмена Украины. Киев: Наук. думка, 1973. 111 с.

*Бабинец А.Е., Сухоребрий А.А.* О гидрогеохимических особенностях донных отложений лиманов северо-западного Причерноморья. *Геол. журн.* 1981. Т. 41, № 2 (197). С. 104-111.

- Бабинец А.Е., Шестопапов В.М., Моисеева Н.П., Лютый Г.Г., Ищенко А.П., Сулейманов С.П., Гудзенко В.В., Усов В.Ю., Койнов И.М., Гаврилюк Г.З., Лисиченко Г.В., Ясевич А.П.** Лечебные минеральные воды типа «Нафтуся». Киев: Наук. думка, 1986. 192 с.
- Беленицкая Г.А.** «Флюидное» направление литологии: состояние, объекты, задачи. *Уч. зап. Казан. ун-та.* 2011. № 153 (4). С. 97–113.
- Белоусова А.П., Гавич И.К., Лисенков А.Б., Попов Е.В.** Экологическая гидрогеология. Москва: Академкнига, 2006. 400 с.
- Боревский Б.В., Хордикайнен М.А., Язвин Л.С.** Разведка и оценка эксплуатационных запасов месторождений подземных вод в трещинно-карстовых пластах. Москва: Недра, 1976. 248 с.
- Бочевер Ф.М., Веригин Н.Н.** Методическое пособие по расчетам эксплуатационных запасов подземных вод для водоснабжения. Москва: Госстройиздат, 1961. 198 с.
- Будущее гидрогеологии: современные тенденции и перспективы:** Воронов А.Н. и др. (ред.). Санкт-Петербург: СПб. ГУ, ВВМ, 2008. 420 с.
- Бочевер Ф.М.** Теория и практические методы гидрогеологических расчетов эксплуатационных запасов подземных вод. Москва: Недра, 1968. 328 с.
- Валяев Б.М.** Углеродородная дегазация Земли и генезис нефтегазовых месторождений. *Геология нефти и газа.* 1997. № 9. С. 30–37.
- Всеволожский В.А.** Основы гидрогеологии (2-е изд., перераб. и доп.). Москва: Изд-во МГУ, 2007. 448 с.
- Всеволожский В.А., Дюнин В.И.** Анализ закономерностей гидродинамики глубоких пластовых систем. *Вестн. МГУ. Сер. геол.* 1996. № 3. С. 61–72.
- Всеволожский В.А., Киреева Т.А.** К проблеме формирования инверсий гидрохимической зональности. *Вестн. МГУ. Сер. геол.* 2009. № 5. С. 19–25.
- Всеволожский В.А., Киреева Т.А.** Роль эндогенных флюидов в формировании вертикальной гидродинамической зональности нефтегазоносных бассейнов платформенного типа. *Глубинная нефть.* 2014. № 1. (электронный журнал: <http://journal.deerpoil.ru/index>).
- Водообмен** в гидрогеологических структурах Украины. Методы изучения водообмена: Шестопапов В.М. (ред.). Киев: Наук. думка, 1988. 272 с.
- Водообмен** в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в естественных условиях: Шестопапов В.М. (ред.). Киев: Наук. думка, 1989. 288 с.
- Водообмен** в гидрогеологических структурах Украины. Водообмен в гидрогеологических структурах и Чернобыльская катастрофа. Ч. 1, 2: Шестопапов В.М. (ред.). Киев: Ин-т геол. наук НАН Украины; НИЦ радиогидрогеокол. полигон. исслед. НАН Украины, 2001. 630 с.
- Гавриленко Е.С., Дерзгольц В.Ф.** Глубинная гидросфера Земли. Киев: Наук. думка, 1971. 272 с.
- Гармонов И.В., Иванов А.В., Нефедов Е.И., Смирнов Г.Н., Сугробов В.М.** Подземные воды юга Западно-Сибирской низменности и условия их формирования. Москва: Изд-во АН СССР, 1961. (Тр. ЛГГП АН СССР; Т. 33).
- Гатальский М.А.** Подземные воды и газы палеозоя северной половины Русской платформы. Москва: Госгеолтехиздат, 1954. 172 с.
- Гавич И.К.** Гидрогеодинамика. Москва: Недра, 2002. 349 с.
- Геологическая эволюция и самоорганизация системы вода – порода:** в 5 т. Т. 1. Система вода – порода в земной коре: взаимодействие, кинетика, равновесие, моделирование: Под ред. С.Л. Шварцева. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2005.
- Геологический словарь:** в 2 т.: Паффенгольц К.Н. и др. (ред.). Москва: Недра, 1978. Т. 1. 486 с.; Т. 2. 456 с.
- Гиринский Н.К.** Некоторые вопросы динамики подземных вод. *Гидрогеология и инж. геология.* 1947. № 9. С. 27–32.
- Гольдберг В. М.** Взаимосвязь загрязнения подземных вод и природной среды. Ленинград: Гидрометеиздат, 1987. 248 с.
- Григорьев С.М.** Роль воды в образовании земной коры: дренажная оболочка земной коры. Москва: Недра, 1971. 263 с.
- Гудзенко В.В., Дубинчук В.Т.** Изотопы радия и радон в природных водах. Москва: Наука, 1987. 146 с.
- Дегазация** Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. Москва: ГЕОС, 2002. 370 с.
- Дегазация** Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений. Москва: ГЕОС, 2010. 712 с.
- Дмитриевский А.Н., Валяев Б.М.** Углеродородная дегазация через дно океана: локализованные проявления, масштабы, значимость. *Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений.* Москва: ГЕОС, 2002. С. 7–36.
- Добрецов Н.Л.** Мантийные суперплюмы как причина главной геологической периодичности и глобальных перестроек. *Докл. РАН.* 1997. Т. 357, № 6. С. 797–800.
- Дюнин В.И.** Гидрогеодинамика глубоких горизонтов нефтегазоносных бассейнов. Москва: Науч. мир, 2000. 465 с.
- Дюнин В.И., Корзун В.И.** Гидрогеодинамика нефтегазоносных бассейнов. Москва: Науч. мир, 2005. 524 с.
- Ежов Ю.А., Вдовин Ю.П.** К вопросу о вертикальной гидродинамической зональности земной коры. *Сов. геология.* 1970. № 8. С. 66–76.



- Ежов Ю.А., Лысенко Г.П.** Вертикальная гидродинамическая зональность земной коры. *Сов. геология*. 1986. № 8. С. 111–120.
- Ежов Ю.А., Лысенко Г.П.** Значение зоны переходных давлений в подземной гидросфере. *Сов. геология*. 1988. № 8. С. 107–114.
- Игнатюк Н.К.** Зональность, формирование и деятельность подземных вод в связи с развитием геоструктуры. Москва: Гостоптехиздат, 1950. 286 с.
- Иванов С.Н.** Предельная глубина открытых трещин и гидродинамическая зональность земной коры. *Ежегодник-1969 Ин-та геологии и геохимии Урал. фил. АН СССР*. Свердловск, 1970. С. 212–233.
- Історія** природних вод: Володимир Іванович Вернадський. *Історія природних вод*. Київ: НАН України, 2012. 754 с.
- Киссин И.Г.** Флюиды в земной коре: геофизические и тектонические аспекты. Москва: Наука, 2009. 328 с.
- Классификация** минеральных вод Украины: Под ред. В.М. Шестопалова. Киев: Макком, 2003. 121 с.
- Климчук А.Б.** Роль приповерхностной зоны в гидрогеологии и морфогенезе карста. Киев: Ин-т геол. наук, 1989. 42 с.
- Климчук А.Б.** Артезианское происхождение крупных лабиринтовых пещер в миоценовых гипсах Западной Украины. *Докл. АН УССР. Сер. Б*. 1990. № 7. С. 28–32.
- Климчук А.Б.** Эпикарст: гидрогеология, морфогенез и эволюция. Симферополь: Сонат, 2009. 112 с.
- Климчук А.Б.** Эволюционный подход к типологии карста. *Геол. журн.* 2010. № 3 (322). С. 85–97.
- Климчук А.Б.** Самоорганизация структуры водообмена как системообразующее свойство карста. *Геол. журн.* 2011. № 1 (334). С. 85–110.
- Климчук А.Б.** Гипогенный спелеогенез, его гидрогеологическое значение и роль в эволюции карста. Симферополь: ДИАЙПИ, 2013. 180 с.
- Климчук О.Б.** Розвиток теорії гіпогенного карстогенезу: наукові та практичні застосування. *Вісн. НАН України*. 2017. № 11. С. 1–19. doi: 10.15407/visn2017.11.009
- Коробов Ю.И., Малюшко Л.Д.** Флюидодинамическая модель формирования залежей углеводородов – теоретическая основа поисков месторождений нефти и газа. *Дегазация Земли: геодинамика, геофлюиды, нефть и газ*. Москва: ГЕОС, 2002. С. 360–362.
- Кропоткин П.Н.** Дегазация Земли и генезис углеводородов. *Журн. Всесоюз. хим. о-ва им. Д.И. Менделеева*. 1986. Т. 31, № 5. С. 540–547.
- Летников Ф.А.** Сверхглубинные флюидные системы Земли. Новосибирск: Наука, 1992. 150 с.
- Летников Ф.А., Дорогокупец П.И.** К вопросу о роли сверхглубинных флюидных систем земного ядра в эндогенных геологических процессах. *Докл. РАН*. 2001. Т. 378, № 4. С. 535–537.
- Ларин В.Н.** Наша Земля (происхождение, состав, строение и развитие изначально гидридной Земли). Москва: Агар, 2005. 248 с.
- Лукин А.Е.** Литогеодинимические факторы нефтегазоаккумуляции в авлакогенных бассейнах. Киев: Наук. думка, 1997. 225 с.
- Лукин А.Е.** О сквозьформационных флюидопроводящих системах в нефтегазоносных бассейнах. *Геол. журн.* 2004. № 3 (309). С. 35–45.
- Лукин А.Е.** Флюидный литогенез – важнейшее направление литологических исследований в XXI ст. *Геол. журн.* 2014. № 4 (349). С. 27–42.
- Лукин А.Е.** Система «суперплюм – глубокозалегающие сегменты нефтегазоносных бассейнов» – неисчерпаемый источник углеводородов. *Геол. журн.* 2015. № 2 (351). С. 7–20.
- Лукин А.Е., Пиковский Ю.И.** О роли глубинных и сверхглубинных флюидов в нефтегазообразовании. *Геол. журн.* 2004. № 2 (308). С. 21–33.
- Лялько В.И.** Методы расчета тепло- и массопереноса в земной коре. Киев: Наук. думка, 1974. 131 с.
- Лялько В.И., Шнейдерман Г.А.** Формирование и прогноз ресурсов подземных вод засушливых районов. Киев: Наук. думка, 1965. 187 с.
- Мамырин Б.А., Толстихин И.Н.** Изотопы гелия в природе. Москва: Энергоиздат, 1981. 222 с.
- Маракушев А.А., Маракушев С.А.** Водородное дыхание Земли – его происхождение, геологические и биологические следствия. *Альтернатив. энергетика и экология*. 2008. № 57. С. 152–170.
- Мироненко В.А., Румынин В.Г.** Проблемы гидрогеоэкологии: в 3 т. Т. 1. Теоретическое изучение и моделирование геомиграционных процессов. Москва: Изд-во МГУ, 1998. 611 с.
- Мироненко В.А., Румынин В.Г.** Проблемы гидрогеоэкологии: в 3 т. Т. 3. Кн. 1. Прикладные исследования. Москва: Изд-во МГУ, 1999. 312 с.
- Мироненко В.А., Румынин В.Г.** Проблемы гидрогеоэкологии: в 3 т. Т. 2. Опыттно-миграционные исследования. 2 изд. Москва: Изд-во МГУ, 2002. 394 с.
- Моисеев А.Ю.** Особенности химического состава и бальнеологического применения минеральных вод. Киев: КИМ, 2017. 462 с.
- Мятев А.Н.** Действие колодца в напорном бассейне подземных вод. *Изв. Турк. фил. АН СССР*. 1946. № 3. С. 48–62.
- Мятев А.Н.** Напорный комплекс подземных вод и колодцы. *Изв. АН СССР. Отд. техн. наук*. 1947. № 9. С. 1069–1088.

**Патент** 92042 Україна. Спосіб довготривалого забезпечення лікувальних властивостей мінеральних вод з підвищеним вмістом органічних речовин при зберіганні. В.М. Шестопапов, Г.К. Іваницький, Н.П. Моїсєєва, А.Ю. Моїсєєв. Опубл. 27.09.2010. Бюл. № 18.

**Пиковский Ю.И.** Флюидные плюмы литосферы как модель нефтеобразования и нефтегазонакопления. *Дегазация Земли и генезис углеводородных флюидов и месторождений*. Москва: ГЕОС, 2002. С. 254–270.

**Пиннекер Е.В.** Подземная гидросфера. Новосибирск: Наука, 1984. 158 с.

**Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шварцев С.Л., Богданов Г.Я., Борисов В.Н., Караванов К.П.** Основы гидрогеологии. Общая гидрогеология. Новосибирск: Наука, 1980. 225 с.

**Пиннекер Е.В., Писарский Б.И., Шварцев С.Л.** Основы гидрогеологии. Геологическая деятельность и история воды в земных недрах. Новосибирск: Наука. Сиб. отд-ние, 1982. 240 с.

**Плотников Н.И.** Подземные воды – наше богатство. Москва: Недра, 1976. 208 с.

**Прогноз** водопритоков в горные выработки и водозаборы подземных вод в трещиноватых и закарстованных породах. Москва: Недра, 1972. 196 с.

**Пригожин И.Р.** Введение в термодинамику необратимых процессов. Москва: Изд-во иностр. литер., 1960. 232 с.

**Пригожин И.Р., Стенгерс И.** Порядок из хаоса. Новый диалог человека с природой. Москва: Прогресс, 1986. 431 с.

**Роговская Н.В.** Карта естественной защищенности подземных вод от загрязнения. *Природа*. 1976. № 3. С.57–76.

**Семененко Н.П.** Кислородно-водородная модель Земли. Киев: Наук. думка, 1990. 246 с.

**Семихатов А.Н.** Гидрогеология. Москва: Изд-во Сельхозгиз, 1954. 328 с.

**Ситников А.Б.** Динамика воды в ненасыщенных и насыщенных грунтах зоны аэрации. Киев: Наук. думка, 1978. 156 с.

**Ситников А.Б.** Динамика влаги и солей в почвогрунтах зоны аэрации. Киев: Наук. думка, 1986. 152 с.

**Ситников А.Б.** Вопросы миграции веществ в грунтах. Киев, 2010. 640 с.

**Ситников А.Б.** Обоснование устойчивой расчетной явной физико-математической модели совместной нелинейной миграции жидких углеводородов и подземной влаги в грунтах зоны аэрации. *Геол. журн.* 2013. № 4 (345). С. 52–62.

**Ситников А.Б., Головченко Ю.Г., Ткаченко К.Д.** Гидрогеологическая станция «Феофания»: многолет-

ние исследования и результаты. Киев: Наук. думка, 2003. 200 с.

**Ситников А.Б., Ситникова В.А.** Обоснование закономерностей фазового преобразования жидкой и парообразной влаги в системе «грунт – воздух – водоем». *Геол. журн.* 2014. № 3 (348). С. 104–113.

**Сухоребрый А.А.** Поровые растворы слабопроницаемых пород платформенных артезианских бассейнов Украины. Киев: ИГН АН Украины, 1993. 56 с.

**Сухоребрый А.А.** Химический состав поровых растворов слабопроницаемых слоев как показатель защищенности подземных вод. *Геол. журн.* 2018. № 1 (362). С. 17–27.

**Ферронский В.И., Дубинчук В.Т., Поляков В.А., Селецкий Ю.Б., Купцов В.М., Якубовский А.В.** Природные изотопы гидросферы. Москва: Недра, 1975. 280 с.

**Хакен Г.** Синергетика. Москва: Мир, 1980. 406 с.

**Хаустов В.В.** Роль глубинной геодинамики в формировании гидrolитосферы: (на примере Каспийско-Кавказского сегмента Альпийско-Гималайского подвижного пояса): автореф. дис. ... д-ра геол.-минерал. наук. Санкт-Петербург, 2011. 43 с.

**Чекалюк Э.Б.** Термодинамика нефтяного пласта. Москва: Недра, 1965. 195 с.

**Чердынцев В.В.** Уран-234. Москва: Атомиздат, 1969. 308 с.

**Шагояц С.А.** Подземные воды центральной и восточной частей Северного Кавказа и условия их формирования. Москва: Госгеолтехиздат, 1959. 104 с.

**Шварцев С.Л.** Общая гидрогеология. Москва: Недра, 1996. 425 с.

**Шварцев С.Л.** О возможных путях развития гидрогеологии в XXI веке. *Проблемы геологии и освоения недр*. Томск: Изд-во ТПУ, 2007. С. 132–134.

**Шварцев С.Л.** Основные процессы и механизмы эволюционного развития системы вода–порода. *Изв. Том. политехн. ун-та*. 2007. Т. 311, вып. 1. С. 103–113.

**Шестаков В.М.** Геогидрология. Москва: ИКЦ «Академкнига», 2003. 176 с.

**Шестопапов В.М.** Об основных закономерностях динамики подземных вод домезозойских образований Волыно-Подольской окраины Русской платформы. *Сов. геология*. 1968. № 10. С. 122–125.

**Шестопапов В.М.** Динамика и естественные ресурсы подземных вод основных горизонтов Волинского артезианского бассейна. Киев: Наук. думка, 1974. 132 с.

**Шестопапов В.М.** Естественные ресурсы подземных вод платформенных артезианских бассейнов Украины. Киев: Наук. думка, 1981. 195 с.

- Шестопалов В.М.** Методы изучения естественных ресурсов подземных вод. Москва: Недра, 1988. 169 с.
- Шестопалов В.М.** Радіоактивне забруднення і бар'єрні функції геологічного середовища в зоні відчуження. *Бюл. екол. стану зони відчуження та зони безумов. (обов'язков.) відселення*. 1999. № 15. С. 25–27.
- Шестопалов В.М.** О гидрогеологической зональности и водообмене в геологических структурах. *Геол. журн.* 2014. № 4 (349). С. 9–26.
- Шестопалов В.М.** О возможных геолого-геофизических рисках и перспективах Чернобыльской зоны отчуждения. *Геофиз. журн.* 2016. № 1. С. 3–16.
- Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н.** Оценка защищенности и уязвимости подземных вод с учетом зон быстрой миграции. Киев: Альт. Арт, 2007. 118 с.
- Шестопалов В.М., Богуславский А.С., Бублясь В.Н., Онищенко И.П., Кухаренко Д.Е.** Барьерная и автореабилитационная функция геологической среды (на примере Чернобыльской зоны отчуждения). *Современные проблемы гидрогеологии и гидрогеомеханики*. Санкт-Петербург: Изд-во Спб. ун-та, 2002. С. 227–236.
- Шестопалов В.М., Макаренко А.Н.** О некоторых результатах исследований, развивающих идею В.И. Вернадского о «газовом дыхании» Земли. Ст. 1. Поверхностные и приповерхностные проявления аномалий дегазации. *Геол. журн.* 2013. № 3 (344). С. 7–25.
- Шестопалов В.М., Макаренко А.Н.** О некоторых результатах исследований, развивающих идею В.И. Вернадского о «газовом дыхании» Земли. Ст. 2. Глубинные процессы дегазации недр. *Геол. журн.* 2014. № 3 (348). С. 7–28.
- Шестопалов В.М., Моисеева Н.П., Негода Г.Н., Дружина М.О., Сухоребрий А.О., Онищенко И.П., Гудзенко В.В., Овчинникова Н.Б., Усов В.Ю., Ясевич Г.П.** Формування мінеральних вод України. Київ: Наук. думка, 2009. 312 с.
- Шестопалов В.М., Моисеева Н.П., Ищенко А.П., Кондратюк Е.И., Усов В.Ю., Моисеев А.Ю., Гудзенко В.В., Лютый Г.Г., Сеницын Н.И., Сулейманов С.П., Ясевич А.П., Дружина Н.А., Ковальская В.В., Гела А.А., Родионова Н.К., Кирилюк Н.Д., Рудько Г.И., Митько А.П., Нецкий А.В., Бакаржиева О.О.** Лечебные минеральные воды типа «Нафтуся» Украинских Карпат и Подолья. Черновцы: Букрек, 2013. 600 с.
- Шестопалов В.М., Набока М.В., Лихошерстов О.О., Чабан О.П.** Потенційні властивості геохімічних ландшафтів для переходу радіоцезію з ґрунту по харчових ланцюгах до людини та безпека населення. *Укр. геогр. журн.* 2015. № 2. С. 59–64.
- Шестопалов В.М., Лукин А.Е., Згонник В.А., Макаренко А.Н., Ларин Н.В., Богуславский А.С.** Очерки дегазации Земли. Киев: ИГН НАН Украины; Науч.-инж. центр радиогидрогеоэкол. полигон. исслед. НАН Украины, 2018. 632 с.
- Якуцени В.П.** Геология гелия. Ленинград: Недра, 1968. 232 с.
- Adams E.E., Gelhar L.W.** Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 2, Spatial moments analysis: *Water Resour. Res.* 1992. Vol. 28. P. 3293–3307.
- Ague J.J.** Fluid flow in the deep crust. In: Holland H.D., Turekian K.K. (eds), *Treatise on geochemistry*. Vol. 1.3. Amsterdam: Elsevier, 2003. P. 203–247.
- American Geological Institute** Federal research funding of geosciences. *Geoscience Currents* 14. Alexandria, VA: American Geological Institute, 2008. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <http://www.agiweb.org/workforce/Currents-014-GeoscienceFederalResearchFunding.pdf> (20 липня 2018).
- Andersen K.J.** Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? *Marine Geology*. 2012. Vol. 332–334. P. 89–108.
- Anderson M.P.** Ground water modeling—The emperor has no clothes. *Ground Water*. 1983. Vol. 21. P. 666–669.
- Anderson M.P.** Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediment. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1989. Vol. 101. P. 501–511.
- Anderson M.P.** Characterization of geological heterogeneity: Subsurface flow and transport: A stochastic approach. New York: Cambridge University Press, 1997. P. 23–43.
- Anderson M.P.** Groundwater: Benchmark Papers in Hydrology, no. 3. Wallingford, UK: IAHS, 2008. 625 p.
- Anderson M.P., McCray, J.** Lessons learned from legacy research sites. *Ground Water*. 2011. Vol. 49. P. 617–619.
- Anderson M.P., Siegel D.I.** Seminal advances in hydrogeology, 1963 to 2013: The O.E. Meinzer Award legacy. In: Bickford, M.E. (ed.), *The Web of Geological Sciences: Advances, Impacts, and Interactions*. GSA Special Paper 500, 2013. P. 463–500.
- Back W.** Origin of hydrochemical facies of groundwater in the Atlantic Coastal Plain. *Rept. 21st Session, Int. Sci. Cong.*, P 1. Copenhagen, 1960. P. 87–95.
- Back W., Freeze R.A.** Chemical hydrogeology. Stroudsburg, PA: Hutchinson Ross Publishing Co., 1983. 416 p.
- Baedecker M.J., Back W.** Hydrogeological processes and chemical reactions at a landfill. *Ground Water*. 1979. Vol. 17. P. 429–437.



- Baedecker M.J., Cozzarelli I.M., Eganhouse R.P., Siegel D.I., Bennett P.C.** Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer; III, Biogeochemical reactions and mass balance modeling in anoxic groundwaters. *Applied Geochemistry*. 1993. Vol. 8. P. 569–586.
- Bailey R.C.** Trapping of aqueous fluids in the deep crust. *Geophys. Res. Lett.* 1990. Vol. 17. P. 1129–1132.
- Ballentine C.J., Burgess R., Marty B.** Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. In: Porcelli D. et al (eds.), *Noble gases in geochemistry and cosmochemistry*. Washington: Mineralogical society of America, 2002. P. 539–614.
- Barenblatt G.I., Zheltov I.P., Kochina I.N.** Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]. *J. Appl. Math. Mech.* 1960. Vol. 24. P. 1286–1303.
- Berry F., Hanshaw B.B.** Geologic field evidence suggesting membrane properties of shales. *21st Int. Geol. Congr. Abstracts*. Copenhagen, 1960. P. 209.
- Bethke C.M.** Modeling subsurface flow in sedimentary basins. *Geologische Rundschau*. 1989. Vol. 78. P. 129–154.
- Bethke C.M., Harrison W.J., Upson C., Altaner S.P.** Super-computer analysis of sedimentary basins. *Science*. 1988. Vol. 239. P. 261–267.
- Beven K.** On the concept of model structural error. *Water Sci. Technol.* 2005. Vol. 52 (6). P. 167–175.
- Bjørlykke K.** Fluid flow in sedimentary basins. *Sediment Geol.* 1993. Vol. 86 (1). P. 137–158.
- Boggs J.M., Young S.C., Beard L.M., Gelhar L.W., Rehfeldt K.R., Adams E.E.** Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 1, Overview and site description. *Water Resour. Res.* 1992. Vol. 28. P. 3281–3291.
- Bredehoeft J.D.** The conceptualization model problem: surprise. *Hydrogeology J.* 2005. Vol. 13. P. 37–46.
- Bredehoeft J.D., Back W., Hanshaw B.B.** Regional ground-water flow concepts in the United States: historical perspective. *GSA Spec. Pap.* 1982. Vol. 189. P. 295–316.
- Burlakova E.B., Grodzinskiy A.M., Loganovsky K.N., Mousseau T.A., Moller A.P., Naboka M.V., Shestopalov V.M.** Chernobyl and new knowledge about the impact of low doses of radiation. In: *The Chernobyl Disaster*. New York: Nova Science, 2016. P. 63–106.
- Busenberg E., Plummer L.N.** Use of chlorofluorocarbons (CCl<sub>3</sub>F<sub>2</sub> CCL<sub>2</sub> F<sub>2</sub>) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma. *Water Resour. Res.* 1992. Vol. 28. P. 2257–2283.
- Bush I.** An Integrated approach to fracture characterization. *Oil Review Middle East*. 2010. Vol. 2. P. 88–91.
- Butler J.J., Jr., Dietrich P., Wittig V., Christy T.** Characterizing hydraulic conductivity with the direct-push permeameter. *Ground Water*. 2007. Vol. 45. P. 409–419.
- Castany G.** Hydrogeology of deep aquifers. The hydrogeological basin as the basis of groundwater management. *Episodes*. 1981. Vol. 3. P. 18–22.
- Cartwright I., Cendón D., Currell M., Meredith K. A.** Review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations. *Journal of Hydrology*. 2017. Vol. 555. P. 797–811.
- Cathles III L.M., Adams J.J.** Fluid flow and petroleum and mineral resources in the upper (< 20-km) continental crust. In: Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J.P. (eds.), *Economic geology; one hundredth anniversary volume, 1905–2005*. Littleton, CO: Society of Economic Geologists, 2005. P. 77–110.
- Ch S., Mathur S.** Modeling uncertainty analysis in flow and solute transport model using adaptive neuro fuzzy inference system and particle swarm optimization. *J. Civil. Eng.* 2010. Vol. 14 (6). P. 941–951.
- Chaudhuri A., Rajaram H., Wiswanathan H.** Early-stage hypogene karstification in a mountain hydrologic system: A coupled thermohydrochemical model incorporating buoyant convection. *Water Resour. Res.* 2013. Vol. 49. P. 5880.
- Cherry, J.A.** (ed.). Special Issue: Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study. *Journal of Hydrology*. 1983. Vol. 63. 197 p.
- Condie K.C.** Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge: Cambridge University Press, 2001. 320 p.
- Connolly J.A.D.** Devolatilization-generated fluid pressure and deformation-propagated fluid flow during prograde regional metamorphism. *J. Geophys. Res.* 1997. Vol. 102. P. 18149–18173.
- Connolly J.A.D.** The mechanics of metamorphic fluid expulsion. *Elements*. 2010. Vol. 6. P. 165–172.
- Connolly J.A.D., Podladchikov Y.Y.** A hydromechanical model for lower crustal fluid flow. In: Harlov D.E., Austrheim H. (eds.), *Metasomatism and the chemical transformation of rock*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2013. P. 599–658.
- Cooper H.H. Jr., Bredehoeft J.D., Papadopulos I.S., Bennett R.R.** The response of a well-aquifer system to seismic waves. *J. Geophys. Res.* 1965. Vol. 70. P. 3915–3926.
- Craig H.** Isotopic variations in meteoric waters. *Science*. 1961. Vol. 133 (3465). P. 1702–1703.
- Crossey L.J., Fischer T.P., Patchett P.J., Karlstrom K.E., Hilton D.R., Newell D.L., Huntoon P., Reynolds A.C., de Leeuw G.A.M.** Dissected hydrologic system at the Grand Canyon: interaction between deeply derived fluids and plateau aquifer waters in modern springs and travertine. *Geology*. 2006. Vol. 34 (1). P. 25–28.
- Crossey L.J., Karlstrom K.E., Springer A., Newell D., Hilton D.R., Fischer T.** Degassing of mantle-derived CO<sub>2</sub> and 3He from springs in the southern Colorado

Plateau region-flux rates, neotectonics connections, and implications for understanding the groundwater system. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 2009. Vol. 121. P. 1034–1053.

**Crossey L.J., Karlstrom K.E., Schmandt B., Crow R.R., Colman D.R., Cron B., Takacs-Vesbach B.D., Dahm C.N., Northup D.E., Hilton D.R., Ricketts J.W., Lowry A.R.** Continental smokers couple mantle degassing and distinctive microbiology within continents. *Earth Planet. Sci. Lett.* 2016. Vol. 435. P. 22–30.

**Dagan G.** An overview of stochastic modeling of groundwater flow and transport: From theory to applications. *Eos. Trans. Amer. Geophys. Union.* 2002. Vol. 83. P. 621–622.

**Davis S.N., Campbell D., Bentley H.W., Flynn T.** Ground Water Tracers. Worthington, Ohio: National Water Well Association Press, 1985. 200 p.

**Davis S.N., Murphy E.** Dating Ground Water and the Evaluation of Repositories for Radioactive Waste: U.S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-4912, 1987. 81 p.

**de Marsily G., Delay F., Goncalves J., Renard Ph., Teles V., Violette S.** Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology J.* 2005. Vol. 13. P. 161–183.

**Dreybrodt W., Gabrovsek F., Romanov D.** Processes of Speleogenesis: A Modeling Approach. Ljubljana: ZRC Publ. 2005. 376 p.

**Egboka B.C.E., Cherry J.A., Farvolden R.N., Frind E.O.** Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study, 3, Tritium as an indicator of dispersion and recharge. *Journal of Hydrology.* 1983. Vol. 63. P. 51–80.

**El-Kadi A., Plummer N.L., Aggarwal P.** NETPATH-WIN: An interactive user version of the mass-balance model, NETPATH. *Ground Water.* 2011. Vol. 49. P. 593–599.

**Engelder T., Lacazette A.** Natural hydraulic fracturing. In: Barton N., Stephansson O. (eds.), *Rock Joints. Proceedings of the Int. Symp. on rock joints.* Loen, Norway. June 4–6, 1990. Brookfield: A.A. Balkema, 1990. P. 35–43.

**Ernst R.E., Buchan K.L.** (eds.). Mantle plumes: their identification through time. Geological Society of America Special Papers 352. Boulder, Colorado, 2001. 593 p.

**Essaid H.I., Bekins B.A., Kerkelrath W.N., Delin G.N.** Crude oil at the Bemidji site: 25 years of monitoring, modeling, and understanding. *Ground Water.* 2011. Vol. 49. P. 706–726.

**Etheridge M.A., Wall V.J., Vernon R.H.** The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation. *J. Metamorph. Geol.* 1983. Vol. 1. P. 205–226.

**Evans D.M.** The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal Disposal Well. *Mountain Geologist.* 1966. Vol. 3. P. 23–36.

**Fall A., Eichhubl P., Bodnar R., Laubach S., Davis J.S.** Natural hydraulic fracturing of tight-gas sandstone reservoirs, Piceance Basin, Colorado. *GSA Bulletin.* 2015. Vol. 127 (1/2). P. 61–75.

**Feyen L., Caers J.** Quantifying geological uncertainty for flow and transport modeling in multi-model heterogeneous formations. *Adv. Water Res.* 2006. Vol. 29. P. 912–929.

**Ford D.C., Williams P.W.** Karst geomorphology and hydrology. London: Unwin Hyman, 1989. 601 p.

**Foster S.S.D.** Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundwater to Pollutants, RIVM Proc. and Inf.* 38, 1987. P. 69–86.

**Fournier R.O.** The transition from hydrostatic to greater than hydrostatic fluid pressures in presently active continental hydrothermal systems in crystalline rock. *Geophys. Res. Lett.* 1991. Vol. 18. P. 955–958.

**Fraser G.S., Davis J.M.** (eds.). Hydrogeologic Models of Sedimentary Aquifers. Tulsa: Society for Sedimentary Geology, 1998. 188 p.

**Freeze R.A.** A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media: *Water Resour. Res.* 1975. Vol. 11. P. 725–741.

**Freeze R.A., Witherspoon P.A.** Theoretical analysis of regional groundwater flow, 1, Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resour. Res.* 1966. Vol. 2. P. 641–656.

**Freeze R.A., Witherspoon P.A.** Theoretical analysis of regional ground-water flow, 2, Effect of water table configuration and subsurface permeability variations: *Water Resour. Res.* 1967. Vol. 3. P. 623–634.

**Freeze R.A., Witherspoon P.A.** Theoretical analysis of regional groundwater flow, 3, Quantitative interpretations: *Water Res. Res.* 1968. Vol. 4. P. 581–590.

**Fyfe W.S., Price N.J., Thompson A.B.** Fluids in the Earth's crust. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier, 1978. 383 p.

**Galloway D.L.** The complex future of hydrogeology. *Hydrogeology J.* 2010. Vol. 18. P. 807–810.

**Galloway W.E., Hobday D.K.** Depositional systems and basin hydrology. In: Galloway W.E., Hobday D.K. (eds.), *Terrigenous clastic depositional systems.* New York: Springer, 1996. P. 297–326.

**Garrels R.M.** Mineral equilibria at low temperature and pressure. New York: Harper and Brothers, 1960. 254 p.

**Garrels R.M., Christ C.L.** Solutions, Minerals, and Equilibria. San Francisco: Freeman-Cooper, 1965. 450 p.

**Garven G.** The role of regional fluid-flow in the genesis of the Pine Point deposit, western Canada sedimentary basin. *Econ. Geol.* 1985. Vol. 80. P. 307–324.

- Garven G., Appold M.S., Toptygina V.I., Hazlett T.J.** Hydrogeologic modeling of the genesis of carbonate-hosted lead-zinc ores. *Hydrogeology J.* 1999. Vol. 7. P. 108–126.
- Garven G., Ge S., Person M.A., Sverjensky D.A.** Genesis of stratabound ore deposits in the Midcontinent basins of North America, 1, The role of regional groundwater flow. *Amer. J. Sci.* 1993, Vol. 293. P. 497–568.
- Ge S., Garven G.** Hydromechanical modeling of tectonically driven groundwater flow with application to the Arkoma foreland basin. *J. Geophys. Res.* 1992. Vol. 97. P. 9119–9144.
- Gerdes M., Baumgartner L.P., Person M.** Convective flow through heterogeneous country rocks during contact metamorphism. *J. Geophys. Res.* 1998. Vol. 103. P. 23983–24003.
- Gilat A.L., Vol A.** Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geosci. Front.* 2012. Vol. 3 (6). P. 911–921.
- Gilat A.L., Vol A.** Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. *HAIT J. Sci. Eng. B.* 2005. Vol. 2 (1–2). P. 125–167.
- Gibert J., Danielopol D.L., Stanford J.A.** (eds.). *Groundwater Ecology.* London: Academic Press, 1994. 571 p.
- Gorokhovskii V.** Effective Parameters of Hydrogeological Models. Springer Briefs in Earth Sciences. London-New York: Springer, 2012. 153 p.
- Gross M.R., Eyal Y.** Throughgoing fractures in layered carbonate rocks. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 2007. Vol. 119 (11–12). P. 1387–1404.
- Hancock P.J., Hunt R.J., Boulton A.J.** (eds.). *Hydrogeology and groundwater dependent ecosystems: Hydrogeology J.* 2009. Vol. 17. P. 1–259.
- Hanshaw B.B., Back W.** Determination of regional hydraulic conductivity through C dating of ground water. *Mem. l'Association Internationale des Hydrogéologues.* 1974. Vol. X-1. P. 195–196.
- Hanshaw B.B., Back W., Rubin M.** Radiocarbon determinations for estimating groundwater flow velocities in central Florida. *Science.* 1965. Vol. 148. P. 494–495.
- Hantush M.S., Jacob C.E.** Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Transactions, Amer. Geophys. Union.* 1955. Vol. 36. P. 95–100.
- Harbaugh A.W.** MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey's Modular Ground Water Flow Model – The Groundwater Flow Process. *Techniques and Methods 6–A16.* Reston, Virginia: U.S. Geological Survey, 2005.
- Helgeson H.C.** Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions—I. Thermodynamic relations. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 1968. Vol. 32. P. 853–877.
- Hem J.D.** Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. USGS Water-Supply Paper 1473, 1985. 269 p.
- Herold M., Greskowiak J., Ptak T., Promme H.** Modelling of an enhanced PAH attenuation experiment and associated biogeochemical changes at a former gasworks site in southern Germany. *J. Contaminant Hydrology.* 2011. Vol. 119. P. 99–112.
- Hill M.C., Banta E.R., Harbaugh A.B., Anderson E.R.** Modflow – 2000, the US Modular groundwater model: user guide to observation, sensitivity and parameter estimation processes, and three post-processing programs. US geological Survey Open File Report. 2000. Vol. 184. 209 p.
- Hobday D.K., Galloway W.E.** Groundwater processes and sedimentary uranium deposits. *Hydrogeology J.* 1999. Vol. 7. P. 127–138.
- Hsieh P.A., Bredehoeft J.D.** A reservoir analysis of the Denver earthquake: A case of induced seismicity. *J. Geophys. Res.* 1981. Vol. 86. P. 903–920.
- Hubbert M.K.** The theory of ground-water motion. *J. Geol.* 1940. Vol. 48. P. 785–944.
- Hubbert M.K., Rubey W.** Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: Pt. 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1959. Vol. 70. P. 115–166.
- Hughes J.D., Langevin C.D., Banta E.R.** Documentation for the MODFLOW 6 framework: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A57. 2017. 40 p.
- Ibaraki M., Sudicky E.A.** Colloid-facilitated contaminant transport in discretely fractured porous media, 1. Numerical formulation and sensitivity analysis. *Water Resour. Res.* 1995. Vol. 31. P. 2945–2960.
- Ingebritsen S., Gleeson T.** Crustal permeability. *Hydrogeology J.* 2017. Vol. 25. P. 2221–2224.
- Ingebritsen S.E., Appold M.S.** The physical hydrogeology of ore deposits. *Econ. Geol.* 2012. Vol. 107 (4). P. 559–584.
- Ingebritsen S.E., Manning C.E.** Implications of crustal permeability for fluid movement between terrestrial fluid reservoirs. *J. Geochim. Explor.* 2003. Vol. 78–79. P. 1–6.
- Ingebritsen S.E., Manning C.E.** Permeability of the continental crust: dynamic variations inferred from seismicity and metamorphism. *Geofluids.* 2010. Vol. 10 (1–2). P. 193–205.
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E.** *Groundwater in Geologic Processes* (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 2006. 341 p.
- Italiano F., Yuce G., Uysal I.T., Gasparon M., Morelli G.** Insights into mantle-type volatiles contribution from dissolved gases in artesian waters of the Great Artesian Basin, Australia. *Chim. Geol.* 2013. Vol. 378–379. P. 75–88.



- Ivanov S.N., Ivanov K.S.** Hydrodynamic zoning of the Earth's crust and its significance. *J. Geodyn.* 1993. Vol. 17 (4). P. 155–180.
- Ivanovich M., Harmon R.S.** (eds.). Uranium-series Disequilibrium (2nd ed.). Oxford: Clarendon Press, 1992. 910 p.
- Jacob C.E.** Flow of water in an elastic artesian aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Union.* 1940. Vol. 21. P. 574–586.
- Jacob C.E.** Radial flow in a leaky artesian aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Union.* 1946. Vol. 27. P. 198–208.
- Karlstrom K.E., Crossey L.J., Hilton D.R., Barry P.H.** Mantle  $^3\text{He}$  and  $\text{CO}_2$  degassing in carbonic and geothermal springs of Colorado and implications for neotectonics of the Rocky Mountains. *Geology.* 2013. Vol. 41 (4). P. 495–498.
- Kennedy B.M., Van Soest M.C.** Flow of mantle fluids through the ductile lower crust: Helium isotope trends. *Science.* 2007. Vol. 318 (5855). P. 1433–1436.
- Kharaka Y.K., Barnes I.** SOLMNEQ solution mineral equilibrium computations: Menlo Park, Calif., U.S. Geological Survey Computer Contributions, 1973. 82 p.
- Klimchouk A.B.** Large gypsum caves in the Western Ukraine and their genesis. *Cave Science.* 1992. Vol. 19 (1). P. 3–11.
- Klimchouk A.B.** The role of karst in the genesis of sulfur deposits, Pre-Carpathian region, Ukraine. *Environmental Geology.* 1997. Vol. 31 (1/2). P. 1–20.
- Klimchouk A.B.** Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers.* 2004. Vol. 2 (5). P. 1–13.
- Klimchouk A.B.** Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1. Carlsbad, New Mexico: Natl. Cave and Karst Res. Inst. 2007. 106 p.
- Klimchouk A.B.** The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta Carsologica.* 2015. Vol. 44 (3). P. 289–313.
- Klimchouk A.** Types and settings of hypogene karst. In: Klimchouk, A., N. Palmer, A., De Waele, J., Auler, A.S., Audra, P. (eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World.* Cham: Springer International Publishing AG, 2017. P. 1–39.
- Klimchouk A., Andreychuk V.** Karst breakdown mechanisms from observations in the gypsum caves of the Western Ukraine: implications for subsidence hazard assessment. *Environmental Geology.* 2005. Vol. 48. P. 336–359.
- Klimchouk A., Andreychouk V.** Gypsum karst in the south-west outskirts of the Eastern-European platform (Western Ukraine): a type region of artesian transverse speleogenesis. In: Klimchouk, A., N. Palmer, A., De Waele, J., Auler, A.S., Audra, P. (eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World.* Cham: Springer International Publishing AG, 2017. P. 363–385.
- Klimchouk A.B., Birk S.** Speleogenesis in cratonic multi-storey artesian systems: conceptual and numerical models. EGU General Assembly 2006. Geophysical Research Abstracts. 2006. Vol. 8. Paper EGU06-A-05888.
- Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N., Dreybrodt W.** (eds.) Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers. Huntsville (AL): National Speleological Society, 2000. 527 p.
- Klimchouk A.B., Palmer A.N., Waele J. De, Auler A.S., Audra P.** (eds.). Hypogene Karst Regions and Caves of the World. Cham: Springer International Publishing AG, 2017. 911 p.
- Konikow L.F.** Process and rate of dedolomitization: Mass transfer and  $^{14}\text{C}$  dating in a regional carbonate aquifer: Extended interpretation. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1985. Vol. 96. P. 1096–1098.
- Konikow L.F., Patten E.P.** Groundwater forecasting. In: Anderson M.G., Burt T.P. (eds.), *Hydrological Forecasting.* John Wiley and Sons Ltd., 1985. P. 221–270.
- Kühn M.** Reactive Flow Modeling of Hydrothermal Systems. Springer Science & Business Media. 2004. Vol. 22. 261 p.
- Kulongoski J.T., Hilton D.R.** Applications of Groundwater Helium. In: Baskaran M. (ed.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Advances in Isotope Geochemistry.* Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2011. P. 285–304.
- Kulongoski J.T., Hilton D.R., Izbicki J.A.** Source and movement of helium in the eastern Morongo groundwater Basin: the influence of regional tectonics on crustal and mantle helium fluxes. *Geochim. Cosmochim. Acta.* 2005. Vol. 69 (15). P. 3857–3872.
- Kyser K., Hiatt E.E.** Fluids in Sedimentary Basins: an Introduction. *J. Geochem. Explor.* 2003. Vol. 80. P. 139–149.
- Larson R.L.** Geological consequences of superplumes. *Geology.* 1991. Vol. 19 (10). P. 963–966.
- Laubach S.E., Olson J.E., Gross M.R.** Mechanical and fracture stratigraphy. *AAPG Bulletin.* 2012. Vol. 93 (11). P. 1413–1426.
- Llamas R.** Water and ethics: use of groundwater. UNESCO Series on Water and Ethics, Essay 7. New York: UNESCO, 2004. 33 p.
- Llamas M.R., Cruces de Abia J.** Conceptual and digital models of the ground water flow in the Tertiary basin of the Tagus River (Spain). In: *Proceedings of the international hydrogeological conference.* Budapest, 1978. P. 186–202.
- López D.L., Smith L.** Fluid flow in fault zones: Analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow. *Water Resour. Res.* 1995. Vol. 31. P. 1489–1503.

- Lowe D.J.** The origin of limestone caverns: an inception horizon hypothesis. Ph.D. thesis. Manchester: Manchester Polytechnic University, 1992. 511 p.
- Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E., Elkhoury J.E., Elsworth D., Ingebritsen S.E., Mays D.C., Wang C-Y.** Changes in permeability caused by transient stresses: field observations, experiments, and mechanisms. *Rev. Geophys.* 2012. Vol. 50 (2). 24 p.
- Maxey G.B.** Hydrostratigraphic units. *Journal of Hydrology.* 1964. Vol. 2. P. 124–129.
- Meinzer O.E.** Compressibility and elasticity of artesian aquifers. *Econ. Geol.* 1928. Vol. 23. P. 263–291.
- Meinzer O.E.** Land subsidence caused by pumping. *Eng. News Rec.* 1937. Vol. 18. P. 715.
- Morgan W.J.** Convection plumes in the lower mantle. *Nature.* 1971. Vol. 230. P. 42–43.
- Moss I.L., Cartwright J., Moore B.** Evidence of fluid migration following pockmark formation: Examples from the Nile Deep Sea Fan. *Marine Geology.* 2012. Vol. 303–306. P. 1–13.
- Narasimhan T.N.** Hydrogeology in North America: past and future. *Hydrogeology J.* 2005. Vol. 13. P. 7–24.
- Newell D.L., Crossey L.J., Karlstrom K.E., Fischer T.P., Hilton D.R.** Continental-scale links between the mantle and groundwater systems of the western United States: evidence from travertine springs and regional He data. *GSA Today.* 2005. Vol. 15 (12). P. 4–10.
- Norton D.** Theory of Hydrothermal Systems. *Annual Rev. Earth and Planetary Sci.* 1984. Vol. 12. P. 155–177.
- Palmer C.** The geochemical interpretation of water analyses. *U.S. Geol. Surv. Bull.* 1911. Vol. 479. P. 5–31.
- Pankow J.E., Cherry J.A.** Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior, and Remediation. Waterloo, Canada: Waterloo Press, 1996. 526 p.
- Parkhurst D.L., Appelo C.A.J.** User's guide to PHREEQC (Version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99–4259. 1999. 312 p.
- Parkhurst D.L., Kipp K.L., Charlton S.R.** PHAST Version 2—A Program for Simulating Groundwater Flow, Solute Transport, and Multicomponent Geochemical Reactions: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A35. 2010. 235 p.
- Parkhurst D.L., Plummer L.N., Thorstenson D.C.** BALANCE—A Computer Program for Calculation of Chemical Mass Balance: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 82–14. 1982. 29 p.
- Parkhurst D.L., Thorstenson D.C., Plummer L.N.** PHREEQE: A Computer Program for Geochemical Calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 80–96. 1980. 210 p.
- Person M., Garven G.** A sensitivity study of the driving forces on fluid flow during continental-rift basin evolution. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1994. Vol. 106. P. 461–475.
- Phillips F.M.** Groundwater dating and isotope chemistry. In: *Hydrologic sciences: Taking stock and looking ahead.* Washington, D.C.: National Academy Press, 1998. P. 87–100.
- Phillips W.J.** Hydraulic fracturing and mineralization. *J. Geol. Soc.* 1972. Vol. 128 (4). P. 337–359.
- Piper A.M.** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Trans. Amer. Geophys. Union.* 1944. Vol. 25. P. 914–923.
- Plummer L.N., Jones B.F., Truesdell A.H.** WATEQF a Fortran IV version of WATEQ a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. U.S. Geological Survey Water-Resources-Investigations Report 76–13. 1976. 61 p.
- Plummer L.N., Prestemon E.C., Parkhurst D.L.** An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flow path, Ver. 2.0. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report. 1994. Vol. 94 (4169).
- Poeter E., Gaylord D.R.** Influence of aquifer heterogeneity on contaminant transport at the Hanford Site. *Ground Water.* 1990. Vol. 28. P. 900–909.
- Pruess K.** The TOUGH Codes—A family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media. *Vadose Zone Journal.* 2004. Vol. 3. P. 738–746.
- Questiaux J.-M., Couples G.D., Nicolas R.** Fractured reservoirs with fracture corridors. *Geophys. Prosp.* 2010. Vol. 58. P. 279–295.
- Raleigh C.B., Healy J.H., Bredehoeft J.D.** An experiment in earthquake control at Rangely. *Colorado Sci.* 1976. Vol. 191. P. 1230–1237.
- Rajaram H., Cheung W., Chaudhuri A.** Natural analogs for improved understanding of coupled processes in engineered earth systems: examples from karst system evolution. *Current Science.* 2009. Vol. 97 (8). P. 1162–1176.
- Rappleye H.S.** Recent areal subsidence found in releveling. *Eng. News Rec.* 1933. Vol. 110. P. 845.
- Rehfeldt K.R., Boggs J.M., Gelhar L.W.** Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 3, Geostatistical analysis of hydraulic conductivity. *Water Resour. Res.* 1992. Vol. 28. P. 3309–3324.
- Rehrl C., Birk S., Klimchouk A.B.** Conduit evolution in deep-seated settings: Conceptual and numerical models based on field observations. *Water Resour. Res.* 2008. Vol. 44. W11425.
- Rehrl C., Birk S., Klimchouk A.B.** Influence of initial aperture variability on conduit development in hypogene settings. *Zeitschrift für Geomorphologie.* 2010. Vol. 54 (2). P. 237–258.

- Renick B.C.** Base exchange in ground water by silicates as illustrated in Montana. U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper 520-D. 1924.
- Roeloffs E.** Hydrologic precursors to earthquakes: A review. *Pure and Applied Geophysics*. 1988. Vol. 126. P. 171–209.
- Rogers G.S.** Chemical relationships of the oil-field waters in San Joaquin Valley, California. U.S. Geol. Surv. Bull. 1917. Vol. 653. 119 p.
- Rojstaczer S.A., Bredehoeft J.D.** Groundwater and fault strength. In: Back, W. et al. (eds.), *Hydrogeology. Geology of North America*, v. O-2. Boulder, Colorado: Geological Society of America, 1988. P. 447–460.
- Rojstaczer S.A., Ingebritsen S.E., Hayba D.D.** Permeability of continental crust influenced by internal and external forcing. *Geofluids*. 2008. Vol. 8. P. 128–139.
- Rojstaczer S.A., Wolf S., Michel R.** Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake-induced hydrological changes. *Nature*. 1995. Vol. 373. P. 237–239.
- Rubin J., James R.V.** Dispersion-affected transport of reacting solutes in saturated porous media; Galerkin method applied to equilibrium-controlled exchange in unidirectional steady water flow. *Water Resour. Res.* 1973. Vol. 9. P. 1332–1356.
- Sanford W.E., Wood W.W.** Brine evolution and mineral deposition in hydrologically open evaporate basins. *Amer. J. Sci.* 1991. Vol. 291. P. 687–710.
- Schwartz F.W., Ibaraki M.** Hydrogeological research: Beginning of the end or end of the beginning? *Ground Water*. 2001. Vol. 39 (4). P. 492–498.
- Sharp J.M. Jr., Domenico P.A.** Energy transport in thick sequences of compacting sediment. *Geol. Soc. Amer. Bull.* 1976. Vol. 87. P. 390–400.
- Sherwood-Lollar B., Ballentine C.J., O’Nions R.K.** The fate of mantle-derived carbon in a continental sedimentary basin: integration of C/He relationships and stable isotopic signatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1997. Vol. 61 (11). P. 2295–2307.
- Shestopalov V.** (ed.). Chernobyl Disaster and Groundwater. CRC Press, 2002. 289 p.
- Shestopalov V., Bohuslavsky A., Bublias V.** Groundwater Vulnerability. Chernobyl Nuclear Disaster. USA: AGU-Wiley, 2015. 136 p.
- Shmulovich K.I., Yardley B.W.D., Gontchar G.G.** Fluids in the crust. London: Chapman & Hall, 1994. 323 p.
- Shoemaker W.B., Kuniansky E.L., Birk S., Bauer S., Swain E.D.** Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005: USGS Techniques and Methods, 6-A24. 2007. 50 p.
- Sudicky E.A., Illman W.A.** Lessons learned from a suite of CFB Borden experiments. *Ground Water*. 2011. Vol. 49. P. 630–648.
- Singh S.K., Abu-Habbiel H., Khan B.** Mapping fracture corridors in naturally fractured reservoirs: an example from Middle East carbonates. *First Break*. 2008. Vol. 26 (5). P. 109–113.
- Smith L.J., Schwartz F.W.** Mass transport, 2, Analysis of uncertainty in prediction. *Water Resour. Res.* 1981. Vol. 17. P. 351–369.
- Stanford J.A., Simons J.J.** (eds.). Proceedings of the First International Conference on Ground Water Ecology, Tampa, Florida, April 26–29, 1992. U.S. EPA, American Water Resources Association, and the Ecological Society of America, 1992. 419 p.
- Stumm W., Morgan J.J.** Aquatic Chemistry. New York: Wiley, 1970. 583 p.
- Sun R.J., Johnson R.H.** Regional Aquifer System Analysis Program of the U.S. Geological Survey, 1978–1992. U.S. Geological Survey. Circular 1099. 1994.
- Terzaghi K.** Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungsercheinungen. *Sitz. Akad. Wissen. Wien. Math-naturw. Kl., Part Iia*. 1923. Vol. 32. P. 125–138.
- Theis C.V.** The relation between the lowering of the lowering of the piezometric surface and the rate and discharge of a well using ground water storage. *Trans. Amer. Geophys. Union*. 1935. Vol. 16. P. 519–524.
- Tolstikhin I.N.** Helium isotopes in the Earth’s interior and in the atmosphere; a degassing model of the Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.* 1975. Vol. 26. P. 88–96.
- Tóth J.** A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *J. Geophys. Res.* 1962. Vol. 67. P. 4375–4387.
- Tóth J.** A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basin. *J. Geophys. Res.* 1963. Vol. 68. P. 4795–4812.
- Tóth J.** Ground water and hydrocarbon migration. In: Back, W., Rosenshein J.S., Seaber P.R. (eds.), *Hydrogeology. Geology of North America*, vol. O-2. Boulder CO: Geological Society of America, 1988. P. 485–502.
- Tóth J.** Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology J.* 1995. Vol. 3 (4). P. 4-15.
- Tóth J.** Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. 309 p.
- Truesdell A.H., Jones B.F.** WATEQ a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. *U.S. Geol. Surv. J. Res.* 1974. Vol. 2. P. 233–248.
- US Geological Survey.** Facing tomorrow’s challenges: U.S. Geological Survey science in the decade 2007–2017. US Geol. Surv. Circ 1309. 2007.
- Voss C.I.** The future of hydrogeology. *Hydrogeology J.* 2005. Vol. 13. P. 1–6.



**Vrba J., Zaporozec A.** (eds.). Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeology. Vol. 16. Hanover: Heise, 1994. 131 p.

**Wan J., Wilson J.L.** Visualization of the role of the gas-water interface on the fate and transport of colloids in porous media. *Water Resour. Res.* 1994. Vol. 30. P. 11–23.

**Wang C-Y., Manga M.** Earthquakes and water. Lecture Notes in Earth Sciences, 114. Berlin: Springer, 2010. 218 p.

**Warren J.K.** Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 2006. 1036 p.

**Webb E.K., Anderson M.P.** Simulation of preferential flow in three-dimensional heterogeneous conductivity fields with realistic internal architecture: *Water Resour. Res.* 1996. Vol. 32. P. 533–546.

**Weinlich F.N., Tesar J., Weise S.M.** Gas flux distribution in mineral springs and tectonic structures in the western Eger Rift. *J. Czech. Geol. Soc.* 1998. Vol. 43(1–2). P. 91–110.

**Wilson J.T.** A Possible origin of the Hawaiian islands. *Can. J. Phys.* 1963. Vol. 41. P. 863–870.

**Winter T.C., Harvey J.C., Franke O.L., Alley W.M.** Ground Water and Surface Water, a Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139. 1998. 79 p.

**White D.E.** Saline waters of sedimentary rocks. *Amer. Assoc. Petroleum Geol. Mem.* 1965. Vol. 4. P. 342–366.

**Winograd I.J.** Radioactive waste disposal in thick unsaturated zones. *Science.* 1981. Vol. 212. P. 1457–1464.

**Worthington S.R.H., Davies G.J., Alexander E.C. Jr.** Enhancement of bedrock permeability by weathering. *Earth-Sci. Rev.* 2016. Vol. 160. P. 188–202.

**Worthington S.R.H., Ford D.C., Beddows P.** Porosity and permeability enhancement in unconfined carbon-

ate aquifers as a result of solution. In: Klimchouk A., Ford D., Palmer A., Dreybrodt W. (eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Soc., 2000. P. 423–432.

**Wray R.A.L., Sauro F.** An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Sci. Rev.* 2017. Vol. 171. P. 520–557.

**Yardley B.W., Bodnar R.J.** Fluids in the continental crust. *Geochim. Perspect.* 2014. Vol. 3 (1). P. 1–123.

**Yuen D.A., Maruyama S., Karato S.-I., Windley B.F.** (eds.). Superplumes: Beyond Plate Tectonics. Netherlands: Springer, 2007. 569 p.

**Zhou Y., Li W.** A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers.* 2011. Vol. 2 (2). P. 205–214.

**Zheng C., Bianchi M., Gorelick S.M.** Lessons learned from 25 years of research at the MADE site. *Ground Water.* 2011. Vol. 49. P. 649–662.

**Zheng C., Wang P.P.** MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide, Contract Report SERDP-99-1. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineers Research and Development Center, 1999. 202 p.

**Zlotnik V.A., Zurbuchen B.R., Ptak T.** The Steady-State Dipole Flow Test for Characterization of Hydraulic Conductivity Statistics in a Highly Permeable Aquifer: Horkheimer Insel Site, Germany. *Ground Water.* 2001. Vol. 39. P. 504–516.

**Zwahlen F.** (ed.). Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report COST Action 620. Luxemburg: European Commission, Directorate, 2004. 315 p.

## References

**Abramov S.K., Bindemann N.N., Bochever F.M., Verigin N.N.**, 1960. Influence of water reservoirs on hydrogeological conditions of adjacent territories. Moscow: Gosstroyizdat, 319 p. (in Russian).

**Adams E.E., Gelhar L.W.**, 1992. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 2, Spatial moments analysis. *Water Resour. Res.*, vol. 28, p. 3293–3307 (in English).

**Ague J.J.**, 2003. Fluid flow in the deep crust. In: Holland H.D., Turekian K.K. (eds). *Treatise on geochemistry*, vol. 3, Amsterdam: Elsevier, p. 203–247 (in English).

**American Geological Institute**, 2008. Federal research funding of geosciences. *Geoscience Currents* 14. Alexandria, VA: American Geological Institute, [Электронный ресурс]. Режим доступа: <http://www.agiweb.org/workforce/Currents-014-GeoscienceFederalResearchFunding.pdf> (20 липня 2018) (in English).

**Andersen K.J.**, 2012. Fluid flow features in hydrocarbon plumbing systems: What do they tell us about the basin evolution? *Marine Geology*, vol. 332–334, p. 89–108 (in English).

**Anderson M.P.**, 1983. Ground water modeling—The emperor has no clothes. *Ground Water*, vol. 21, p. 666–669 (in English).

**Anderson M.P.**, 1989. Hydrogeologic facies models to delineate large-scale spatial trends in glacial and glaciofluvial sediment. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 101, p. 501–511 (in English).

**Anderson M.P.**, 1997. Characterization of geological heterogeneity: Subsurface flow and transport: A stochastic approach. New York: Cambridge University Press, p. 23–43 (in English).

**Anderson M.P.**, 2008. Groundwater: Benchmark Papers in Hydrology, no. 3. Wallingford, UK: IAHS, 625 p. (in English).

- Anderson M.P., McCray, J.**, 2011. Lessons learned from legacy research sites. *Ground Water*, vol. 49, p. 617–619 (in English).
- Anderson M.P., Siegel D.I.**, 2013. Seminal advances in hydrogeology, 1963 to 2013: The O.E. Meinzer Award legacy. In: Bickford, M.E. (ed.), *The Web of Geological Sciences: Advances, Impacts, and Interactions*. GSA Special Paper 500, p. 463–500 (in English).
- Babinets A.E.**, 1961. Groundwater of the southwestern part of Russian platform. Kiev: AN Ukr. SSR Publ., 378 p. (in Russian).
- Babinets A.E., Belyavskiy G.A.**, 1973. Natural groundwater resources in the zone of intense water exchange in Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 111 p. (in Russian).
- Babinets A.E., Shestopalov V.M., Moiseeva N.P., Lyutiy G.G., Ishchenko A.P., Suleimanov S.P., Gudzenko V.V., Usov V.Yu., Koynov I.M., Gavrilyuk G.Z., Lisichenko G.V., Yasevich A.P.**, 1986. Curative mineral water of the «Naftusya» type. Kiev: Naukova Dumka, 192 p. (in Russian).
- Babinets A.E., Sukhorebriy A.A.**, 1981. On hydrogeochemical features of the bottom sediments of the estuaries in the northwestern part of the Black Sea coast. *Geologichnyy zhurnal*, № 2 (197), p. 104–111 (in Russian).
- Back W.**, 1960. Origin of hydrochemical facies of groundwater in the Atlantic Coastal Plain. Rept. 21st Session, Int. Sci. Cong., Part 1. Copenhagen, p. 87–95 (in English).
- Back W., Freeze R.A.**, 1983. Chemical hydrogeology. Stroudsburg, PA: Hutchinson Ross Publishing Co., 1983, 416 p. (in English).
- Baedecker M.J., Back W.**, 1979. Hydrogeological processes and chemical reactions at a landfill. *Ground Water*, vol. 17, p. 429–437 (in English).
- Baedecker M.J., Cozzarelli I.M., Eganhouse R.P., Siegel D.I., Bennett P.C.**, 1993. Crude oil in a shallow sand and gravel aquifer; III, Biogeochemical reactions and mass balance modeling in anoxic groundwaters. *Applied Geochemistry*, vol. 8, p. 569–586 (in English).
- Bailey R.C.**, 1990. Trapping of aqueous fluids in the deep crust. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 17, p. 1129–1132 (in English).
- Ballentine C.J., Burgess R., Marty B.**, 2002. Tracing fluid origin, transport and interaction in the crust. In: Porcelli D. et al (eds.), *Noble gases in geochemistry and cosmochemistry*. Washington: Mineralogical society of America, p. 539–614 (in English).
- Barenblatt G.I., Zheltov I.P., Kochina I.N.**, 1960. Basic concepts in the theory of seepage of homogeneous liquids in fissured rocks [strata]. *J. Appl. Math. Mech.*, vol. 24, p. 1286–1303 (in English).
- Belenitskaya G.A.**, 2011. «Fluid» direction of lithology: state, objects, tasks. *Uchenye zapiski Kazanskogo Universiteta*, № 153 (4), p. 97–113 (in Russian).
- Belousova A.P., Gavich I.K., Lisenkov A.B., Popov E.V.**, 2006. Environmental hydrogeology. Moscow: Akademkniga, 400 p. (in Russian).
- Berry F., Hanshaw B.B.**, 1960. Geologic field evidence suggesting membrane properties of shales. 21st Int. Geol. Congress, Abstracts. Copenhagen, 209 p. (in English).
- Bethke C.M.**, 1989. Modeling subsurface flow in sedimentary basins. *Geologische Rundschau*, vol. 78, p. 129–154 (in English).
- Bethke C.M., Harrison W.J., Upson C., Altaner S.P.**, 1988. Super-computer analysis of sedimentary basins. *Science*, vol. 239, p. 261–267 (in English).
- Beven K.**, 2005. On the concept of model structural error. *Water Sci. Technol.*, vol. 52 (6), p. 167–175 (in English).
- Bjørlykke K.**, 1993. Fluid flow in sedimentary basins. *Sediment Geol.*, vol. 86 (1), p. 137–158 (in English).
- Bochever F.M.**, 1968. Theory and practical methods for hydrogeological calculations of the exploitable groundwater reserves. Moscow: Nedra, 328 p. (in Russian).
- Bochever F.M., Verigin N.N.**, 1961. Methodological guidelines for calculations of exploitable groundwater reserves for water supply. Moscow: Gosstroizdat, 198 p. (in Russian).
- Boggs J.M., Young S.C., Beard L.M., Gelhar L.W., Rehfeldt K.R., Adams E.E.**, 1992. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 1, Overview and site description. *Water Resour. Res.*, vol. 28, p. 3281–3291 (in English).
- Borevskiy B.V., Hordikainen M.A., Yazvin L.S.**, 1976. Exploration and assessment of exploitable reserves of the groundwater fields in the fractured-karst formations. Moscow: Nedra, 248 p. (in Russian).
- Bredehoeft J.D.**, 2005. The conceptualization model problem: surprise. *Hydrogeology J.*, vol. 13, p. 37–46 (in English).
- Bredehoeft J.D., Back W., Hanshaw B.B.**, 1982. Regional ground-water flow concepts in the United States: historical perspective. *GSA Spec. Pap.*, vol. 189, p. 295–316 (in English).
- Burlakova E.B., Grodzinskiy A.M., Loganovskiy K.N., Mousseau T.A., Moller A.P., Naboka M.V., Shestopalov V.M.**, 2016. Chernobyl and new knowledge about the impact of low doses of radiation. In: *The Chernobyl Disaster*. New York: Nova Science, p. 63–106 (in English).
- Busenberg E., Plummer L.N.**, 1992. Use of chlorofluorocarbons (CCl<sub>3</sub>F<sub>2</sub> CCL<sub>2</sub> F<sub>2</sub>) as hydrologic tracers and age-dating tools: The alluvium and terrace system of central Oklahoma. *Water Resour. Res.*, vol. 28, p. 2257–2283 (in English).

- Bush I.**, 2010. An Integrated approach to fracture characterization. *Oil Review Middle East.*, vol. 2, p. 88–91 (in English).
- Butler J.J., Jr., Dietrich P., Wittig V., Christy T.**, 2007. Characterizing hydraulic conductivity with the direct-push permeameter. *Ground Water*, vol. 45, p. 409–419 (in English).
- Cartwright I., Cendón D., Currell M., Meredith K. A.**, 2017. Review of radioactive isotopes and other residence time tracers in understanding groundwater recharge: Possibilities, challenges, and limitations. *Journal of Hydrology*, vol. 555, p. 797–811 (in English).
- Castany G.**, 1981. Hydrogeology of deep aquifers. The hydrogeological basin as the basis of groundwater management. *Episodes*, vol. 3, p. 18–22 (in English).
- Cathles III L.M., Adams J.J.**, 2005. Fluid flow and petroleum and mineral resources in the upper (< 20-km) continental crust. In: Hedenquist J.W., Thompson J.F.H., Goldfarb R.J.P. (eds.), *Economic geology; one hundredth anniversary volume, 1905–2005*. Littleton, CO: Society of Economic Geologists, p. 77–110 (in English).
- Ch S., Mathur S.**, 2010. Modeling uncertainty analysis in flow and solute transport model using adaptive neuro fuzzy inference system and particle swarm optimization. *J. Civil. Eng.*, vol. 14 (6), p. 941–951 (in English).
- Chaudhuri A., Rajaram H., Wiswanathan H.**, 2013. Early-stage hypogene karstification in a mountain hydrologic system: A coupled thermohydrochemical model incorporating buoyant convection. *Water Resour. Res.*, vol. 49, p. 5880 (in English).
- Chekalyuk E.B.**, 1965. Thermodynamics of the oil reservoir. Moscow: Nedra, 195 p. (in Russian).
- Cherdyntsev V.V.**, 1969. Uranium-234. Moscow: Atomizdat, 308 p. (in Russian).
- Cherry, J.A.** (ed.), 1983. Special Issue: Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study. *Journal of Hydrology*, vol. 63, 197 p. (in English).
- Classification** of mineral waters of Ukraine, 2003. (Ed. V.M. Shestopalov). Kiev: Makkom, 121 p. (in Russian).
- Condie K.C.**, 2001. Mantle plumes and their record in Earth history. Cambridge: Cambridge University Press, 320 p. (in English).
- Connolly J.A.D.**, 1997. Devolatilization-generated fluid pressure and deformation-propagated fluid flow during prograde regional metamorphism. *J. Geophys. Res.*, vol. 102, p. 18149–18173 (in English).
- Connolly J.A.D.**, 2010. The mechanics of metamorphic fluid expulsion. *Elements*, vol. 6, p. 165–172 (in English).
- Connolly J.A.D., Podladchikov Y.Y.**, 2013. A hydromechanical model for lower crustal fluid flow. In: Harlov D.E., Austrheim H. (eds.), *Metasomatism and the chemical transformation of rock*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, p. 599–658 (in English).
- Cooper H.H. Jr., Bredehoeft J.D., Papadopoulos I.S., Bennett R.R.**, 1965. The response of a well-aquifer system to seismic waves. *J. Geophys. Res.*, vol. 70, p. 3915–3926 (in English).
- Craig H.**, 1961. Isotopic variations in meteoric waters. *Science*, vol. 133 (3465), p. 1702–1703 (in English).
- Crossey L.J., Fischer T.P., Patchett P.J., Karlstrom K.E., Hilton D.R., Newell D.L., Huntoon P., Reynolds A.C., de Leeuw G.A.M.**, 2006. Dissected hydrologic system at the Grand Canyon: interaction between deeply derived fluids and plateau aquifer waters in modern springs and travertine. *Geology*, vol. 34 (1), p. 25–28 (in English).
- Crossey L.J., Karlstrom K.E., Schmandt B., Crow R.R., Colman D.R., Cron B., Takacs-Vesbach B.D., Dahm C.N., Northup D.E., Hilton D.R., Ricketts J.W., Lowry A.R.**, 2016. Continental smokers couple mantle degassing and distinctive microbiology within continents. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 435, p. 22–30 (in English).
- Crossey L.J., Karlstrom K.E., Springer A., Newell D., Hilton D.R., Fischer T.**, 2009. Degassing of mantle-derived CO<sub>2</sub> and 3He from springs in the southern Colorado Plateau region—flux rates, neotectonics connections, and implications for understanding the groundwater system. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 121, p. 1034–1053 (in English).
- Dagan G.**, 2002. An overview of stochastic modeling of groundwater flow and transport: From theory to applications. *Eos. Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 83, p. 621–622 (in English).
- Davis S.N., Campbell D., Bentley H.W., Flynn T.**, 1985. Ground Water Tracers. Worthington, Ohio: National Water Well Association Press, 200 p. (in English).
- Davis S.N., Murphy E.**, 1987. Dating Ground Water and the Evaluation of Repositories for Radioactive Waste: U.S. Nuclear Regulatory Commission Report NUREG/CR-4912, 81 p. (in English).
- de Marsily G., Delay F., Goncalves J., Renard Ph., Teles V., Violette S.**, 2005. Dealing with spatial heterogeneity. *Hydrogeology J.*, vol. 13, p. 161–183 (in English).
- Degassing** of the Earth and the genesis of hydrocarbon fluids and deposits, 2010. Moscow: GEOS, 712 p. (in Russian).
- Degassing** of the Earth and the genesis of hydrocarbon fluids and deposits, 2002. Moscow: GEOS, 370 p. (in Russian).
- Dmitrievskiy A.N., Valyaev B.M.**, 2002. Hydrocarbon degassing through the ocean floor: localized manifestations, scale, significance. In: *Degassing of the Earth and the genesis of hydrocarbon fluids and deposits*. Moscow: GEOS, p. 7–36 (in Russian).
- Dobretsov N.N.**, 1997. Mantle superplumes as a cause of the main geological periodicity and global reorganizations. *Doklady RAN*, vol. 357, No. 6, p. 797–800 (in Russian).



- Dreybrodt W., Gabrovsek F., Romanov D.**, 2005. Processes of Speleogenesis: A Modeling Approach. Ljubljana: ZRC Publishing, 376 p. (in English).
- Dyunin V.I., Korzun V.I.**, 2005. Hydrogeodynamics of the oil- and gas basins. Moscow: Nauchnyy mir, 524 p. (in Russian).
- Dyunin V.I.**, 2000. Hydrogeodynamics of deep horizons of the oil- and gas basins. Moscow: Nauchnyy mir, 465 p. (in Russian).
- Egboka B.C.E., Cherry J.A., Farvolden R.N., Frind E.O.**, 1983. Migration of contaminants in groundwater at a landfill: A case study, 3, Tritium as an indicator of dispersion and recharge. *Journal of Hydrology*, vol. 63, p. 51–80 (in English).
- El-Kadi A., Plummer N.L., Aggarwal P.**, 2011. NETPATH-WIN: An interactive user version of the mass-balance model, NETPATH. *Ground Water*, vol. 49, p. 593–599 (in English).
- Ergelder T., Lacazette A.**, 1990. Natural hydraulic fracturing. In: Barton N., Stephansson O. (eds.), *Rock Joints. Proceedings of the int. symp. on rock joints*. Loen, Norway. June 4–6, Brookfield: A.A. Balkema, p. 35–43 (in English).
- Ernst R.E., Buchan K.L.** (eds.), 2001. Mantle plumes: their identification through time. Geological Society of America Special Papers 352. Boulder, Colorado, 593 p. (in English).
- Essaid H.I., Bekins B.A., Kerkelrath W.N., Delin G.N.**, 2011. Crude oil at the Bemidji site: 25 years of monitoring, modeling, and understanding. *Ground Water*, vol. 49, p. 706–726 (in English).
- Etheridge M.A., Wall V.J., Vernon R.H.**, 1983. The role of the fluid phase during regional metamorphism and deformation. *J. Metamorph. Geol.*, vol. 1, p. 205–226 (in English).
- Evans D.M.**, 1966. The Denver area earthquakes and the Rocky Mountain Arsenal Disposal Well. *Mountain Geologist*, vol. 3, p. 23–36 (in English).
- Fall A., Eichhubl P., Bodnar R., Laubach S., Davis J.S.**, 2015. Natural hydraulic fracturing of tight-gas sandstone reservoirs, Piceance Basin, Colorado. *GSA Bulletin*, vol. 127 (1/2), p. 61–75 (in English).
- Ferronskiy V.I., Dubinchuk V.T., Polyakov V.A., Seletskiy Yu.B., Kuptsov V.M., Yakubovskiy A.V.**, 1975. Natural isotopes of the hydrosphere. Moscow: Nedra, 280 p. (in Russian).
- Feyen L., Caers J.**, 2006. Quantifying geological uncertainty for flow and transport modeling in multi-model heterogeneous formations. *Adv. Water Res.*, vol. 29, p. 912–929 (in English).
- Ford D.C., Williams P.W.**, 1989. Karst geomorphology and hydrology. London: Unwin Hyman, 601 p. (in English).
- Forecast** of water inflows to the mine workings and groundwater intakes in fractured and karstified rocks, 1972. Moscow: Nedra, 196 p. (in Russian).
- Foster S.S.D.**, 1987. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. *Atti Int. Conf. Vulnerab. of Soil and Groundwater to Pollutants*, RIVM Proc. and Inf. 38, p. 69–86 (in English).
- Fournier R.O.**, 1991. The transition from hydrostatic to greater than hydrostatic fluid pressures in presently active continental hydrothermal systems in crystalline rock. *Geophys. Res. Lett.*, vol. 18, p. 955–958 (in English).
- Fraser G.S., Davis, J.M.** (eds.), 1998. Hydrogeologic Models of Sedimentary Aquifers. Tulsa: Society for *Sedimentary Geology*, 188 p. (in English).
- Freeze R.A.**, 1975. A stochastic-conceptual analysis of one-dimensional groundwater flow in nonuniform homogeneous media: *Water Resour. Res.*, vol. 11, p. 725–741 (in English).
- Freeze R.A., Witherspoon P.A.**, 1967. Theoretical analysis of regional ground-water flow, 2, Effect of water table configuration and subsurface permeability variations. *Water Resour. Res.*, vol. 3, p. 623–634 (in English).
- Freeze R.A., Witherspoon P.A.**, 1968. Theoretical analysis of regional groundwater flow, 3, Quantitative interpretations. *Water Resour. Res.*, vol. 4, p. 581–590 (in English).
- Freeze R.A., Witherspoon P.A.**, 1966. Theoretical analysis of regional groundwater flow, 1, Analytical and numerical solutions to the mathematical model. *Water Resour. Res.*, vol. 2, p. 641–656 (in English).
- Fyfe W.S., Price N.J., Thompson A.B.**, 1978. Fluids in the Earth's crust. Amsterdam-Oxford-New York: Elsevier, 383 p. (in English).
- Galloway D.L.**, 2010. The complex future of hydrogeology. *Hydrogeology J.*, vol. 18, p. 807–810 (in English).
- Galloway W.E., Hobday D.K.**, 1996. Depositional systems and basin hydrology. In: Galloway W.E., Hobday D.K. (eds.), *Terrigenous clastic depositional systems*. New York: Springer, p. 297–326 (in English).
- Garmonov I.V., Ivanov A.V., Nefedov E.I., Smirnov G.N., Sugrobov V.M.**, 1961. Groundwaters of the south part of the West Siberian lowland and the conditions of their formation. *Trudy LGGP AN SSSR*, vol. 33. Moscow: Izdatelstvo AN SSSR (in Russian).
- Garrels R.M.**, 1960. Mineral equilibria at low temperature and pressure. New York: Harper and Brothers, 254 p. (in English).
- Garrels R.M., Christ C.L.**, 1965. Solutions, Minerals, and Equilibria. San Francisco: Freeman-Cooper, 450 p. (in English).

- Garven G.**, 1985. The role of regional fluid-flow in the genesis of the Pine Point deposit, western Canada sedimentary basin. *Econ. Geol.*, vol. 80, p. 307–324 (in English).
- Garven G., Appold M.S., Toptygina V.I., Hazlett T.J.**, 1999. Hydrogeologic modeling of the genesis of carbonate-hosted lead-zinc ores. *Hydrogeology J.*, vol. 7, p. 108–126 (in English).
- Garven G., Ge S., Person M.A., Sverjensky D.A.**, 1993. Genesis of stratabound ore deposits in the Mid-continent basins of North America, 1, The role of regional groundwater flow. *Amer. J. Sci.*, vol. 293, p. 497–568 (in English).
- Gatal'skiy M.A.**, 1954. Groundwater and gases of the Paleozoic in the northern half of the Russian Platform. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 172 p. (in Russian).
- Gavich I.K.**, 2002. Hydrogeodynamics. Moscow: Nedra, 349 p. (in Russian).
- Gavrilenko E.S., Derpgolts V.F.**, 1971. Deep hydrosphere of the Earth. Kiev: Naukova Dumka, 272 p. (in Russian).
- Ge S., Garven G.**, 1992. Hydromechanical modeling of tectonically driven groundwater flow with application to the Arkoma foreland basin. *J. Geophys. Res.*, vol. 97, p. 9119–9144 (in English).
- Geological dictionary**: in 2 volumes, 1978. (Eds. K.N. Paffengolts et al). Moscow: Nedra (in Russian).
- Geological evolution and self-organization of the water-rock system** (in 5 volumes), 2005. Vol. 1. Water-rock system in the Earth's crust: interaction, kinetics, equilibrium, modeling. (Ed. S.L. Shvartsev). Novosibirsk: Izdatelstvo Sibirskogo Otdeleniya RAN (in Russian).
- Gerdes M., Baumgartner L.P., Person M.**, 1998. Convective flow through heterogeneous country rocks during contact metamorphism. *J. Geophys. Res.*, vol. 103, p. 23983–24003 (in English).
- Gibert J., Danielopol D.L., Stanford J.A.** (eds.), 1994. Groundwater Ecology. London: Academic Press, 571 p. (in English).
- Gilat A.L., Vol A.**, 2005. Primordial hydrogen-helium degassing, an overlooked major energy source for internal terrestrial processes. *HAIT J. Sci. Eng. B*, vol. 2 (1–2), p. 125–167 (in English).
- Gilat A.L., Vol A.**, 2012. Degassing of primordial hydrogen and helium as the major energy source for internal terrestrial processes. *Geosci. Front.*, vol. 3 (6), p. 911–921 (in English).
- Girinskiy N.K.** 1947. Some issues of the groundwater dynamics. *Gidrogeologiya i inzhenernaya geologiya*, № 9, p. 27–32 (in Russian).
- Goldberg V.M.**, 1987. Interrelation of groundwater contamination and natural environment. Leningrad: Gidrometeoizdat, 248 p. (in Russian).
- Gorokhovskiy V.**, 2012. Effective Parameters of Hydrogeological Models. Springer Briefs in Earth Sciences. London–New York: Springer, 153 p. (in English).
- Grigoriev S.M.**, 1971. The role of water in the formation of the Earth crust: the drainage shell of the Earth crust. Moscow : Nedra, 263 p. (in Russian).
- Gross M.R., Eyal Y.**, 2007. Throughgoing fractures in layered carbonate rocks. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 119 (11–12), p. 1387–1404 (in English).
- Gudzenko V.V., Dubinchuk V.T.**, 1987. Radium and radon isotopes in natural water. Moscow: Nauka, 146 p. (in Russian).
- Haken G.**, 1980. Synergetics. Moscow: Mir, 406 p. (in Russian).
- Hancock P.J., Hunt R.J., Boulton A.J.** (eds.), 2009. Hydrogeoecology and groundwater dependent ecosystems: *Hydrogeology J.*, vol. 17, p. 1–259 (in English).
- Hanshaw B.B., Back W.**, 1974. Determination of regional hydraulic conductivity through C dating of ground water. *Mem. l'Association Internationale des Hidrogeologues.*, vol. X-1, p. 195–196 (in English).
- Hanshaw B.B., Back W., Rubin M.**, 1965. Radiocarbon determinations for estimating groundwater flow velocities in central Florida. *Science*, vol. 148, p. 494–495 (in English).
- Hantush M.S., Jacob C.E.**, 1955. Nonsteady radial flow in an infinite leaky aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 36, p. 95–100 (in English).
- Harbaugh A.W.**, 2005. MODFLOW-2005, the U.S. Geological Survey's Modular Ground Water Flow Model – The Groundwater Flow Process. Techniques and Methods 6–A16. Reston, Virginia: U.S. Geological Survey (in English).
- Helgeson H.C.**, 1968. Evaluation of irreversible reactions in geochemical processes involving minerals and aqueous solutions—I. Thermodynamic relations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 32, p. 853–877 (in English).
- Hem J.D.**, 1985. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. USGS Water-Supply Paper 1473, 269 p. (in English).
- Herold M., Greskowiak J., Ptak T., Promme H.**, 2011. Modelling of an enhanced PAH attenuation experiment and associated biogeochemical changes at a former gasworks site in southern Germany. *J. Contaminant Hydrology*, vol. 119, p. 99–112 (in English).
- Hill M.C., Banta E.R., Harbaugh A.B., Anderson E.R.**, 2000. Modflow – 2000, the US Modular groundwater model: user guide to observation, sensitivity and parameter estimation processes, and three post-processing programs. US geological Survey Open File Report, vol. 184, 209 p. (in English).

- Hobday D.K., Galloway W.E.**, 1999. Groundwater processes and sedimentary uranium deposits. *Hydrogeology J.*, vol. 7, p. 127–138 (in English).
- Hsieh P.A., Bredehoeft J.D.**, 1981. A reservoir analysis of the Denver earthquake: A case of induced seismicity. *J. Geophys. Res.*, vol. 86, p. 903–920 (in English).
- Hubbert M.K.**, 1940. The theory of ground-water motion. *J. Geol.*, vol. 48, p. 785–944 (in English).
- Hubbert M.K., Rubey W.**, 1959. Role of fluid pressure in mechanics of overthrust faulting: Pt. 1. Mechanics of fluid-filled porous solids and its application to overthrust faulting. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 70, p. 115–166 (in English).
- Hughes J.D., Langevin C.D., Banta, E.R.**, 2017. Documentation for the MODFLOW 6 framework: U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A57, 40 p. (in English).
- Ibaraki M., Sudicky E.A.**, 1995. Colloid-facilitated contaminant transport in discretely fractured porous media, 1. Numerical formulation and sensitivity analysis. *Water Resour. Res.*, vol. 31, p. 2945–2960 (in English).
- Ignatovich N.K.**, 1950. Zoning, formation and activity of groundwater in relation with geostructures development. Moscow: Gostoptekhizdat, 286 p. (in Russian).
- Ingebritsen S., Gleeson T.**, 2017. Crustal permeability. *Hydrogeology J.*, vol. 25, p. 2221–2224 (in English).
- Ingebritsen S.E., Appold M.S.**, 2012. The physical hydrogeology of ore deposits. *Econ. Geol.*, vol. 107 (4), p. 559–584 (in English).
- Ingebritsen S.E., Manning C.E.**, 2003. Implications of crustal permeability for fluid movement between terrestrial fluid reservoirs. *J. Geochim. Explor.*, vol. 78–79, p. 1–6 (in English).
- Ingebritsen S.E., Manning C.E.**, 2010. Permeability of the continental crust: dynamic variations inferred from seismicity and metamorphism. *Geofluids*, vol. 10 (1–2), p. 193–205 (in English).
- Ingebritsen S.E., Sanford W.E., Neuzil C.E.**, 2006. Groundwater in Geologic Processes (2nd ed.). Cambridge: Cambridge University Press, 341 p. (in English).
- Italiano F., Yuce G., Uysal I.T., Gasparon M., Morelli G.**, 2013. Insights into mantle-type volatiles contribution from dissolved gases in artesian waters of the Great Artesian Basin, Australia. *Chim. Geol.* vol. 378–379, p. 75–88 (in English).
- Ivanov S.N.**, 1970. The limiting depth of open fissures and hydrodynamic zoning of the Earth crust. *Annual issue – 1969 of the Institute of Geology and Geochemistry, the Ural Branch of AS USSR.* Sverdlovsk, p. 212–233 (in Russian).
- Ivanov S.N., Ivanov K.S.**, 1993. Hydrodynamic zoning of the Earth's crust and its significance. *J. Geodyn.*, vol. 17 (4), p. 155–180 (in English).
- Ivanovich M., Harmon R.S.** (eds.), 1992. Uranium-series Disequilibrium (2nd edition). Oxford: Clarendon Press, 910 p. (in English).
- Jacob C.E.**, 1940. Flow of water in an elastic artesian aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 21, p. 574–586 (in English).
- Jacob C.E.**, 1946. Radial flow in a leaky artesian aquifer. *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 27, p. 198–208 (in English).
- Karlstrom K.E., Crossey L.J., Hilton D.R., Barry P.H.**, 2013. Mantle 3He and CO<sub>2</sub> degassing in carbonic and geothermal springs of Colorado and implications for neotectonics of the Rocky Mountains. *Geology*, vol. 41 (4), p. 495–498 (in English).
- Kennedy B.M., Van Soest M.C.**, 2007. Flow of mantle fluids through the ductile lower crust: Helium isotope trends. *Science*, vol. 318 (5855), p. 1433–1436 (in English).
- Kharaka Y.K., Barnes I.**, 1973. SOLMNEQ solution mineral equilibrium computations: Menlo Park, Calif., U.S. Geological Survey Computer Contributions, 82 p. (in English).
- Khaustov V.V.**, 2011. Role of deep geodynamics in formation of the hydrolithosphere: by example of the Caspian-Caucasian segment of the Alpine-Himalayan mobile belt. Avtoreferat diss. ... doktor geol.-mineral. nauk. St. Petersburg, 43 p. (in Russian).
- Kissin I.G.**, 2009. Fluids in the Earth crust: geophysical and tectonic aspects. Moscow: Nauka, 328 p. (in Russian).
- Klimchouk A.B.**, 1989. Role of the near-surface zone in the karst hydrogeology and morphogenesis. Kiev: Institute of Geological Sciences, 42 p. (in Russian).
- Klimchouk A.B.**, 1990. Artesian origin of maze caves in Miocene gypsum of the Western Ukraine. *Doklady Akademii Nauk Ukrainskoj SSR. Ser. B, № 7*, p. 28–32 (in Russian).
- Klimchouk A.B.**, 1992. Large gypsum caves in the Western Ukraine and their genesis. *Cave Science*, vol. 19 (1), p. 3–11 (in English).
- Klimchouk A.B.**, 1997. The role of karst in the genesis of sulfur deposits, Pre-Carpathian region, Ukraine. *Environmental Geology*, vol. 31 (1/2), p. 1–20 (in English).
- Klimchouk A.B.**, 2004. Towards defining, delimiting and classifying epikarst: Its origin, processes and variants of geomorphic evolution. *Speleogenesis and Evolution of Karst Aquifers*, vol. 2 (5), p. 1–13 (in English).



- Klimchouk A.B.**, 2007. Hypogene Speleogenesis: Hydrogeological and Morphogenetic Perspective. National Cave and Karst Research Institute, Special Paper No. 1. Carlsbad, New Mexico: Natl. Cave and Karst Res. Inst., 106 p. (in English).
- Klimchouk A.B.**, 2009. Epikarst: hydrogeology, morphogenesis and evolution. Simferopol: Sonat, 112 p. (in Russian).
- Klimchouk A.B.**, 2010. The evolutionary approach to karst typology. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (332), p. 85–97 (in Russian).
- Klimchouk A.B.**, 2011. Self-organization of water exchange structure as a system-forming property of karst. *Geologichnyy zhurnal*, № 1 (334), p. 85–110 (in Russian).
- Klimchouk A.B.**, 2013. Hypogenous speleogenesis, its hydrogeological significance and the role in evolution of karst. Simferopol: DIP, 180 p. (in Russian).
- Klimchouk A.B.**, 2015. The karst paradigm: changes, trends and perspectives. *Acta Carsologica*, vol. 44 (3), p. 289–313 (in English).
- Klimchouk A.**, 2017. Types and settings of hypogene karst. In: Klimchouk, A., N. Palmer, A., De Waele, J., Auler, A.S., Audra, P. (eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Cham: Springer International Publishing AG, p. 1–39 (in English).
- Klimchouk O.B.**, 2017. Development of the theory of hypogenic karstogenesis: scientific and technical application. *Visnyk NAN Ukrainy*, № 11, p. 1–19. doi: 10.15407/visn2017.11.009 (in Ukrainian).
- Klimchouk A., Andreychuk V.**, 2005. Karst breakdown mechanisms from observations in the gypsum caves of the Western Ukraine: implications for subsidence hazard assessment. *Environmental Geology*, vol. 48, p. 336–359 (in English).
- Klimchouk A., Andreychouk V.**, 2017. Gypsum karst in the south-west outskirts of the Eastern-European platform (Western Ukraine): a type region of artesian transverse speleogenesis. In: Klimchouk, A., N. Palmer, A., De Waele, J., Auler, A.S., Audra, P. (eds.), *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Cham: Springer International Publishing AG, p. 363–385 (in English).
- Klimchouk A.B., Birk S.**, 2006. Speleogenesis in cratonic multi-storey artesian systems: conceptual and numerical models. EGU General Assembly 2006. Geophysical Research Abstracts. Vol. 8. Paper EGU06-A-05888 (in English).
- Klimchouk A.B., Ford D.C., Palmer A.N., Dreybrodt W.** (eds.), 2000. *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville (AL): National Speleological Society, 527 p. (in English).
- Klimchouk A.B., Palmer A.N., Waele J. De, Auler A.S., Audra P.** (eds.), 2017. *Hypogene Karst Regions and Caves of the World*. Cham: Springer International Publishing AG, 911 p. (in English).
- Konikow L.F.**, 1985. Process and rate of dedolomitization: Mass transfer and <sup>14</sup>C dating in a regional carbonate aquifer: Extended interpretation. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 96, p. 1096–1098 (in English).
- Konikow L.F., Patten E.P.**, 1985. Groundwater forecasting. In: Anderson M.G., Burt T.P. (eds.), *Hydrological Forecasting*. John Wiley and Sons Ltd., p. 221–270 (in English).
- Korobov Yu.I., Malyushko L.D.**, 2002. The fluid-dynamic model of hydrocarbon deposits - theoretical basis for searching for oil and gas deposits. In: *Degassing of the Earth: geodynamics, geofluids, oil and gas*. Moscow: GEOS, p. 360–362 (in Russian).
- Kropotkin P.N.**, 1986. Degassing of the Earth and the genesis of hydrocarbons. *Zhurnal Vsesoyuznogo khimicheskogo obshchestva im. D.I. Mendeleeva*. vol. 31, No. 5, p. 540–547 (in Russian).
- Kühn M.**, 2004. *Reactive Flow Modeling of Hydrothermal Systems*. Springer Science & Business Media. Vol. 22. 261 p. (in English).
- Kulongoski J.T., Hilton D.R.**, 2011. Applications of Groundwater Helium. In: Baskaran M. (ed.), *Handbook of Environmental Isotope Geochemistry, Advances in Isotope Geochemistry*. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, p. 285–304 (in English).
- Kulongoski J.T., Hilton D.R., Izbicki J.A.**, 2005. Source and movement of helium in the eastern Morongo groundwater Basin: the influence of regional tectonics on crustal and mantle helium fluxes. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 69(15), p. 3857–3872 (in English).
- Kyser K., Hiatt E.E.**, 2003. Fluids in Sedimentary Basins: an Introduction. *J. Geochem. Explor.*, vol. 80, p. 139–149 (in English).
- Larin V.N.**, 2005. *Our Earth (the origin, composition, structure and development of the initially hydridic Earth)*. Moscow: Agar, 248 p. (in Russian).
- Larson R.L.**, 1991. Geological consequences of superplumes. *Geology*, vol. 19 (10), p. 963–966 (in English).
- Laubach S.E., Olson J.E., Gross M.R.**, 2012. Mechanical and fracture stratigraphy. *AAPG Bulletin*, vol. 93 (11), p. 1413–1426 (in English).
- Letnikov F.A.**, 1992. *Superdeep fluid systems of the Earth*. Novosibirsk: Nauka, 150 p. (in Russian).
- Letnikov F.A., Dorogokupets P.I.**, 2001. On the role of superdeep fluid systems of the Earth's core in endogenous geological processes. *Doklady RAN*, vol. 378, № 4, p. 535–537 (in Russian).
- Llamas M.R., Cruces de Abia J.**, 1978. Conceptual and digital models of the ground water flow in the Tertiary basin of the Tagus River (Spain). In: *Proceedings of*

*the international hydrogeological conference*. Budapest, p. 186–202 (in English).

**Llamas R.**, 2004. Water and ethics: use of groundwater. UNESCO Series on Water and Ethics, Essay 7. New York: UNESCO, 33 p. (in English).

**López D.L., Smith L.**, 1995. Fluid flow in fault zones: Analysis of the interplay of convective circulation and topographically driven groundwater flow. *Water Resour. Res.*, vol. 31, p. 1489–1503 (in English).

**Lowe D.J.**, 1992. The origin of limestone caverns: an inception horizon hypothesis. Ph.D. thesis. Manchester: Manchester Polytechnic University, 511 p. (in English).

**Lukin A.E.**, 1997. Lithogeodynamic factors of oil and gas accumulation in aulacogenic basins. Kiev: Naukova Dumka, 225 p. (in Russian).

**Lukin A.E.**, 2004. On the cross-formational fluid-conducting systems in the oil and gas basins. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (309), p. 35–45 (in Russian).

**Lukin A.E.**, 2014. Fluid lithogenesis – the most important direction of lithological researches in the XXI century. *Geologichnyy zhurnal*, № 4 (349), p. 27–42 (in Russian).

**Lukin A.E.**, 2015. The system «superplume – deep-seated segments of the oil and gas basin» – an inexhaustible source of hydrocarbons. *Geologichnyy zhurnal*, № 2 (351), p. 7–20 (in Russian).

**Lukin A.E., Pikovskiy Yu.I.**, 2004. Role of deep and super deep fluids in the oil and gas formation. *Geologichnyy zhurnal*, № 2 (308), p. 21–33 (in Russian).

**Lyalko V.I.**, 1974. Methods for calculation of the heat and mass transfer in the Earth crust. Kiev: Naukova Dumka, 131 p. (in Russian).

**Lyalko V.I., Shneyderman G.A.**, 1965. Formation and forecast of groundwater resources in the arid regions. Kiev: Naukova Dumka, 187 p. (in Russian).

**Mamyrin B.A., Tolstikhin I.N.**, 1981. Helium isotopes in nature. Moscow: Energoizdat, 222 p. (in Russian).

**Manga M., Beresnev I., Brodsky E.E., Elkhoury J.E., Elsworth D., Ingebritsen S.E., Mays D.C., Wang C-Y.**, 2012. Changes in permeability caused by transient stresses: field observations, experiments, and mechanisms. *Rev. Geophys.*, vol. 50 (2), 24 p. (in English).

**Marakushev A.A., Marakushev S.A.**, 2008. The hydrogen breathing of the Earth - its origin, geological and biological consequences. *Alternativnaya energetika i ekologiya*, № 57, p. 152–170 (in Russian).

**Maxey G.B.**, 1964. Hydrostratigraphic units. *Journal of Hydrology*, vol. 2, p. 124–129 (in English).

**Meinzer O.E.**, 1928. Compressibility and elasticity of artesian aquifers. *Econ. Geol.*, vol. 23, p. 263–291 (in English).

**Meinzer O.E.**, 1937. Land subsidence caused by pumping. *Eng. News Rec.*, vol. 18, 715 p. (in English).

**Mironenko V.A., Rumynin V.G.**, 1998. Problems of hydrogeoecology. In 3 volumes. Vol. 1. Theoretical study and modeling of geomigration processes. Moscow: MGGU Publ., 611 p. (in Russian).

**Mironenko V.A., Rumynin V.G.**, 1999. Problems of hydrogeoecology. In 3 volumes. Vol. 3 (pt.1) Applied research. Moscow: MGGU Publ, 312 p. (in Russian).

**Mironenko V.A., Rumynin V.G.**, 2002. Problems of hydrogeoecology. In 3 volumes. Vol. 2 Experimental Migration Studies. (2nd ed.). Moscow: MGGU Publ., 394 p. (in Russian).

**Moiseev A.Yu.**, 2017. Features of chemical composition and balneal use of mineral waters. Kyiv: Izdatelstvo KIM, 462 p. (in Russian).

**Morgan W.J.**, 1971. Convection plumes in the lower mantle. *Nature*, vol. 230, p. 42–43 (in English).

**Moss I.L., Cartwright J., Moore B.**, 2012. Evidence or fluid migration following pockmark formation: Examples from the Nile Deep Sea Fan. *Marine Geology*, vol. 303–306, p. 1–13 (in English).

**Myatiev A.N.**, 1946. Effect of the water well in the arthesian groundwater basin. *Izvestiya Turkmenskogo Filiala AN SSSR*, № 3, p. 48–62 (in Russian).

**Myatiev A.N.**, 1947. Confined groundwater complex and wells. *Izvestiya AN SSSR. Otd. Tekhn. Nauk*, № 9, p. 1069–1088 (in Russian).

**Narasimhan T.N.**, 2005. Hydrogeology in North America: past and future. *Hydrogeology J.*, vol. 13, p. 7–24 (in English).

**Newell D.L., Crossey L.J., Karlstrom K.E., Fischer T.P., Hilton D.R.**, 2005. Continental-scale links between the mantle and groundwater systems of the western United States: evidence from travertine springs and regional He data. *GSA Today*, vol. 15 (12), p. 4–10 (in English).

**Norton D.**, 1984. Theory of Hydrothermal Systems. *Annual Rev. Earth and Planetary Sci.*, vol. 12, p. 155–177 (in English).

**Palmer C.**, 1911. The geochemical interpretation of water analyses. *U.S. Geol. Surv. Bull.*, vol. 479, p. 5–31 (in English).

**Pankow J.E., Cherry J.A.**, 1996. Dense Chlorinated Solvents and Other DNAPLs in Groundwater: History, Behavior, and Remediation. Waterloo, Canada: Waterloo Press, 526 p. (in English).

**Parkhurst D.L., Appelo C.A.J.**, 1999. User's guide to PHREEQC (Version 2)—A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 99–4259, 312 p. (in English).

- Parkhurst D.L., Kipp K.L., Charlton S.R.**, 2010. PHAST Version 2—A Program for Simulating Groundwater Flow, Solute Transport, and Multicomponent Geochemical Reactions: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A35, 235 p. (in English).
- Parkhurst D.L., Plummer L.N., Thorstenson D.C.**, 1982. BALANCE—A Computer Program for Calculation of Chemical Mass Balance: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 82-14, 29 p. (in English).
- Parkhurst D.L., Thorstenson D.C., Plummer L.N.**, 1980. PHREEQE: A Computer Program for Geochemical Calculations: U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report 80-96, 210 p. (in English).
- Patent 92042 Ukraine.** Shestopalov V.M., Ivanitskiy G.R., Moiseeva N.P., Moiseev A.Yu. Method of long-term conservation of medicinal features of mineral waters with high content of organic substances during storage. Published 27.09.2019, bul. № 18 (in Russian).
- Person M., Garven G.**, 1994. A sensitivity study of the driving forces on fluid flow during continental-rift basin evolution. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 106, p. 461–475 (in English).
- Phillips F.M.**, 1998. Groundwater dating and isotope chemistry. In: *Hydrologic sciences: Taking stock and looking ahead*. Washington, D.C.: National Academy Press, p. 87–100 (in English).
- Phillips W.J.**, 1972. Hydraulic fracturing and mineralization. *J. Geol. Soc.*, vol. 128 (4), p. 337–359 (in English).
- Pikovskiy Yu.I.**, 2002. Fluid plumes of the lithosphere as a model of oil formation and oil and gas accumulation. In: *Degassing of the Earth and the genesis of hydrocarbon fluids and deposits*. Moscow: GEOS, p. 254–270 (in Russian).
- Pinneker E.V.**, 1984. Subsurface hydrosphere. Novosibirsk: Nauka, 158 p. (in Russian).
- Pinneker E.V., Pisarskiy B.I., Shvartsev S.L.**, 1982. Fundamentals of hydrogeology. Geological activity and history of water in the Earth interior. Novosibirsk: Nauka, Sibirskoye Otdeleniye, 240 p. (in Russian).
- Pinneker E.V., Pisarskiy B.I., Shvartsev S.L., Bogdanov G. Ya., Borisov V.N., Karavanov K.P.**, 1980. Fundamentals of Hydrogeology. General hydrogeology. Novosibirsk: Nauka, 225 p. (in Russian).
- Piper A.M.**, 1944. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 25, p. 914–923 (in English).
- Plotnikov N.I.**, 1976. Groundwater - our wealth. Moscow: Nedra, 208 p. (in Russian).
- Plummer L.N., Jones B.F., Truesdell A.H.**, 1976. WATEQF a Fortran IV version of WATEQ a computer program for calculating chemical equilibrium of natural waters. U.S. Geological Survey Water-Resources-Investigations Report 76-13, 61 p. (in English).
- Plummer L.N., Prestemon E.C., Parkhurst D.L.**, 1994. An interactive code (NETPATH) for modeling net geochemical reactions along a flow path, Ver. 2.0. U.S. Geological Survey Water-Resources Investigations Report, vol. 94 (4169) (in English).
- Poeter E., Gaylord D.R.**, 1990. Influence of aquifer heterogeneity on contaminant transport at the Hanford Site. *Ground Water*, vol. 28, p. 900–909 (in English).
- Prigogine I.**, 1960. Introduction to the thermodynamics of irreversible processes. Moscow: Izdatelstvo inostrannoi literatury, 232 p. (in Russian).
- Prigogine I., Stengers I.**, 1986. Order out of chaos. Man's new dialogue with nature. Moscow: Progress, 431 p. (in Russian).
- Pruess K.**, 2004. The TOUGH Codes—A family of simulation tools for multiphase flow and transport processes in permeable media. *Vadose Zone Journal*, vol. 3, p. 738–746 (in English).
- Questiaux J.-M., Couples G.D., Nicolas R.**, 2010. Fractured reservoirs with fracture corridors. *Geophysical Prospecting*, vol. 58, p. 279–295 (in English).
- Rajaram H., Cheung W., Chaudhuri A.**, 2009. Natural analogs for improved understanding of coupled processes in engineered earth systems: examples from karst system evolution. *Current Science*, vol. 97 (8), p. 1162–1176 (in English).
- Raleigh C.B., Healy J.H., Bredehoeft J.D.**, 1976. An experiment in earthquake control at Rangely. *Colorado Sci.*, vol. 191, p. 1230–1237 (in English).
- Rapple H.S.**, 1933. Recent areal subsidence found in releveling. *Eng. News Rec.*, vol. 110, p. 845 (in English).
- Rehfeldt K.R., Boggs J.M., Gelhar L.W.**, 1992. Field study of dispersion in a heterogeneous aquifer, 3, Geostatistical analysis of hydraulic conductivity. *Water Resour. Res.*, vol. 28, p. 3309–3324 (in English).
- Rehrl C., Birk S., Klimchouk A.B.**, 2008. Conduit evolution in deep-seated settings: Conceptual and numerical models based on field observations. *Water Resour. Res.*, vol. 44, W11425 (in English).
- Rehrl C., Birk S., Klimchouk A.B.**, 2010. Influence of initial aperture variability on conduit development in hypogene settings. *Zeitschrift für Geomorphologie*, vol. 54 (2), p. 237–258 (in English).
- Renick B.C.**, 1924. Base exchange in ground water by silicates as illustrated in Montana. U.S. Geol. Surv. Water Supply Paper 520-D (in English).
- Roeloffs E.**, 1988. Hydrologic precursors to earthquakes: A review. *Pure and Applied Geophysics*, vol. 126, p. 171–209 (in English).



- Rogers G.S.**, 1917. Chemical relationships of the oil-field waters in San Joaquin Valley, California. *U.S. Geol. Surv. Bull.* vol. 653, 119 p. (in English).
- Rogovskaya N.V.**, 1976. Map of natural groundwater protectability from pollution. *Priroda*, № 3, p.57–76 (in Russian).
- Rojstaczer S.A., Bredehoeft J.D.**, 1988. Groundwater and fault strength. In: Back, W. et al. (eds.), *Hydrogeology. Geology of North America*, v. O-2. Boulder, Colorado: Geological Society of America, p. 447–460 (in English).
- Rojstaczer S.A., Wolf S., Michel R.**, 1995. Permeability enhancement in the shallow crust as a cause of earthquake-induced hydrological changes. *Nature*, vol. 373, p. 237–239 (in English).
- Rojstaczer S.A., Ingebritsen S.E., Hayba D.D.**, 2008. Permeability of continental crust influenced by internal and external forcing. *Geofluids*, vol. 8, p. 128–139 (in English).
- Rubin J., James R.V.**, 1973. Dispersion-affected transport of reacting solutes in saturated porous media; Galerkin method applied to equilibrium-controlled exchange in unidirectional steady water flow. *Water Resour. Res.*, vol. 9, p. 1332–1356 (in English).
- Sanford W.E., Wood W.W.**, 1991. Brine evolution and mineral deposition in hydrologically open evaporate basins. *Amer. J. Sci.*, vol. 291, p. 687–710 (in English).
- Schwartz F.W., Ibaraki M.**, 2001. Hydrogeological research: Beginning of the end or end of the beginning? *Ground Water*, vol. 39 (4), p. 492–498 (in English).
- Semenenko N.P.** 1990. Oxygen-hydrogen model of the Earth. Kiev: Naukova Dumka, 246 p. (in Russian).
- Semikhatov A.N.**, 1954. Hydrogeology. Moscow: SelkhozGIZ, 328 p. (in Russian).
- Shagoyants S.A.**, 1959. Groundwaters of the central and eastern parts of the North Caucasus and conditions of their formation. Moscow: Gosgeoltekhizdat, 104 p. (in Russian).
- Sharp J.M.Jr., Domenico P.A.**, 1976. Energy transport in thick sequences of compacting sediment. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, vol. 87, p. 390–400 (in English).
- Sherwood-Lollar B., Ballentine C.J., O’Nions R.K.**, 1997. The fate of mantle-derived carbon in a continental sedimentary basin: integration of C/He relationships and stable isotopic signatures. *Geochim. Cosmochim. Acta*, vol. 61 (11), p. 2295–2307 (in English).
- Shestakov V.M.**, 2003. Geohydrology. Moscow: IKC «Akademkniga», 176 p. (in Russian).
- Shestopalov V.M.**, 1968. On the main regularities of groundwater dynamics in the pre-Mesozoic formations of the Volyn – Podolian margin of the Russian platform. *Sovetskaya geologiya*, № 10, p. 122–125 (in Russian).
- Shestopalov V.M.**, 1974. Dynamics and natural resources of groundwater of the main aquifers of the Volyn Artesian Basin. Kiev: Naukova Dumka, 132 p. (in Russian).
- Shestopalov V.M.**, 1981. Natural groundwater resources of the platform artesian basins in Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 195 p. (in Russian).
- Shestopalov V.M.**, 1988. Methods of studying the natural groundwater resources. Moscow: Nedra, 169 p. (in Russian).
- Shestopalov V.M.**, 1999. Radioactive contamination and barrier functions of geological environment in the Exclusion zone. *Bulletin ekologichnogo stanu zony vidchuzhennya ta zony bezumovnogo (obov'yazkovogo) vidselelnnya*, № 15, p. 25–27 (in Ukrainian).
- Shestopalov V.** (ed.), 2002. Chernobyl Disaster and Groundwater. CRC Press, 289 p. (in English).
- Shestopalov V.M.**, 2014. On hydrogeological zoning and water exchange in geological structures. *Geologichnyy zhurnal*, № 4 (349), p. 9–26 (in Russian).
- Shestopalov V.M.**, 2016. On possible geological and geophysical risks and prospects of the Chernobyl exclusion zone. *Geofizicheskyy zhurnal*, № 1, p. 3–16 (in Russian).
- Shestopalov V., Bohuslavsky A, Bublyas V.**, 2015. Groundwater Vulnerability. Chernobyl Nuclear Disaster. USA: AGU-Wiley, 136 p. (in English).
- Shestopalov V.M., Boguslavskiy A.S., Bublyas V.N., Onyshchenko I.P., Kukhareno D.E.**, 2002. Barrier and autorehabilitation function of the geological environment (by example of the Chernobyl exclusion zone). In: *Current problems of hydrogeology and hydrogeomechanics*. St. Petersburg: S.-P. University Publ., p. 227–236 (in Russian).
- Shestopalov V.M., Boguslavsky A.S., Bublyas V.N.**, 2007. Groundwater protectability and vulnerability assessment with account of fast migration zones. *Kyiv: Alt. Art*, 118 p. (in Russian).
- Shestopalov V.M., Lukin A.E., Zgonnik V.A., Makarenko A.N., Larin N.V., Boguslavsky A.S.**, 2018. Essays on Earth degassing. Kiev: Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine; Radioenvironmental Center, 632 p. (in Russian).
- Shestopalov V.M., Makarenko A.N.**, 2013. Some results of studies developing the V.I. Vernadsky’s idea about «gas breathing» of the Earth. Paper 1. Surface and near-surface manifestations of anomalous degassing. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (344), p. 7–25 (in Russian).
- Shestopalov V.M., Makarenko A.N.**, 2014. Some results of studies developing the V.I. Vernadsky’s idea about «gas breathing» of the Earth. Paper 2. Deep processes of degassing of the bowels of the earth. *Geologichnyy zhurnal*, № 3 (348), p. 7–28 (in Russian).

- Shestopalov V.M., Moiseeva N.P., Ischenko A.P., Kondratyuk E.I., Usov V.Yu., Moiseev A.Yu., Gudzenko V.V., Lyuty G.G., Sinitsyn N.I., Suleimanov S.P., Yasevich A.P., Druzhina N.A. Kovalska V.V., Gela A.A., Rodionova N.K., Kirilyuk N.D., Rudko G.I., Mit'ko A.P., Netskiy A.V., Bakarzhieva O.O.**, 2013. Curative mineral waters of «Naftusya» type from the Ukrainian Carpathians and Podolia. Chernivtsi: Bukrek, 600 p. (in Russian).
- Shestopalov V.M., Naboka M.V., Likhoshervost O.O., Chaban O.P.**, 2015. Potential properties of geochemical landscapes for transition of radio-cesium from the soil to the humans through the food chains and public safety. *Ukrainskiy geograficheskii zhurnal*, № 2, p. 59–64 (in Ukrainian).
- Shestopalov V.M., Moiseyeva N.P., Negoda G.N., Druzhina M.O., Sukhorebriy A.O., Onyshchenko I.P., Gudzenko V.V., Ovchinnikova N.B., Usov V.Yu., Yasevich G.P.**, 2009. Formation of mineral waters in Ukraine. Kiev: Naukova Dumka, 312 p. (in Russian).
- Shmulovich K.I., Yardley B.W.D., Gontchar G.G.**, 1994. Fluids in the crust. London: Chapman & Hall, 323 p. (in English).
- Shoemaker W.B., Kuniansky E.L., Birk S., Bauer S., Swain E.D.**, 2007. Documentation of a Conduit Flow Process (CFP) for MODFLOW-2005: USGS Techniques and Methods, 6-A24, 50 p. (in English).
- Shvartsev S.L.**, 1996. General hydrogeology. Moscow: Nedra, 425 p. (in Russian).
- Shvartsev S.L.**, 2007. About possible ways of the hydrogeology development in the XXI century. In: *Problems of geology and development of mineral resources*. Tomsk: Izdatel'stvo Tomskogo Politehnicheskogo Universiteta, p. 132–134 (in Russian).
- Shvartsev S.L.**, 2007. Basic processes and mechanisms of the evolutionary development of the water-rock system. *Izvestiya Tomskogo Polytehnicheskogo Universiteta*, vol. 311, iss.1, p. 103–113 (in Russian).
- Singh S.K., Abu-Habbil H., Khan B.**, 2008. Mapping fracture corridors in naturally fractured reservoirs: an example from Middle East carbonates. *First Break*, vol. 26 (5), p. 109–113 (in English).
- Sitnikov A.B.**, 1978. Dynamics of water in unsaturated and saturated soils of the aeration zone. Kiev: Naukova Dumka, 156 p. (in Russian).
- Sitnikov A.B.**, 1986. Dynamics of moisture and salts in the soils of aeration zone. Kiev: Naukova Dumka, 152 p. (in Russian).
- Sitnikov A.B.**, 2010. Issues of substances migration in soils. Kiev, 640 p. (in Russian).
- Sitnikov A.B.**, 2013. Substantiation of a stable computational explicit physical - mathematical model for compatible nonlinear migration of liquid hydrocarbons and subsurface moisture in the soils of aeration zone. *Geologichnyi zhurnal*, № 4 (345), p. 52–62 (in Russian).
- Sitnikov A.B., Golovchenko Yu.G., Tkachenko K.D.**, 2003. «Feofaniya» hydrogeological station: long-term research and results. Kiev: Naukova Dumka, 200 p. (in Russian).
- Sitnikov A.B., Sitnikova V.A.**, 2014. Substantiation of regularities of the phase transformation of liquid and vaporous moisture in the «soil - air - water reservoir» system. *Geologichnyi zhurnal*, № 3 (348), p. 104–113 (in Russian).
- Smith L.J., Schwartz F.W.**, 1981. Mass transport, 2, Analysis of uncertainty in prediction. *Water Resour. Res.*, vol. 17, p. 351–369 (in English).
- Stanford J.A., Simons J.J.** (eds.), 1992. Proceedings of the First International Conference on Ground Water Ecology, Tampa, Florida, April 26–29, 1992. U.S. EPA, American Water Resources Association, and the Ecological Society of America, 419 p. (in English).
- Stumm W., Morgan J.J.**, 1970. Aquatic Chemistry. New York: Wiley, 583 p. (in English).
- Sudicky E.A., Illman W.A.**, 2011. Lessons learned from a suite of CFB Borden experiments. *Ground Water*, vol. 49, p. 630–648 (in English).
- Sukhorebriy A.A.**, 1993. Pore solutions of low-permeable rocks of the platform artesian basins in Ukraine. Kiev: Institute of Geological Sciences of AN of Ukraine, 56 p. (in Russian).
- Sukhorebriy A.A.**, 2018. Chemical composition of pore solutions of low-permeable layers as indicator of groundwater protectability. *Geologichnyi zhurnal*, № 1 (362), p. 17–27 (in Russian).
- Sun R.J., Johnson R.H.**, 1994. Regional Aquifer System Analysis Program of the U.S. Geological Survey, 1978–1992. U.S. Geological Survey. Circular 1099 (in English).
- Terzaghi K.**, 1923. Die Berechnung der Durchlässigkeitsziffer des Tones aus dem Verlauf der hydrodynamischen Spannungsercheinungen. *Sitz. Akad. Wissen. Wien. Math-naturw. Kl., Part Iia.*, vol. 32, p. 125–138 (in German).
- The future of hydrogeology: current trends and prospects.**, 2008. (Eds. A.N Voronov et al). St. Petersburg: S.-P. State University, VVM, 420 p. (in Russian).
- The history of natural waters: Volodymyr Ivanovich Vernadsky. The history of natural waters**, 2012. Kyiv: NAS of Ukraine, p. 212–233 (in Ukrainian).
- Theis C.V.**, 1935. The relation between the lowering of the lowering of the piezometric surface and the rate and discharge of a well using ground water storage. *Trans. Amer. Geophys. Union*, vol. 16, p. 519–524 (in English).
- Tolstikhin I.N.**, 1975. Helium isotopes in the Earth's interior and in the atmosphere; a degassing model of the Earth. *Earth Planet. Sci. Lett.*, vol. 26, p. 88–96 (in English).

- Tóth J.**, 1962. A theory of groundwater motion in small drainage basins in Central Alberta, Canada. *J. Geophys. Res.*, vol. 67, p. 4375–4387 (in English).
- Tóth J.**, 1963. A theoretical analysis of groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.*, vol. 68, p. 4795–4812 (in English).
- Tóth J.**, 1988. Ground water and hydrocarbon migration. In: Back, W., Rosenshein J.S., Seaber P.R. (eds.), *Hydrogeology. Geology of North America*, vol. O-2. Boulder CO: Geological Society of America, p. 485–502 (in English).
- Tóth J.**, 1995. Hydraulic continuity in large sedimentary basins. *Hydrogeology J.*, vol. 3 (4), p. 4–15 (in English).
- Tóth J.**, 2009. Gravitational systems of groundwater flow: theory, evaluation, utilization. Cambridge: Cambridge University Press, 309 p. (in English).
- Truesdell A.H., Jones B.F.**, 1974. WATEQ a computer program for calculating chemical equilibria of natural waters. *U.S. Geol. Surv. J. Res.*, vol. 2, p. 233–248 (in English).
- US Geological Survey**, 2007. Facing tomorrow's challenges: U.S. Geological Survey science in the decade 2007–2017. US Geol Surv Circ 1309 (in English).
- Valyaev B.M.**, 1997. Hydrocarbon degassing of the Earth and genesis of the oil and gas fields. *Geologiya nefi i gaza*, № 9, p. 30–37 (in Russian).
- Voss C.I.**, 2005. The future of hydrogeology. *Hydrogeological J.*, vol. 13, p. 1–6 (in English).
- Vrba J., Zaporozec A.** (eds.), 1994. Guidebook on Mapping Groundwater Vulnerability. International Contributions to Hydrogeology, International Association of Hydrogeology. Vol. 16. Hanover: Heise, 131 p. (in English).
- Vsevolozhskiy V.A.**, 2007. Fundamentals of hydrogeology (2<sup>nd</sup> edition, updated). Moscow: MGU Publ., 448 p. (in Russian).
- Vsevolozhskiy V.A., Dyunin V.I.**, 1996. Analysis of hydrodynamics regularities of deep stratal aquifer systems. *Vestnik MGU, Ser. geol.*, № 3, p. 61–72 (in Russian).
- Vsevolozhskiy V.A., Kireeva T.A.**, 2009. On the problem of formation of inversions in hydrochemical zoning. *Vestnik MGU. Ser. geol.*, № 5, p. 19–25 (in Russian).
- Vsevolozhskiy V.A., Kireeva T.A.**, 2014. The role of endogenous fluids in the formation of vertical hydrogeological zoning of oil-gas-bearing basins of the platform type. *Glubinnaja Neft (Deep Oil)*, № 1 [electronic journal: <http://journal.deepoil.ru/index>] (in Russian).
- Wan J., Wilson J.L.**, 1994. Visualization of the role of the gas-water interface on the fate and transport of colloids in porous media. *Water Resour. Res.*, vol. 30, p. 11–23 (in English).
- Wang C-Y., Manga M.**, 2010. Earthquakes and water. Lecture Notes in Earth Sciences, 114. Berlin: Springer, 218 p. (in English).
- Warren J.K.**, 2006. Evaporites: Sediments, Resources and Hydrocarbons. Berlin-Heidelberg: Springer-Verlag, 1036 p. (in English).
- Water** exchange in the hydrogeological structures of Ukraine. Water exchange in natural conditions, 1989. (Ed. V.M. Shestopalov). Kiev: Naukova Dumka, 288 p. (in Russian).
- Water** exchange in the hydrogeological structures of Ukraine. Methods of studying the water exchange, 1988. (Ed. V.M. Shestopalov). Kiev: Naukova Dumka, 272 p. (in Russian).
- Water** exchange in the hydrogeological structures of Ukraine. Water exchange in hydrogeological structures and the Chernobyl disaster, 2001. Part 1, 2. (Ed. V.M. Shestopalov). Kiev: Institute of Geological Sciences of NAS of Ukraine; Radioenvironmental Center of NAS of Ukraine, 630 p. (in Russian).
- Webb E.K., Anderson M.P.**, 1996. Simulation of preferential flow in three-dimensional heterogeneous conductivity fields with realistic internal architecture: *Water Resour. Res.*, vol. 32, p. 533–546 (in English).
- Weinlich F.N., Tesar J., Weise S.M.**, 1998. Gas flux distribution in mineral springs and tectonic structures in the western Eger Rift. *J. Czech. Geol. Soc.*, vol. 43 (1–2), p. 91–110 (in English).
- White D.E.**, 1965. Saline waters of sedimentary rocks. *Amer. Assoc. Petroleum Geol. Mem.*, vol. 4, p. 342–366 (in English).
- Wilson J.T.**, 1973. Mantle plumes and plate motions. *Tectonophysics*, vol. 19 (2), p. 149–164 (in English).
- Winograd I.J.**, 1981. Radioactive waste disposal in thick unsaturated zones. *Science*, vol. 212, p. 1457–1464 (in English).
- Winter T.C., Harvey J.C., Franke O.L., Alley W.M.**, 1998. Ground Water and Surface Water, a Single Resource. U.S. Geological Survey Circular 1139, 79 p. (in English).
- Worthington S.R.H., Davies G.J., Alexander E.C.Jr.**, 2016. Enhancement of bedrock permeability by weathering. *Earth-Sci. Rev.*, vol. 160, p. 188–202 (in English).
- Worthington S.R.H., Ford D.C., Beddows P.**, 2000. Porosity and permeability enhancement in unconfined carbonate aquifers as a result of solution. In: Klimchouk A., Ford D., Palmer A., Dreybrodt W. (eds.), *Speleogenesis: Evolution of Karst Aquifers*. Huntsville: Natl. Speleol. Soc., p. 423–432 (in English).
- Wray R.A.L., Sauro F.**, 2017. An updated global review of solutional weathering processes and forms in quartz sandstones and quartzites. *Earth-Sci. Rev.*, vol. 171, p. 520–557 (in English).



**Yakutseni V.P.**, 1968. Geology of helium. Leningrad: Nedra, 232 p. (in Russian).

**Yardley B.W., Bodnar R.J.**, 2014. Fluids in the continental crust. *Geochim. Perspect.*, vol. 3 (1), 1–123 (in English).

**Yezhov Yu. A., Vdovin Yu.P.**, 1970. On the question of vertical hydrodynamic zonation of the Earth crust. *Sovetskaya geologiya*, № 8, p. 66–76 (in Russian).

**Yezhov Yu.A., Lysenin G.P.**, 1986. Vertical hydrodynamic zoning of the Earth crust. *Sovetskaya geologiya*, № 8, p. 111–120 (in Russian).

**Yezhov Yu.A., Lysenin G.P.**, 1988. The significance of the zone of transitional pressures in the subsurface hydrosphere. *Sovetskaya geologiya*, № 8, p. 107–114 (in Russian).

**Yuen D.A., Maruyama S., Karato S.-I., Windley B.F.** (eds.), 2007. Superplumes: Beyond Plate Tectonics. Netherlands: Springer, 569 p. (in English).

**Zheng C., Bianchi M., Gorelick S.M.**, 2011. Lessons learned from 25 years of research at the MADE site. *Ground Water*, vol. 49, p. 649–662 (in English).

**Zheng C., Wang P.P.**, 1999. MT3DMS: A Modular Three-Dimensional Multispecies Transport Model for Simulation of Advection, Dispersion, and Chemical Reactions of Contaminants in Groundwater Systems; Documentation and User's Guide, Contract Report SERDP-99-1. Vicksburg, Mississippi: U.S. Army Engineers Research and Development Center, 202 p. (in English).

**Zhou Y., Li W.**, 2011. A review of regional groundwater flow modeling. *Geoscience Frontiers*, vol. 2 (2), p. 205–214 (in English).

**Zlotnik V.A., Zurbuchen B.R., Ptak T.**, 2001. The Steady-State Dipole Flow Test for Characterization of Hydraulic Conductivity Statistics in a Highly Permeable Aquifer: Horkheimer Insel Site, Germany. *Ground Water*, vol. 39, p. 504–516 (in English).

**Zwahlen F.** (ed.), 2004. Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers. Final report COST Action 620. Luxemburg: European Commission, Directorate, 315 p. (in English).

Статья поступила  
06.08.2018