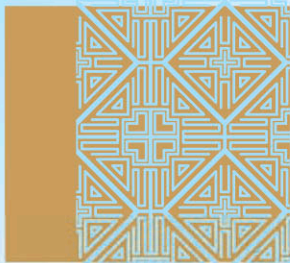




**А. В. Кудельский**

**ОЧЕРКИ  
ПО ИСТОРИИ ВОДЫ,  
НЕФТЕ-  
И СОЛЕОБРАЗОВАНИЮ**



УДК 556.3; 553.7; 551.2 (476)

**Кудельский, А. В.** Очерки по истории воды, нефте- и солеобразованию / А. В. Кудельский. – Минск: Беларуская навука, 2020. – 210 с. – ISBN 978-985-08-2635-0.

Приведены результаты новейших фундаментальных исследований проблем космогеологической и планетарной истории воды, формирования земной гидросферы, в частности, континентальной гидросферы Восточно-Европейской платформы с территорией Беларуси в ее пределах. С учетом физико-химического состояния воды и фазового состояния верхнемантийно-трансформированных геофлюидов разработана глубинная гидро- и флюидогеологическая зональность земной коры и верхней мантии. Установлены «разрешающие» мощности (> 5 км) осадочных образований, суб- и надкритический (для воды) тепловой режим и гидрогеологические условия нефтегазоносности фанерозойских осадочных бассейнов. Подчеркнуты специфические особенности и геохимическая уникальность высокоаммонийных цианистых рассолов и нефтей Припятского нефтегазоносного бассейна. Впервые установлено вулканогенное, эксгальциционно-осадочное происхождение мощных солевых и калийно-солевых толщ Припятского внутриконтинентального палеорифта.

Книга рассчитана на геологов широкого профиля, геохимиков, нефтяников и солевиков, а также на преподавателей, аспирантов и студентов геологического и общеприродоведческого профилей.

Табл. 30. Ил. 37. Библиогр.: 321 назв.

**Р е ц е н з е н т ы:**

академик НАН Беларуси, доктор геолого-минералогических наук,  
профессор А. А. Махнач  
доктор геолого-минералогических наук  
В. Н. Астапенко

**ISBN 978-985-08-2635-0**

© Кудельский А. В., 2020  
© Оформление. РУП «Издательский дом  
«Беларуская навука», 2020

## ПРЕДИСЛОВИЕ

В книге приводятся результаты новейших фундаментальных космогеологических исследований истории воды и гидросферы территории Беларуси как части древней Восточно-Европейской платформы, происхождения нефти и газа, а также мощных солевых и калийно-солевых толщ Припятского палеорифта. Вместе со стройматериалами (песок, глина, доломиты, мел, гравийно-галечные образования, каменная крошка и др.) пресные и минеральные подземные воды, соль, калийные руды, нефть и газ составляют важнейший комплекс полезных ископаемых Беларуси. Многие аспекты проблем их формирования можно понять и объяснить, учитывая происхождение и физико-химическое состояние воды в земной коре и верхней мантии, температуро- и барообусловленные фазовые переходы воды, характер и интенсивность тепломассопереноса с участием воды или ее субмолекулярных частиц по профилю «верхняя мантия–земная кора».

**Вода** самое распространенное на Земле вещество, важнейший природный ресурс, основа самой природы и систем планетарного жизнеобеспечения. Это необычное по физико-химическим свойствам соединение двух атомов водорода и одного атома кислорода является матрицей жизни, определяет современный облик земной поверхности, климат и энергетику процессов жизнеобеспечения всего сущего.

В работе развивается теория космического происхождения воды, основной источник которой после образования Солнечной планетарной системы, локализуясь изначально в пропланетном веществе, составляет неотъемлемую часть материальной системы планет, в том числе планеты Земля. Геологическая (земная) история воды рассматривается на примере эволюции земного вещества в структурно-геологических пределах территории Беларуси, как части Восточно-Европейской платформы.

В результате выполненных исследований охарактеризовано не только физико-химическое состояние воды в различных термобарических условиях земных недр, но и установлены две группы геофлюидальных систем: суб- и надкритических для воды (соответственно  $374-450 > T, ^\circ\text{C} > 450$ ), которые вместе с гидрогеологической системой структурированных вод ( $\text{H}_2\text{O}$ ) составляют, как показано ниже, гидрофизическую, гидро- и флюидогеологическую зональность литосферы и верхней мантии. Разработанная таким образом гидро-

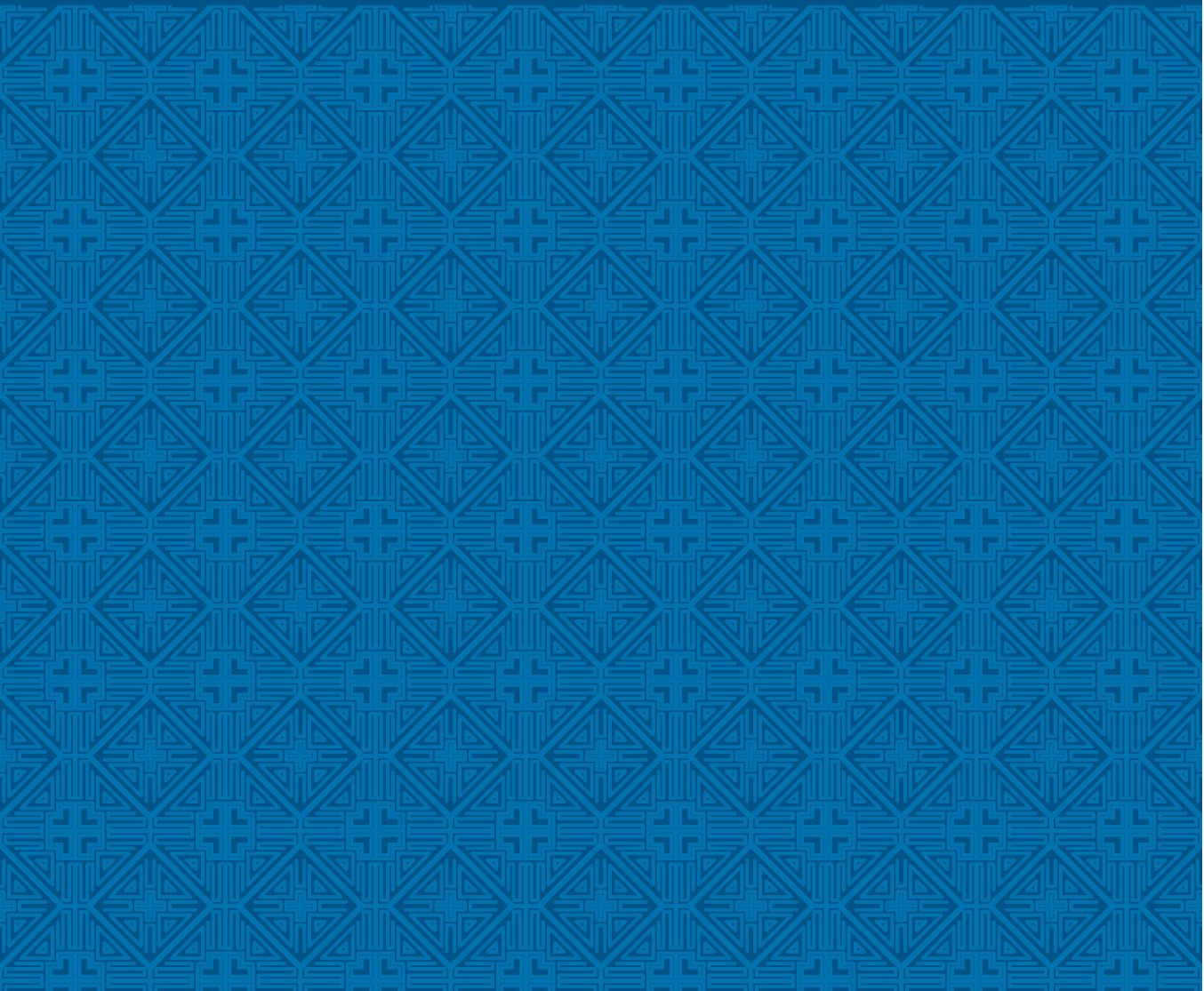
и флюидогеологическая зональность представляет собой основу для решения научно-практических проблем тектонофизики, минерогенеза, гидрогеологии, генезиса и распределения в геологическом субстрате разнотипных полезных ископаемых, в том числе таких, как мощные солевые и калийно-солевые толщи, нефть и газ и многих других.

При подготовке настоящей работы неоценимую помощь автору оказывали сотрудники лаборатории гидрогеологии и гидроэкологии Института природопользования НАН Беларуси кандидаты геолого-минералогических наук Л. Н. Рябова, Б. И. Коробейников и научный сотрудник И. А. Залыгина. Успешному завершению работы способствовало также плодотворное обсуждение особенно сложных научных проблем с членом-корреспондентом НАН Беларуси Р. Е. Айсбергом, а также с рецензентами академиком А. А. Махначем и доктором геолого-минералогических наук В. Н. Астапенко. Всем им автор выражает свою искреннюю признательность и благодарность.

## Раздел I

---

# ВОДА И ГЕОФЛЮИДЫ



## ПРОИСХОЖДЕНИЕ ВОДЫ И ГИДРОСФЕРА

*Основу геологической концепции происхождения воды на Земле составляют представления о ее внутренних, планетарных источниках. Первичная («ювенильная») вода могла быть только химически связанной в твердом протопланетном веществе и выделяться в виде субмолекулярных частиц и молекулярной воды в условиях высоких температур (450–1500 °С) и давлений ( $0,3 \leq 120$  ГПа) преимущественно в подастеносферной мантии, в собственно астеносфере и выше, в коромантийном слое. Поверхностные первичные водопроявления (протоокеан) отличались высокой минерализацией, однако служили источником пресных вод вследствие естественной дистилляции – испарения с их поверхности и конденсации в условиях остывающей планеты. Поступление воды на Землю в составе вещества астероидов и комет рассматривается как дополнительное и менее значимое по массе.*

### Введение

Проблема воды (и гидросферы вообще) стоит в основе более общих проблем формирования и эволюции Земли как планетарного образования, ее структуры и вещественного состава (петрология, геохимия, гидрогеология). От состояния наших представлений о генезисе воды зависит, кроме того, уровень развития многих естественно-научных направлений и разработок, в том числе в области поисков, разведки и эксплуатации практически всех видов полезных ископаемых, используемых человечеством, от собственно воды и специфических природных водных растворов (поликомпонентные рассолы, минеральные воды и др.), рудных и нерудных ископаемых до энергоносителей различного облика и происхождения (радиоактивные вещества, нефть и газ, термальные воды и др.).

### Общая информация по проблеме

Исследованиями последних десятилетий с использованием межпланетных станций и высокоточной аналитической аппаратуры установлено повсеместное присутствие воды в космическом пространстве, основное вещество которого представлено межзвездными молекулярными облаками и облаками межзвездной пыли. Первые состоят из водорода (~ 70 мас.%), гелия (~ 28 мас.%), других элементов и простейших соединений типа CH, CN, NH<sub>3</sub> и др. (~ 2 мас.%). Межзвездную пыль составляют углеродные и силикатные частицы (~ 0,1 мкм), замерзшие газы и водяной лед.

Согласно современным представлениям, Солнечная система сформировалась из большого вращающегося облака межзвездной пыли и газа – солнечной

туманности. Газовая составляющая туманности была представлена водородом и гелием, образовавшимися вскоре после Большого взрыва, имевшего место 13,7 млрд лет назад, а также более тяжелыми элементами, выброшенными сверхновыми. Около 4,5 млрд лет назад вращение туманности, по-видимому, под воздействием ударной волны от ближайшей сверхновой или в процессе вращения самой туманности начало ускоряться и под влиянием углового момента вращения, гравитации и инерционных сил сформировался протопланетный диск с плоскостью перпендикулярной оси вращения. При отсутствии значительного углового момента вещество в центре туманности подверглось гравитационному сжатию, температура и давление в нем возросли настолько, что стал возможен процесс термоядерного синтеза гелия из водорода: появилась новая звезда – Солнце. Во внешней же части солнечной туманности под воздействием гравитации в местах возмущения плотности происходило укрупнение пылеватых частиц, формирование планетезималий и протопланет. Их вещественный состав и пространственная структура собственно солнечной планетарной системы определялись энергетикой образовавшегося Солнца (Ларин, 1980 и др.).

Сформировавшиеся таким образом планеты Солнечной системы подразделяются на две принципиально разные группы: внутренняя – представлена небольшими планетами с высокой плотностью – Меркурий, Венера, Земля и Марс, сложенные каменным и металлическим веществом; внешняя – Юпитер, Сатурн, Нептун и Уран – состоит из более массивных и менее плотных газово-жидких тел с каменными ядрами.

Основная масса воды в Солнечной системе связана с планетами-гигантами внешнего пояса и их крупными спутниками, отличающимися высоким содержанием (до 50 %) воды и водного льда.

Водой принято обычно считать вещество состава  $H_2O$ , однако в геологических образованиях Земли существуют и другие соединения водорода с кислородом, которые также нельзя исключить из общего понятия воды в широком смысле этого слова: среди них – гидроксид  $OH^-$ , гидроксоний  $H_3O^+$ , гидроперекисный радикал  $HO_2^-$ , перексид водорода  $H_2O_2$ , экситон  $H_2O^-$  (возбужденная молекула воды), гидратированный электрон  $\bar{e}_{aq}$  (в сочетании с  $H_2O$  и  $H_3O^+$ ), положительно заряженная молекула воды  $(H_2O)^+$ . В понятие *гидросфера* Земли включаются также воды, связанные с горными породами физически (гигроскопические, пленочные и капиллярные) или химически (цеолитные, кристаллизационные, конституционные). Вода, входящая в кристаллическую решетку минералов (конституционно-кристаллизационная), представлена в формах  $H_2O$ ,  $OH^-$ ,  $H^+$  и  $H_3O^+$  и при нагревании может выделяться в виде свободной воды  $H_2O$ .

В геологических концепциях образования Земли (Виноградов, 1959; Ларин, 1980; Рингвуд, 1981; Сорохтин, 2010 и др.) вода рассматривается как преимущественно внутрипланетарное образование, обязанное своим происхождением дегазации коромантийного субстрата планеты.

Первичная («ювенильная») вода изначально могла быть только химически связанной в твердом веществе протопланетного облака, которое, согласно современным произвольным представлениям, может быть идентифицировано как хондритное. Хондриты представляют собой смесь силикатной (хондры, до 80 %), железной, сульфидной (троилитной), хромитной, углистой и фосфидной фаз, возникших путем агломерации в космическом вакууме холодного конденсированного вещества (Виноградов, 1959). По А. П. Виноградову, содержание связанной воды в метеоритах в среднем составляет 0,5 мас.%, при экстремальных содержаниях до 11,7–12,9 мас.%. Исследованиями Г. П. Вдовыкина (Вдовыкин, 1967) установлено, что в углистых хондритах содержание воды может достигать 13,31–19,89 мас.% (метеорит Оргей). Возможны метеориты и чисто ледяные, состоящие, правда, не только из водных льдов, но и из льдов аммиачных, углекислотных, метановых, этановых и циановодородных.

В соответствии с современными представлениями ледяные кометы поступают из околосолнечного гипотетического облака Оорта (Oort, 1950), внешняя граница которого определяет гравитационную границу Солнечной системы – сферу Хилла, размер которой оценивается в 2 световых года. Полагают, что падение ледяных ядер космических тел может приводить к существенному росту запасов воды на Земле. Однако выполненными Е. С. Гавриленко и В. Ф. Дерпгольцем (Гавриленко, Дерпгольц, 1971) оценками «астероидного» приращения земной гидросферы показано, что оно не столь значительно, чтобы принимать его в качестве основного источника воды на планете (в полторы тысячи раз меньше массы современного Мирового океана и в 2,5 тысячи раз меньше объема современной гидросферы Земли).

Помимо первичной воды, аккумулированной в твердом веществе планеты, и воды, поступающей из межпланетного пространства с метеоритами, космической пылью и кометным веществом, вода может возникать также в ионосфере Земли под воздействием космического излучения. На высоте полярных сияний (до 1100 км) и ниже посредством спектрального анализа в атмосфере Земли идентифицированы радикалы  $O_2^+$ , атомы Н, О, ионы  $O^-$  и  $O^{2+}$ , что подтверждает потенциальную возможность образования молекул воды через ряд промежуточных реакций. Первичная (ювенильная) вода может также формироваться (и формируется) в многочисленных реакциях окисления (например, горение метана  $CH_4 + 2O_2 = 2H_2O + CO_2$ ).

С учетом сравнительного анализа продуктивности перечисленных источников воды в геологии с высокой степенью вероятности принимается, что гидросфера Земли образована преимущественно из первичной воды, содержащейся в связанном состоянии в веществе протопланетного облака, изначально составившего весь объем планеты и ее внутренний источник воды. Все остальные источники рассматриваются как несопоставимо менее значительные и дополнительные. Выделение воды из геологического субстрата Земли в свободное состояние происходило (и происходит) постепенно (рис. 1) под влиянием и в процессе тепловой эволюции этого субстрата.



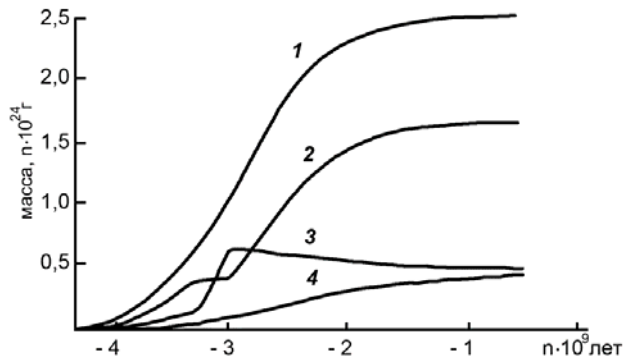


Рис. 1. Изменения со временем масс воды в поверхностной гидросфере и земной коре (по О. Г. Сорохтину, 2010): 1 – суммарная масса воды, дегазированной из мантии; 2 – масса воды в поверхностной гидросфере; 3 – масса связанной воды в океанической коре; 4 – масса связанной воды в континентальной коре

### Вода и геофлюиды земной коры и верхней мантии

Генезис и физико-химическое состояние глубинной воды как планетарного образования определяется, что совершенно понятно, составом и термобарическим состоянием (РТ-состояние) твердого и твердопластичного вещества земных недр.

### Структура Земли

В соответствии с сейсмологическими и петрологическими исследованиями (Буллен, 1958) в строении Земли выделяется несколько геосфер: *земная кора, мантия и ядро*. *Земная кора* – слой А (табл. 1) твердой оболочки Земли средней толщиной ~ 33–35 км. *Мантия* – слой планетарного вещества, составляющего 83 % объема Земли и 67 % ее массы, с нижней границей на глубине 2900 км (рис. 2). Делится на *верхнюю* (слой В с нижней границей на глубине около 410 км), *среднюю* (слой С с глубинами залегания 410–1000 км) и *нижнюю* (слой D с глубинами 1000–2900 км) мантии. В геосфере В на глубинах 100–300 км прослеживается слой с пониженными жесткостью, скоростями продольных и поперечных волн и вязкостью, называемый *астеносферой* (волновод Гутенберга). Вышележащая часть слоя В вместе с земной корой называется *литосферой*. *Ядро* составлено внешним псевдожидким слоем Е (2900–4980 км), переходным слоем F (4980–5120 км) и внутренней твердой сферой G (5120–6370 км).

Приведенные геофизические границы (рис. 2, табл. 1) достаточно условны, геосферы А, В, С (и даже D) взаимно проникают друг в друга под воздействием преимущественно субдукционных погружений (слэбы и отдельные блоки, blobs) и конвективно-диффузионных потоков вещества и энергии (термохимическая конвекция, плюмы и суперплюмы) перманентно перестраивающейся материальной системы мантии Земли.

Таблица 1. Физические характеристики геосфер

Зона	Глубина, км	Плотность, г/см <sup>3</sup>	Давление, ГПа	Температура, °С
А	0–33	3,32	1	
В	33–410	3,64	14	900–1200
С	410–1000	4,68	39	1370–1970
D'	1000–2700			1970–2700
D''	2700–2900	5,69–9,4	137	2900
Е	2900–4980	11,5	317	
F	4980–5120			
G	5120–6370	17,2	364	3900

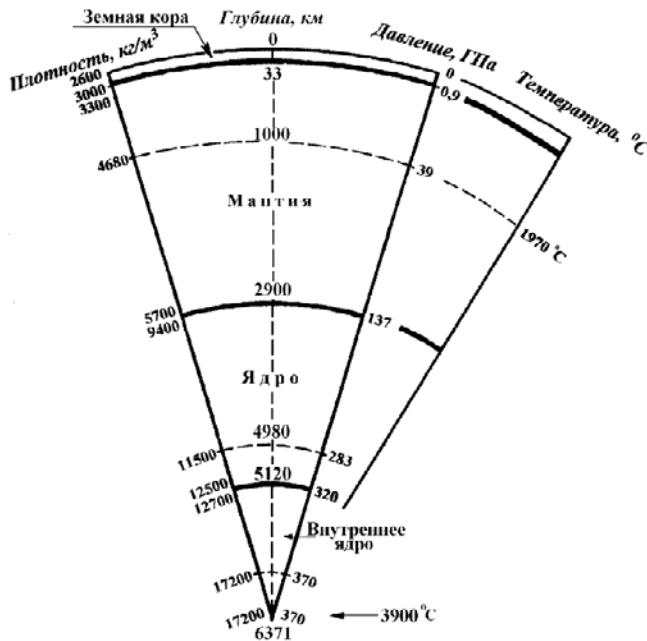


Рис. 2. Традиционная схема глубинного строения Земли

### Мантийное вещество и магматизм

Первичный недифференцированный субстрат верхней мантии ассоциируется с пиролитом (гипотетическое вещество мантии), соответствующим смеси  $\frac{1}{4}$  базальта и  $\frac{3}{4}$  перидотита. Гипотетически минеральный состав пиролита представляется (Акаоги, 1995) смесью оливина  $(Mg, Fe)_2SiO_4$  (57 мас.%), ромбического пироксена  $(Mg, Fe)SiO_2$  (17 мас.%), моноклинного пироксена  $(Ca, Mg, Fe)_2Si_2O_5$ – $NaAlSi_2O_6$  (12 мас.%) и граната  $(Mg, Fe, Ca)_3(Al, Cr)_2Si_3O_{12}$  (14 мас. %).

Полагают, что парциальное плавление пиролита приводит к формированию только легкоплавкого дифференциата – базальтовой магмы, остаточный

более плотный материал представлен дунитом или перидотитом. Плавление пиролита с последующим вертикальным перемещением базальтовых магм и связанных с ними трансмагматических восстановленных флюидов ( $H_2$ , C,  $CH_4$ ), трансформирующихся при подъеме в сложные газодонные флюидалные системы ( $H_2$ ,  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $H_2O$ ,  $SiO_2$ , галогены и другие летучие) при варьирующих РТ-условиях, представляет собой важнейший механизм дифференциации и дегазации мантийного вещества. В результате формируются физико-химические неоднородности в мантийном субстрате, осуществляется вынос легколетучих дифференциатов, а также  $CaO$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  и множества других из низов верхней мантии и накопление их в подкоровом субстрате верхней мантии (волновод Гутенберга или астеносфера) и в литосфере.

Дифференциация мантийного вещества имеет место в районах РТ-нестабильности верхней мантии и, как следствие, высокой тектонической активности, провоцирующей формирование магматических расплавов, вулканических извержений и весьма разнообразных поствулканических процессов и явлений.

Магмы представляют собой преимущественно силикатные расплавы на основе оксидов кремния, кальция, магния, железа, алюминия, натрия и калия, насыщенные легколетучими «парами» воды, галогенами, водородом и другими субгазовыми компонентами и ассоциациями (до 4–5 мас.%). По содержанию  $SiO_2$  магмы и образованные на их основе интрузивные и эффузивные породы (вулканыты) подразделяются на ультраосновные ( $SiO_2 < 44$  мас.%), основные (44–53 мас.%), средние (53–64 мас. %) и кислые ( $SiO_2 > 64$  мас.%).

В группе базальтовых магм различают нормальные известково-щелочные ( $CaO + K_2O + Na_2O > Al_2O_3 > K_2O + Na_2O$ ), глиноземистые ( $Al_2O_3 > 16,5$  мас.%), щелочные ( $K_2O + Na_2O > Al_2O_3$ ) и толеитовые (насыщенные или пересыщенные по  $SiO_2$ , с повышенным относительно пиролита содержанием Fe, Al, Ti, Ca). Полагают, что толеитовые магмы выплавляются на глубинах 15–30 км, глиноземистые – 40–70, щелочные – 70–150 и, наконец, ультраосновные магмы – на глубинах 300–400 км.

С общей дифференциацией и дегазацией мантийного вещества связывается становление литосферы, формирование массы и состава атмосферы и гидросферы. Если физико-химические условия для глубокого расслоения существенного субстрата прежде недифференцированной (примитивной) мантии создаются преимущественно в тектонически активных областях за счет резкого снижения давлений в тектонически ослабленных зонах глубинных разломов, то процессы формирования здесь собственно магм, вулканических извержений и поствулканической гидротермальной деятельности инициируются и протекают только с участием воды, активно понижающей температуру плавления силикатов и интенсивно растворяющейся в них. В зависимости от основности – кислотности магм содержание в них воды находится в основных меньше, в кислых – на один-два порядка больше и соответственно объемы магматических выплавов.

### *Количество и источники воды в мантии*

В соответствии с представлениями некоторых исследователей (Kulr, 1951; Виноградов, 1959; и др.) мантия является важнейшим источником воды на поверхности Земли. Допуская, что содержание воды в породах мантии (0,21–0,48 %) соизмеримо с ее содержанием в каменных метеоритах (около 0,5 %), А. П. Виноградов определяет количество  $H_2O$  в мантийном веществе (масса  $4 \cdot 10^{27}$  г) величиной  $2 \cdot 10^{25}$  г. По мнению Ф. А. Макаренко (Гавриленко, Дерпгольц, 1971), в верхней и нижней мантиях содержится  $3 \cdot 10^{25}$  г воды, причем с верхней 400-километровой частью мантии связано столько же воды, сколько ее содержится в остальной 2500-километровой толще.

Приняв массу воды в мантии равной  $3 \cdot 10^{25}$  г, а количество воды в гидросфере –  $1,5 \cdot 10^{24}$  г, можно определить обводненность первичного вещества мантии, участвовавшего в формировании земной коры и гидросферы (~ 5 %).

Существуют другие оценки количества воды в мантии. С учетом некоторых характерных петрологических соотношений ( $H_2O/K_2O$ ,  $CO_2/H_2O$  и др.) для вулканитов примитивной мантии И. Д. Рябчиков (Рябчиков, 1985) определяет концентрацию воды в мантии равной 0,014–0,034 мас.%, что с учетом принятой им массы мантийного материала  $4068 \cdot 10^{21}$  г (по А. А. Беусу) составляет  $0,57 \cdot 10^{21}$ – $1,38 \cdot 10^{21}$  г. В деплетированной мантии (т. е. потерявшей некоторое количество расплава в процессе мантийного магмообразования в геологическом прошлом) содержание воды, как полагает И. Д. Рябчиков, может быть еще ниже. При этом есть все основания полагать безводными (вернее, только потенциально водосодержащими, имея в виду наличие водорода и кислорода) всю мантию ниже (глубже) изотермы 1500 °С (тепловая граница устойчивости  $H_2O$ ,  $OH^-$ ,  $H_3O^+$  и др.), а также крупные блоки недифференцированного или слабо дифференцированного мантийного вещества зоны В ниже и выше волновода Гутенберга (астеносферы), не затронутые процессами глубинного тектогенеза (примитивная, неактивированная мантия).

### *Физико-химическое состояние воды*

Как упомянуто выше, в зоне диссоциированных вод при температуре более 1500 °С вода, как молекулярное образование, по-видимому, не существует (табл. 2) из-за доминирования процесса диссоциации. Выше изотермы 1500 °С, соответствующей максимальной температуре базальтовой магмы, можно говорить преимущественно о ионном состоянии воды.

В соответствии с исследованиями (Ильин, 1972) формирование молекулярной воды связано с окислением водорода трансмантийных флюидов при его взаимодействии с кислородсодержащими породами (силикаты и др.). В гидрофизической зоне мономерных молекул воды ( $T = 700$ – $1100$  °С;  $5 < P < 10$  ГПа) вода не имеет водородных связей (величина энтропии 22,8–21,0 кал/г-град), что свидетельствует о ее близгазообразном флюидальном состоянии, обеспе-

чивающем перенос ионов с положительной энергией гидратации ( $Al^{3+}$ ,  $Fe^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Li^+$ ,  $CO_3^{2-}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Si^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $F^-$  и др.) в форме гидридов, двойных хлоридов, комплексных соединений и полимеров, например кремния, при их неограниченной смесимости в плотном ( $\sim 1,72$  г/см<sup>3</sup>) флюиде (табл. 2).

Таблица 2. Свойства воды в различных гидрофизических зонах (по данным В. А. Ильина (1972) с дополнением автора)

Свойства воды	Зона твердых вод со структурой льда	Зона жидких структурированных вод	Зона уплотненного флюида с субтаксической структурой	Зона мономерных молекул воды	Зона диссоциированных вод
Показатель	Температура (°C) и давление (ГПа)				
	$T < 0$	$0 < T < 450$ ; $P < 0,3$	$T = 450-700$ ; $0,3 < P < 5$	$T = 700-1100$ ; $5 < P < 10$	$T > 1100$ ; $10 < P \leq 120$
Диэлектрическая проницаемость	88,2	81–20	20–12,5	12,5–5	5–1,25
Энтропия, кал/г·град	10–9	28–23,2	23,2–22,8	22,8–21,0	–
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1–0,9	1,5–1,0	1,0–0,3	1,72	–
Вязкость, мПа·с	3,0	1,79–0,076	0,076–0,057	0,057–0,055	–
Диссоциация	$3,8 \cdot 10^{-22}$	$10^{-9}-10^{-13}$	$10^{-7}-10^{-9}$	$10^{-4}-10^{-7}$	$10^{-2}$

Попадая из эклогитовой фации метаморфизма в область более низких температур и давлений ( $T = 250-1100$  °C;  $0,3 < P < 5$  ГПа) гранулитовой фации, подобный флюид расслаивается с появлением некоторого количества ассоциатов воды с установившимися водородными связями. Появление последних приводит к частичному разрушению ранее созданных группировок летучих и выпадением ряда соединений (с кремнием, например, и др.). В связи с уменьшением степени диссоциации (до  $6 \cdot 10^{-8}$ ) и увеличением структурной упорядоченности вода приобретает свойства химического реагента (химически активная вода) и входит в решетки некоторых минералов, образовавшихся в верхах гранулитовой зоны (слюда и др.).

Выявлен (Кроуфорд, Холлистер, 1989) сложный состав флюидных включений в минералах метаморфических пород гранулитовой фации:  $CO_2$ ,  $CH_4$ ,  $N_2$ ,  $H_2O$ , концентрированный рассол. Флюидные включения в породообразующих минералах из многих гранулитов мира имеют существенно углекислотный состав (Touret, 1970, 1981), причем  $CO_2$  может поступать либо из погруженных в глубинные области коры горных пород, либо за счет дегазации карбонатизированной мантии (Sheraton et al., 1973). При этом флюиды гранулитовой фации метаморфизма заметно обеднены  $H_2O$  (Touret, 1981), хотя существует мнение (Ньютон, 1989), что во флюидных включениях из некоторых гранулитов содержится до 20 % недиагностируемой  $H_2O$ .

Вместе с тем криометрическое изучение флюидных включений в породах гранулитовой фации метаморфизма показало, что водно-углекислотные флюиды содержат, как правило, растворенные соли преимущественно на основе NaCl. Соленость подобных флюидов контролируется содержанием  $Cl^-$  и варьрует

от ~ 2–6 до 20–25 % NaCl-эквивалента и выше (Кроуфорд, Холлистер, 1989). Наиболее распространенным компонентом подобных метаморфогенных рассолов является Na, а наименее распространенным Mg. Содержание K, Ca и Fe во флюиде зависит от состава вмещающих минеральных ассоциаций, общей солености флюида и P-T-условий метаморфизма.

Касаясь присутствия  $N_2$  во флюидных включениях, можно предположить, что его появление связано с разложением  $NH_4$ -содержащих минералов, в ряду которых (K – полевой шпат – мусковит – биотит) содержание  $NH_4$  возрастает. Разложение этих минералов с выходом  $N_2$  может иметь место в P-T-условиях гранулитовой фации метаморфизма, так и при анатексисе (Wlotzka, 1961).

Наметившаяся тенденция участия ассоциированной воды в реакциях метаморфизма усиливается в P-T-условиях амфиболитовой фации (около 550–750 °C) и широко представлена в P-T-условиях формирования фации зеленых сланцев (250–450 °C; 0,15–0,35 ГПа). Судя по величине коэффициента диссоциации ( $1,2 \cdot 10^{-10}$ – $1,9 \cdot 10^{-9}$ ) и энтропии (117–142 кДж/кмоль·K), вода здесь выступает в качестве активного химического реагента, приобретает черты растворителя (диэлектрическая проницаемость примерно 20,0–12,5) и благодаря низкой вязкости ( $0,076$ – $0,057$ )· $10^{-3}$  Па·с) способна обеспечить перемещение значительного количества вещества.

Остаточные воды (рассолы) процессов формирования эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма вскрыты на Кольском полуострове сверхглубокой скважиной СГ-3 на глубинах 4500–6900 м и более (вплоть до 9200 м) в разрезе доломитов и доломитизированных песчаников (4673–4884 м), метадиабазов и метаандезитов (4884–5642 м), тремолит-карбонатных сланцев, мраморизованных известняков, кварцито-песчаников (5642–5717 м), амфибол-плагиоклазовых и биотит-амфибол-плагиоклазовых сланцев (5717–6823 м). Минерализация этих вод достигает 200–300 г/дм<sup>3</sup>, в ионном составе доминируют Cl, Na и Ca, присутствуют Br, J, Rb, B, из газовых компонентов установлены  $H_2$ ,  $CO_2$  и He. С учетом структурно-геологической локализации рассолов петрологических и геохимических характеристик вмещающих пород возраст остаточных рассолов процессов формирования эпидот-амфиболитовой фации метаморфизма оценивается в 1 млрд лет (Кольская..., 1984).

Развитие процессов структурирования воды усиливается в P-T-условиях «цеолитной» фации метаморфизма (до 250 °C; 0,10–0,15 ГПа), где, по мнению В. А. Ильина (Ильин, 1972), принципиально возможно существование элементов «ажурности» в ее структуре и переход в раствор ионов с отрицательной энергией гидратации ( $K^+$ ,  $Pb^+$ ,  $Cs^+$ ,  $Tl^+$ , Br, J). При понижении давления и частичном распаде структуры воды появляется тенденция к переходу в раствор ионов с положительной энергией гидратации.

Таким образом, представляется очевидным, что только в докритической области состояние воды соответствует жидкоподобному (Горбатый, Бондаренко, 1973; Ильин, 1972; Франк, 1971), в надкритических условиях ( $374 < T < 700$  °C

и  $P > 0,25-0,30$  ГПа) – состоянию относительно высокодиссоциированной ( $1,2 \cdot 10^{-10}-1,9 \cdot 10^{-9}$ ) жидкости со свойствами активного химического реагента и, в меньшей мере, растворителя, способного, тем не менее, обеспечить перемещение значительного количества вещества в составе флюидальной фазы (Горбатый, Бондаренко, 1973; Семенченко, Баскакова, 1965; Франк, 1971; Штернберг, 1962 и др.). В надкритических условиях литосферы возможны «существенно жидкоподобные, газоподобные и промежуточные между ними состояния» воды (Горбатый, Бондаренко, 1973). Подобному флюидальному состоянию свойственны неограниченная смесимость воды, газов, разнообразных минеральных соединений, элементов и ионных ассоциаций (Франк, 1971), а также фазовая неустойчивость при даже незначительных вариациях в системе P–V–T.

Формирование субмолекулярных частиц ( $H^+$ ,  $OH^-$ ,  $H_3O^+$  и др.) и молекулярной воды в условиях высоких температур (450–1500 °C) и давлений (0,3 – <120 ГПа) предполагает источники первичных (ювенильных) вод в подастеносферной мантии, в собственно астеносфере и выше, в «коромантийном слое» аномальной или «склеротической мантии» (Грачев, 1987). Генетически близким семейству ювенильных вод представляются метаморфогенные водно-газовые флюиды и реституционные постметаморфические водные растворы (Кудельский, 2005). Множественность источников ювенильной и квазиювенильной (метаморфогенной) воды позволяет ожидать и разнообразия ее физико-химических свойств в зависимости от состава и P-T-условий дифференциации мантийного или коро-мантийного вещества, состава и термодинамики процессов метаморфизма магматических и (или) первично-осадочных пород.

## Гидросфера Земли

О первых 500–600 млн лет истории Земли можно судить в основном гипотетически. В соответствии с теоретическими расчетами А. Е. Рингвуда (Рингвуд, 1981) оформилась концепция существования в этот период расплавленной верхней оболочки протопланетного вещества Земли мощностью 400–700 км. Последующее остывание и кристаллизация вещества этой оболочки привели к формированию протолитовой коры (3,6 млрд лет) и астеносферы, а в конце архея и раннем протерозое (2,6 млрд лет) – фрагментов материковой коры, атмосферы и гидросферы. Появление воды в составе глубинного геофлюида, представленного преимущественно водородом, окисляющимся до  $H_2O$  в силикатных образованиях первичной коры, и «калиевый взрыв» с последующей гранитизацией континентальной коры на границе архея и протерозоя (4,0–3,6 млрд лет), по-видимому, были синхронны и взаимообусловлены (Ларин, 1980). С рубежа примерно 4,0 млрд лет, когда температура поверхности планеты снизилась до 100 °C и ниже, появились условия для образования поверхностных вод и протоокеана. Согласно оценкам И. Д. Рябчикова (Рябчиков, 1999), на формирование поверхностных водоемов было израсходовано до 70–75 %

содержания в мантии ювенильных вод, оставшихся в ней после гидратации породообразующих минералов (серпентизация и др.) на ранних этапах развития Земли.

Максимальная дегидратация мантийного вещества с выходом ювенильных вод ( $1,25 \cdot 10^{15}$  г/год) имела место в начале протерозоя (2,5 млрд лет назад), постепенно снижаясь она достигла  $0,25 \cdot 10^{15}$  г/год в современную эпоху (Сорохтин и др., 2010).

По мере перемещения надкритических геофлюидов из подастеносферной мантии, астеносферы и коромантийного слоя в области относительно пониженных температур подобные флюиды перманентно расслаиваются с появлением ассоциированной воды, разрушением ранее созданных группировок летучих и, как следствие, выпадением ряда соединений элементов (кремний, металлы). Приобретая черты активного химического реагента и растворителя, вода способна перемещать значительное количество растворенного вещества и на всех этапах расслоения флюидов и перманентного роста объемов водных ассоциатов оставаться высокоминерализованной жидкостью – своеобразным жидкофазным «реститом» из сферы процессов метаморфизма горных пород. Об этом свидетельствуют не только упоминаемые выше данные декрипитации газовой-жидких включений в минералах горных пород различных фаций метаморфизма, но и повсеместное присутствие высокоминерализованных (до и более 300 г/л) вод и рассолов в кристаллическом фундаменте древних платформ вне областей галогенеза (Коротков и др., 1978; Вовк, 1982; Кудельский, 2005, 2010 и др.). Сведения о составе эндогенных соленых вод и рассолов в фундаменте древних платформ и современных терм Срединно-океанических рифтов (Кононов, 1983) позволяют выделить некоторые специфические черты их геохимического облика. Среди важнейших из них очень высокая минерализация (до 300 г/дм<sup>3</sup>), хлоридный натриевый (редко кальциевый) состав, высокие содержания калия ( $r_{Na^+}/r_{K^+} < 200$ ), закисного железа, относительно низкие pH (< 6,0–6,5) и преимущественно восстановленные рассолорастворенные газы.

Оценивая приведенные выше материалы с позиции теории гидрогеологии и проблем формирования подземных вод, представляются бесспорными данные о высокой «солевой» нагрузке надкритических флюидов. Поэтому встречающиеся иногда попытки рассматривать верхнюю мантию как потенциальный возобновляемый источник пресной воды (Грачев, 1987 и др.) являются необоснованными. Пресноводная составляющая подземной гидросферы обязана своим происхождением только (и только!) инфильтрации пресных поверхностных вод, формирующихся в процессе испарения с земной поверхности и водных бассейнов (океаны, моря, реки, болота; табл. 3), атмосферного переноса парообразной воды, ее конденсации и выпадения в виде гидрометеоров. Других сколько-нибудь значимых естественных источников пресной воды не существует.



Таблица 3. Поверхностная и приповерхностная пресноводная гидросфера Земли (по М. И. Львовичу, 1986)

Часть гидросферы	Объем (с округлением), тыс. км <sup>3</sup>
Океан	1 370 000
Подземные воды	60 000
В том числе зоны активного водообмена	4 000
Полярные ледники	24 000
Поверхностные воды суши	280
Реки	1,2
Почвенная влага	80
Пары атмосферы	14
Вся гидросфера	1 454 000

### Заключение

Таким образом, основу геологической концепции происхождения воды на Земле составляют представления о ее внутренних, планетарных, источниках. Принимается достаточно вероятным, что на первых этапах становления планеты в результате плавления и дегазации верхней мантии на поверхность Земли могли поступать три фракции мантийного материала: *базальтовая магма*, «растворенные» в ней *вода* и *парогазовые ассоциации* ( $H_2O$ ,  $CO_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ ,  $H_2S$ ,  $HCl$ ,  $HF$ ,  $He$ ,  $Ne$ ,  $Ar$ ,  $Kr$ ,  $Xe$  и некоторые др.) элементов и соединений. Все они составили первичную атмосферу Земли, из вещества которой формировалась гидросфера и протоокеан, причем ранние конденсированные воды на Земле были кислыми и высокоминерализованными. В анионной части первичных водных растворов и вод первичного протоокеана доминировал  $Cl$ , присутствовали  $F$ ,  $Br$ ,  $I$  и многочисленная группа металлов. Пресные воды и пресноводная гидросфера Земли с присущей им низкой минерализацией, набором анионов и катионов появляются позднее вследствие процессов естественной дистилляции – испарения с поверхности первичных водоемов и конденсации в благоприятных условиях остывающей планеты.

Поступление воды на Землю в составе астероидов и из других источников в геологии рассматривается как дополнительное и менее значимое по массе.

### Список использованных источников

- Булен, К. Сейсмология и внутреннее строение Земли / К. Булен. – М.: Иностранная литература, 1958. – С. 97–127.
- Вдовыкин, Г. П. Углеродистое вещество метеоритов / Г. П. Вдовыкин. – М.: Наука, 1967.
- Виноградов, А. П. Метеориты и земная кора / А. П. Виноградов // Изв. Акад. наук СССР. Сер. Геология. – 1959. – № 10. – С. 5–27.
- Вовк, И. Ф. Рассолы кристаллического фундамента щитов / И. Ф. Вовк. – Киев, 1982. – 164 с.
- Гавриленко, Е. С. Глубинная гидросфера Земли / Е. С. Гавриленко, В. Ф. Дерпгольц. – Киев: Наукова думка, 1971. – 272 с.
- Грачев, А. Ф. Рифтовые зоны Земли / А. Ф. Грачев. – М.: Недра, 1987. – 285 с.

- Горбатый, Ю. Е. Молекулярные спектры воды при высоких давлениях и температурах / Ю. Е. Горбатый, Г. В. Бондаренко // Фазовые равновесия и процессы минералообразования. – М.: Наука, 1973. – С. 207–231.
- Ильин, В. А. Состояние и свойства воды в глубоких горизонтах земной коры / В. А. Ильин // Изв. вузов. Геология и разведка. – 1972. – № 10. – С. 77–82.
- Кольская сверхглубокая скважина. – М.: Недра, 1984. – 490 с.
- Кононов, В. И. Геохимия термальных вод областей современного вулканизма / В. И. Кононов. – М.: Недра, 1983. – 214 с.
- Кроуфорд, М. Л. Природа метаморфических флюидов по данным изучения флюидных включений / М. Л. Кроуфорд, Л. С. Холлистер // Взаимодействие флюид–порода при метаморфизме. – М.: Мир, 1989. – С. 9–48.
- Кудельский, А. В. Высокоминерализованные воды и рассолы в верхнепротерозойских отложениях и кристаллическом фундаменте древних платформ (на примере Восточно-Европейской платформы и территории Беларуси) / А. В. Кудельский // Литасфера. – 2005. – № 2 (23). – С. 9–21.
- Ларин, В. Н. Гипотеза изначально гидридной Земли / В. Н. Ларин. – М.: Недра, 1980. – 216 с.
- Львович, М. И. Вода и жизнь / М. И. Львович. – М.: Мысль, 1986. – 254 с.
- Ньютон, Р. С. Флюиды гранулитовой фации метаморфизма / Р. С. Ньютон // Взаимодействие флюид–порода при метаморфизме. – М.: Мир, 1989. – С. 49–75.
- Рингвуд, А. Е. Состав и происхождение Земли / А. Е. Рингвуд. – М.: Наука, 1981. – 113 с.
- Рябчиков, И. Д. Водные растворы в верхней мантии и проблемы дегазации Земли / И. Д. Рябчиков // Подземные воды и эволюция литосферы: материалы Всесоюз. конф. Т. 1. – М.: Наука, 1985. – С. 176–186.
- Рябчиков, И. Д. Флюидный режим мантии Земли / И. Д. Рябчиков // Вестник ОГГГГН РАН. – 1999. – № 3 (9). – С. 141–153.
- Семенченко, В. К. О закритической области воды / В. К. Семенченко, В. Б. Баскакова // Журн. физ. химии. – 1965. – Т. 39, № 23. – С. 3105–3107.
- Соленые воды и рассолы Балтийского щита / А. И. Коротков [и др.] // Докл. Акад. наук СССР. – 1978. – Т. 238, № 9. – С. 951–954.
- Сорохтин, О. Г. Теория развития Земли: происхождение, развитие и трагическое будущее / О. Г. Сорохтин, Дж. В. Чилингар, О. Н. Сорохтин. – Москва–Ижевск: ИКИ, 2010. – 752 с.
- Франк, Е. У. Надкритическая вода / Е. У. Франк // Значение структурных особенностей воды и водных растворов для геологических интерпретаций. – М.: ВИМС, 1971. – Вып. 2. – С. 94–111.
- Штернберг, А. А. Состояние воды в надкритической области в связи с проблемами глубинного минералообразования / А. А. Штернберг // Геология рудных месторождений. – 1962. – № 5. – С. 13–19.
- Akaogi, M. Mineral physics pertinent to the constitution of the mantle and core / M. Akaogi // J. Phys. Earth. – 1995. – Vol. 43. – P. 457–478.
- Kulp, J. L. Origin of the hydrosphere / J. L. Kulp // Bull. Geol. Soc. Am. – 1951. – Vol. 62. – P. 326–329.
- Oort, Jan. The structure of the cloud of comets surrounding the Solar System and a hypothesis concerning its origin / Oort Jan // Bull. Astron. Inst. Neth. – 1950. – Vol. 11. – С. 91–110.
- Sheraton, J. W. The geochemistry of the Scourian gneisses of the Assint district / J. W. Sheraton, A. C. Skinner, J. Tarney // The Early Precambrian Rocks of Scotland and Related Rocks of Greenland, edited by R. G. Park and J. Tarney. – University by Keele, 1973. – P. 13–30.
- Touret, J. Le facies granulite, metamorphisme en milieu carbonique / J. Touret // C. R. Acad. Sci. Paris Ser. D. – 1970. – Vol. 271. – P. 2228–2231.
- Touret, J. Fluid inclusions in high grade metamorphic rocks, in Short Course in Fluid Inclusions: Application to Petrology / J. Touret // Min. Assoc. of Canada. Ed. by L. S. Hollister and M. L. Crawford. – 1981. – P. 182–208.
- Wlotzka, F. Geochemistry of nitrogen / F. Wlotzka // Geochim. Cosmochim. Acta. – 1961. – Vol. 24. – P. 106–154.

## СОДЕРЖАНИЕ

<b>Предисловие</b> .....	3
<b>ВОДА И ГЕОФЛЮИДЫ</b>	
Происхождение воды и гидросфера.....	6
Становление и доантропогенная эволюция гидросферы Беларуси.....	19
Гидросфера Беларуси на доплатформенных этапах геологического развития. Криптозой.....	19
Гидросфера Беларуси на плитных (ортоплатформенных) этапах геологического развития. Фанерозой.....	40
Подземная гидросфера и мантийно-нижнекоровые геофлюиды.....	56
<b>НЕФТЬ И ГАЗ</b>	
Региональная гидрогеология, тепловой режим и нефтегазоносность фанерозойских осадочных бассейнов.....	85
Специфические особенности геохимии триады «нефть–газ–рассолы» Припятского прогиба.....	119
<b>РАССОЛЫ И МОЩНЫЕ СОЛЕВЫЕ ТОЛЩИ</b>	
Высокоминерализованные воды и рассолы в верхнепротерозойских отложениях и кристаллическом фундаменте.....	153
Эксталяционно-осадочный галогенез в Припятском внутриконтинентальном палеорифте.....	173
<b>Заключение</b> .....	209