

УДК 551

## ВЗАИМОДЕЙСТВИЕ ВОДА–ПОРОДА В ПЕСЧАНО-ГЛИНИСТЫХ ОТЛОЖЕНИЯХ ВЕНДА МЕЗЕНСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

© 2004 г. А. И. Малов

*Институт экологических проблем Севера УрО РАН  
163061 Архангельск, наб. Северной Двины, 23  
E-mail: malovai@yandex.ru*

Поступила в редакцию 13.05.2002 г.

На основе анализа особенностей геологического строения и гидрогеологических условий Мезенской синеклизы показана направленность изменений состава подземных вод в песчано-глинистых отложениях венда в различных гидродинамических зонах, дана их количественная оценка.

Состав подземных вод и вмещающих их песчано-глинистых отложений на начальных этапах существования определяется природой источников сноса и гидрохимическим характером среды поверхностных бассейнов осадконакопления. В дальнейшем горные породы взаимодействуют с подземными водами, что приводит к изменению состава и тех, и других. Основные закономерности этого процесса исследовались в работах [Зверев, 1982; Шварцев, 1991 и др.]. Однако в различных регионах, обладающих спецификой геологического развития, итоговые последствия взаимодействия вода–порода существенно различаются, а расшифровка эволюции процесса представляется достаточно сложной и неоднозначной. Вместе с тем она крайне необходима, так как позволяет вскрывать роль различных геологических факторов, в том числе – определяющих формирование месторождений полезных ископаемых.

В данной работе предпринята попытка анализа изменения химического состава подземных вод в песчано-глинистых отложениях венда Мезенской синеклизы на основе палеогидрогеологических реконструкций.

### ОСОБЕННОСТИ ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ МЕЗЕНСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Мезенская синеклиза представляет собой обширную депрессию на севере Русской плиты, ограниченную на западе Балтийским щитом, на востоке – Канинско-Тиманским складчатым поясом. С расположенной южнее Московской синеклизой она сочленяется через Среднерусский авлакоген (рис. 1).

Кристаллический фундамент на большей части синеклизы имеет архейско-раннепротерозойский возраст и представлен интенсивно дислоцированными и глубокометаморфизованными гнейсами,

гранито-гнейсами, амфиболитами, кристаллическими сланцами. Только на северо-востоке синеклизы в Пешской впадине фундамент сложен сланцами байкальского (рифейского) комплекса.

Формирование Мезенской синеклизы тесно связано с процессами рифейского рифтинга на северо-восточной окраине Русской плиты и прогибанием территории в позднем венде над системой рифейских палеорифтов. Вследствие этого фундамент разбит на блоки, выделяющиеся в его рельефе в виде рифейских впадин и горстов. Структуры имеют в основном северо-западное простирание, представляя собой разветвленную сеть рифтовых грабенов.

В составе осадочного чехла Мезенской синеклизы присутствуют образования среднего и верхнего рифея, верхнего венда, палеозоя, мезозоя и кайнозоя (рис. 2).

**Рифейские отложения** слагают основание осадочного чехла. Они развиты по всей территории синеклизы, но наиболее полные разрезы отмечаются в пределах рифтовых впадин. На выступах фундамента мощность рифейских пород резко сокращается вплоть до полного их выклинивания. Глубина залегания – от десятков метров вблизи побережья Белого моря до 2–2.5 км в восточной части синеклизы. Максимальная вскрытая мощность – 1964 м (Усть-Мезенский рифт).

В целом для рифейских отложений мощностью порядка 2 км характерно наличие в разрезе двух циклов, выделяемых в качестве среднего и верхнего рифея. Характерен преимущественно аргиллитовый с прослоями мергелей, доломитов, известняков состав нижней части циклов и песчаниковый – верхней. В аргиллитах присутствует тонко рассеянное органическое вещество. Отмечается пиритизация глубокозалегающих пород рифея и преобладание гидроксидов железа в пес-

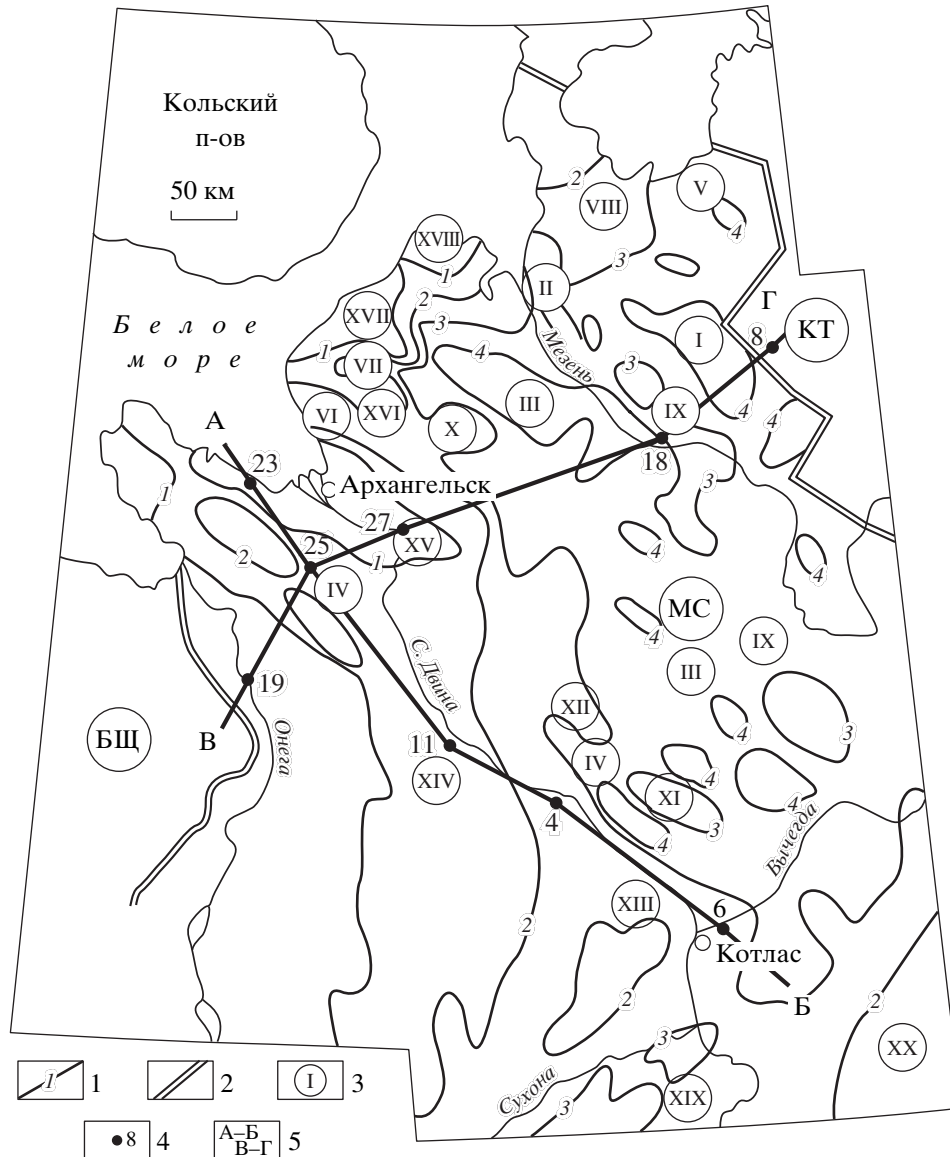


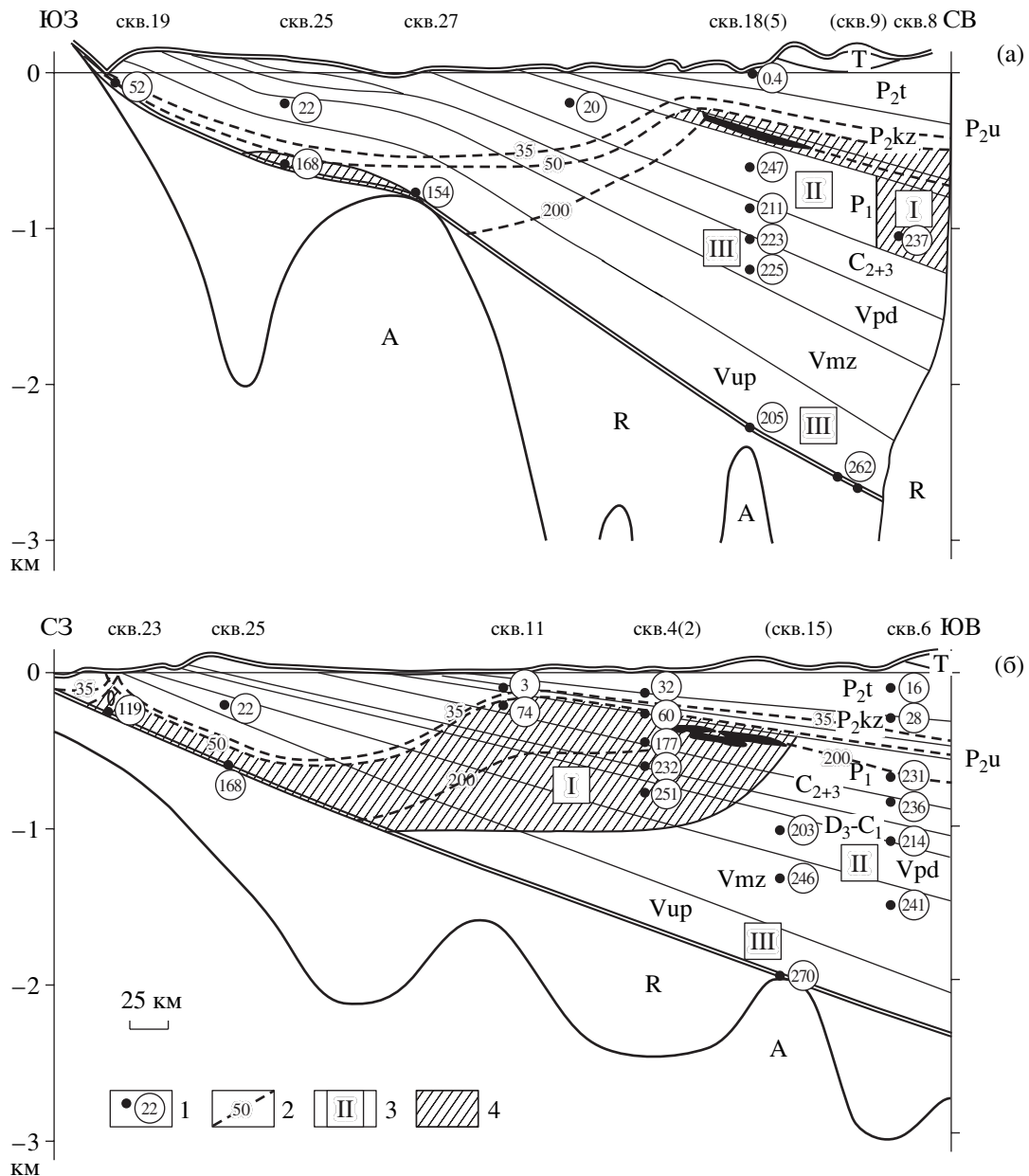
Рис. 1. Схема строения фундамента Мезенской синеклизы, по [Тектоническая карта ..., 1998] с дополнениями.

1 – изолинии глубин залегания фундамента, км; 2 – границы между Балтийским щитом, Мезенской синеклизой и Канинско-Тиманским складчатым поясом; 3 – структуры фундамента: БЩ – Балтийский щит, МС – Мезенская синеклиза, КТ – Канинско-Тиманский складчатый пояс, I–VII – рифты и впадины (I – Сафоновский, II – Усть-Мезенский, III – Лешуконско-Пинежский, IV – Онежско-Тоемский, V – Пешская, VI – Керещкий, VII – Падунский; VIII–XVIII – поднятия и выступы: VIII – Несско-Тылугское, IX – Мезенско-Вашкинские, X – Полтинско-Ежугские, XI – Уфтыюгский, XII – Юльский, XIII – Красноборский, XIV – Важский, XV – Архангельский, XVI – Золотицкий, XVII – Ручьевский, XVIII – Кулойский; XIX – Среднерусский авлакоген; XX – Сысольский свод); 4 – скважина и ее номер; 5 – линии гидрхимических профилей.

чаниках, выходящих вблизи Балтийского щита на глубину до 300 м. В рифейской толще присутствуют вулканические породы, представленные базальтами и долерито-базальтами, а также вулканокластическими брекчиями.

**Вендские отложения** с угловым несогласием залегают на поверхности рифейских образований. Отложения имеют повсеместное распространение в пределах Мезенской синеклизы. Пред-

ставлены они верхним отделом в объеме усть-пинежской (редкинский горизонт), мезенской и падунской (котлинский горизонт) свит. На полную мощность (674–1388 м) вендские отложения вскрыты в восточной части синеклизы на глубине 700–1500 м. Подошва комплекса залегает на глубине 1840–2530 м. В Пешской впадине венд встречен на глубинах 1790–3252 м. Соответственно, подошва его может находиться здесь в интервале 3–4.5 км. В западной части синеклизы вендские от-



**Рис. 2.** Гидрохимические профили: а – вкрест простирания основных палеорифтов; б – вдоль зоны Онежско-Тюменского рифта.

1 – минерализация воды в г/л в точке опробования; 2 – изолиния минерализации воды; 3 – тип рассола: I – с повышенным содержанием натрия, II – с относительно пониженным содержанием кальция, III – с относительно повышенным содержанием кальция; 4 – зона развития рассолов I типа.

ложения залегают на глубине от 0 до 50–300 м. Мощность их сокращается с 1213 до 0 м.

Состав вендских отложений наиболее детально изучен в западной части Мезенской синеклизы. Здесь в составе усть-пинежской свиты (ур) выделены тамицкие, лямицкие, архангельские, верховские, сюзьминские, вайзицкие и зимнегорские слои [Станковский и др., 1981].

Тамицкие слои (tm) представлены разнозернистыми плохотсортированными песчаниками по-

левошпатово-кварцевого состава с примесью слюды. Доля гравелитов в разрезе – 30%. Полевые шпаты – калиевые, частично каолинитизированы. В составе глинистых минералов преобладает каолинит. Цемент железисто-глинистый, реже карбонатный. Песчаники слабосцементированы, в отдельных интервалах (до 40% по мощности) присутствует песок. Мощность слоев 30 м.

Лямицкие слои (lm) сложены преимущественно аргиллитами гидрослюдистого состава с не-

значительной примесью смектитов и каолинита. Трещины шириной до 1 мм иногда выполнены кальцитом. Характерным является наличие тонких (1–3 мм, реже до 5 см) прослоев пепловых туфов Na-смектитового состава. Аргиллиты также содержат примесь туфогенного материала. Мощность слоев 30 м.

Архангельские слои (ar) представлены толщей аргиллитов с редкими прослоями алевролитов и песчаников, суммарная доля которых составляет 1–10% от общей мощности. Наиболее опесчанена верхняя часть разреза мощностью порядка 50 м, где доля прослоев песчаников возрастает до 25%. Аргиллиты на 60–90% состоят из пелитовых частиц гидрослюдистого состава, иногда с примесью смектитов. Среди алевритовых зерен преобладает кварц, полевые шпаты, встречаются слюды и хлорит, кальцит и доломит. Алевролиты мелкозернистые полевошпатово-кварцевые. Количество обломочного материала – 60–80%. Он состоит из кварца, полевых шпатов, слюды и хлорита. Цемент преимущественно карбонатно-глинистый и глинисто-карбонатный. Глинистая составляющая представлена гидрослюдой и смешаннослоистыми гидрослюда-смектитовыми минералами. Содержание тяжелой фракции – доли процента. Широко развиты аутигенный пирит и слюды. Характерно преобладание закисной формы железа над окисной и относительно высокое содержание битумов и  $C_{орг}$ . Мощность архангельских слоев – 150 м.

Верховские слои (vr) представлены аргиллитами с прослойками туфов. Характерно небольшое преобладание окисной формы железа над закисной, резкое снижение содержания битумов и  $C_{орг}$  по сравнению с архангельскими слоями. Пелитовая составляющая верховских отложений по составу преимущественно гидрослюдистая с примесью смектитов. Мощность слоев – 30 м.

Сюзьминские слои (sz) – это пачка аргиллитов и алевролитов. По сравнению с архангельскими слоями более разнообразен состав пелитовых частиц и цемента: наряду с гидрослюдами широко развит карбонатно-хлоритово-глинистый, глинисто-карбонатный, смектитовый материал. Заметны отличия от архангельских слоев в минеральном составе тяжелой фракции: в 2.4 раза уменьшается количество пирита и в 2–3 раза повышается содержание черных рудных минералов, слюды и хлорита. Сокращается в среднем количество битумов и  $C_{орг}$ . Мощность сюзьминских слоев – 50 м.

Вайицкие слои (vz) аналогичны аргиллитам лямичких и верховских слоев. Отмечается увеличение содержания пирита в тяжелой фракции алевритовых разностей до 60%. Мощность слоев – 30 м.

Зимнегорские слои (zm) представлены толщей зеленоцветных алевролитово-аргиллитовых пород

с преобладанием аргиллитов. Для верхней части разреза мощностью порядка 100 м характерно наличие прослоев мелкозернистых песчаников мощностью 0.2–0.7 м, общая доля которых в этом интервале составляет 20–30%. Пелитовая составляющая аргиллитов представлена в основном гидрослюдами, реже смектитами, карбонатно-хлоритово-глинистым материалом, изредка каолинитом. Большая часть алевритовых частиц состоит из кварца, полевых шпатов, слюд. В составе алевролитов карбонатно-глинистый (гидрослюдистый) цемент занимает 25–40%. В песчаниках обломочные частицы составляют 55–60% и представлены кварцем, полевыми шпатами и слюдами. Цемент карбонатный и глинисто-карбонатный. Содержание тяжелой фракции 1.7%. В ее составе довольно высоко содержание пирита: до 25%. Мощность слоев – 160 м.

В составе мезенской свиты (mz) выделяются ергинские и мельские слои. Ергинские слои (er) мощностью 100 м состоят из переслаивающихся аргиллитов (35–40%), алевролитов (35–40%) и песчаников (20–30%). Окраска внизу разреза – серозеленая, выше появляются красновато-коричневые прослои, доля которых повышается до 50%. Для мельских слоев (ml) мощностью 150 м характерно переслаивание тех же литологических разностей; окраска – от пестроцветной до полностью красноцветной в отдельных разрезах. В аргиллитах мезенской свиты среди пелитовых частиц наряду с гидрослюдами существенную роль приобретают каолинит (в мельских слоях), хлориты, гидроксиды железа. Содержание последних увеличивается вверх по разрезу. Смектиты фактически исчезают. В составе алевритовых частиц присутствуют кварц, полевые шпаты, реже слюды. Алевролиты мезенской свиты полевошпатово-кварцевые. Цемент смешанного состава: гидрослюды, хлорит, карбонат, каолинит, гидроксиды железа. Песчаники в различной степени глинистые, мелко- и тонкозернистые. В составе обломочных частиц – 80–90% кварца, 5–20% полевых шпатов, 1–3% слюды. Цемент карбонатно-хлоритово-глинистый, глинисто-карбонатно-гипсовый. Глинистые минералы представлены гидрослюдами, каолинитом; широко развиты гидроксиды железа. По сравнению с зимнегорскими слоями в мезенской свите уменьшается содержание тяжелой фракции. Для минерального состава последней характерно практическое исчезновение аутигенного пирита, доминировавшего в усть-пинежской свите.

Падунская свита (pd) мощностью 160 м состоит в основном из песчаников (60–80%) и алевролитов (20–30%); они разделяются прослоями аргиллитов. Цвет пород преимущественно красновато-коричневый с линзами и пятнами бледно-зеленого цвета. Среди песчаников преобладают мелкозернистые и среднезернистые разности. Содержание пелитовых частиц не поднимается

выше 20%. Обломочный материал представлен кварцем, в незначительных количествах присутствуют полевые шпаты, халцедон, обломки кварцитов, биотит, глинистые агрегаты. Цемент глинисто-железистый при гидрослюдистом составе глинистой составляющей; встречаются карбонатный и гипсовый цементы. В верхней части разреза мощностью порядка 50 м песчаники слабосцементированы, часто до состояния песка. Для алевролитов характерно преобладание крупнозернистой фракции. Среди обломочных зерен до 98% кварца, до 10% полевых шпатов, около 1% слюд. Цемент глинисто-железистый, карбонатно-глинистый, редко гипсовый. Глинистые минералы представлены гидрослюдами, каолинитом, хлоритом. Вверх по разрезу отмечается рост содержания каолинита и снижение примеси хлорита вплоть до полного исчезновения. Для состава аргиллитов характерны гидрослюды, гидроксиды железа, хлорит. Количество частиц кварца и полевых шпатов – 10–15%. Содержание карбонатов в породах падуновской свиты минимально для всего вендского разреза, за исключением тамбицких слоев. Соотношение окисных и закисных форм железа примерно такое же, как и в мельских слюях. Фактически отсутствуют битумы и  $S_{орг}$ .

**Палеозойская группа** представлена отложениями силура, девона, карбона и перми.

Силурийская система выделена только в Пешской впадине.

Девонские отложения установлены в основном на левобережье р. С. Двины и в Притиманье. В районе р. С. Двины девонские отложения мощностью 13–32 м вскрыты на глубинах 146–1065 м. Они состоят из мелко- и среднезернистых песков и рыхлых песчаников с прослоями глин. По минеральному составу глины гидрослюдистые, известковистые. К северу от г. Сыктывкара в солянокупольных структурах на глубинах 231–580 м вскрыта сереговская соленосная формация верхнего девона, прослеженная в штоке на глубину до 1125 м и представленная доломитами, глинами, каменной солью.

Отложения нижнего карбона выделяются только на левобережье р. С. Двины. Преобладают глины и алевролиты с маломощными прослоями карбонатных пород. Средний отдел выделяется в составе московского яруса, сложенного терригенно-карбонатными породами каширского и карбонатными – подольского и мячковского горизонтов. Верхний отдел мощностью до 10–98 м представлен карбонатными породами с прослоями гипсов и ангидритов касимовского и гжельского ярусов.

В нижнем отделе пермской системы, наряду с карбонатными породами, присутствуют прослои гипсов и ангидритов мощностью порядка 80 м. К отложениям этого отдела приурочен также

Двинско-Сухонский соленосный бассейн [История развития..., 1981], расположенный на междуречье одноименных рек (см. рис. 1). Каменная соль залегает в интервале глубин от 250 до 700 м (см. рис. 2). В породах верхнего отдела установлены проявления целестина.

**Отложения мезозоя** развиты локально в восточной части Мезенской синеклизы.

Для чехла **кайнозойских отложений** характерно преобладание ледниковых образований четвертичного возраста. На большей части синеклизы покров их маломощен. На территории приморских низин мощность увеличивается до 20–100 м за счет глин микулинского межледниковья, в палеодолинах достигает 100–250 м. Долины рек, прорезающие четвертичный чехол на глубину до 50 м, заполнены песчано-глинистыми образованиями.

#### ГИДРОГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МЕЗЕНСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

Вертикальная гидродинамическая и гидрохимическая зональность подземных вод определяется в первом приближении фильтрационными свойствами водовмещающих пород, глубиной их залегания (интенсивностью дренирующего влияния поверхностных водотоков и водоемов), открытостью областей питания и разгрузки (наличием региональных водоупоров). Влияние этих факторов должно рассматриваться на протяжении всей геологической истории региона.

Характер изменения фильтрационных свойств пород по разрезу осадочного чехла показан в таблицах 1, 2. Анализ таблиц показывает, что высокие фильтрационные свойства ( $k_f$  0.5–1 м/сут) имеют отложения, залегающие в непосредственной близости от поверхности земли: выше абс. отм. – 100 м. Это – **зона активного водообмена**. Для нее характерны скорости фильтрации (при гидравлических градиентах 0.01–0.001) не ниже  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  м/сут. Время полного водообмена при таких скоростях и активной пористости ( $n_0$ ) 0.25 (при пути фильтрации от области питания до области разгрузки порядка 10 км) составляет не более  $10^2$ – $10^3$  лет. Для отложений венда, залегающих в западной части Мезенской синеклизы в интервале –100...–600 м,  $k_f = 0.03$ – $0.01$  м/сут. Скорости фильтрации здесь уже снижаются до  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  м/сут, а время полного водообмена для пути фильтрации порядка 100 км увеличивается до  $10^4$ – $10^5$  лет, то есть примерно соответствует **зоне сравнительно активного водообмена**. В восточной части Мезенской синеклизы зона сравнительно активного водообмена ограничена по глубине региональным водоупором гипсов и ангидритов нижней перми с  $k_f = 10^{-4}$  м/сут (см. табл. 1,

**Таблица 1.** Фильтрационные свойства послерифейских отложений (интервал 0–1000 м)

Стратиграфическое подразделение	Мощность, м	Коэффициент фильтрации, м/сут	Водопроницаемость, м <sup>2</sup> /сут
N-Q	100	10 <sup>-4</sup>	0.01
	250	1	250
	50	5	250
J	50	2 × 10 <sup>-4</sup>	0.01
T	100	0.5	50
P <sub>2</sub> t	200	0.5	100
P <sub>2</sub> kz	150	7	1050
P <sub>2</sub> u	50	1	50
P <sub>1</sub> ar-kg	70	10 <sup>-4</sup>	0.01
C <sub>2+3</sub> – P <sub>1</sub> a-s	50	50	2500
	150	7	1050
C <sub>2</sub> ur	30	3.5	105
iD <sub>3</sub> –C <sub>2</sub>	40	1	40
	550	0.01	5.5
	550	10 <sup>-4</sup>	0.06
Vpd	200	1	200
Vmz	250	0.03	7.5
Vu-p (zm)	100	0.01	1
Vu-p (lm-sz)	400	10 <sup>-4</sup>	0.04
Vu-p (tm)	25	1	25

рис. 2) и включает в себя отложения верхней перми и мезозоя.

Для зоны активного водообмена характерно присутствие пресных инфильтрационных вод. Солоноватые воды появляются здесь на площадях выхода на поверхность гипсоносных пород пермского возраста.

В зоне сравнительно активного водообмена присутствуют солоноватые и соленые воды с минерализацией ниже 35 г/дм<sup>3</sup> (см. рис. 2). То есть это – зона проникновения инфильтрационных пресных вод и разбавления морских седиментогенных вод и рассолов. В эту же зону входит и область развития рассолов I типа (табл. 3, рис. 2), прослеженная до глубины порядка 1 км. Эти рассолы связаны с растворением инфильтрационными водами каменной соли в пермских отложениях [Малов, 2001б]. Они приурочены к площадям, где региональный водоупор гипсов и ангидритов нижней перми денудирован или перфорирован.

Остальная часть разреза осадочного чехла Мезенской синеклизы занята рассолами II и III типов (см. табл. 3, рис. 2). Рассолы II типа имеют пермский возраст, определенный палеогидрогеологическим, кинетико-геохимическим и гелий-аргоновым методами [Коротков, 1983; Попов, 1994]. Сохранились они благодаря экранирующей роли регионального водоупора гипсов и ангидритов нижней перми. Следовательно область их нахождения характеризуется временем полного водообмена более 250 млн. лет, что возможно при скоростях фильтрации порядка 10<sup>-5</sup>–10<sup>-6</sup> м/сут. Это – **зона затрудненного водообмена**. Отложения венда в ней залегают на глубинах более 1 км и характеризуются существенно пониженными фильтрационными и емкостными свойствами (см. табл. 2).

Рассолы III типа, особенно экранированные сверху региональным водоупором аргиллитов усть-пинежской свиты венда (то есть находящиеся в песчаниках тамбичских слоев венда и уфтыгской свиты верхнего рифея), отличаются от рассолов II типа значительно более высокой степенью метаморфизации [Малов, 2001б], что позволяет предполагать их более древний – позднедевонский – возраст. В таком случае время их полного водообмена составит более 360 млн. лет.

**Таблица 2.** Изменение фильтрационных свойств пород венда и рифея с глубиной

Падунская свита венда				Мезенская свита венда			
Интервал, м	k <sub>ф</sub> , м/сут	km, м <sup>2</sup> /сут	n <sub>0</sub> , %	Интервал, м	k <sub>ф</sub> , м/сут	km, м <sup>2</sup> /сут	n <sub>0</sub> , %
0–200	1	200	25	200–450	0.03	7.5	15
782–879	0.1	25	20	983–1922	0.004	2	10
1443–1805	0.05	20	14	1805–2445	0.001	0.6	9
Усть-пинежская свита венда				Рифей			
Интервал, м	k <sub>ф</sub> , м/сут	km, м <sup>2</sup> /сут	n <sub>0</sub> , %	Интервал, м	k <sub>ф</sub> , м/сут	km, м <sup>2</sup> /сут	n <sub>0</sub> , %
450–950	0.002	1.04	10	1944–2814	0.001	0.3	6.5
1420–2220	3 × 10 <sup>-4</sup>	0.11	7	2252–3341	2 × 10 <sup>-4</sup>	0.14	1.2
2445–2833	6 × 10 <sup>-5</sup>	0.02	4	2646–2682	10 <sup>-5</sup>	0.006	3.6

Примечание. k<sub>ф</sub> – коэффициент фильтрации; km – водопроницаемость; n<sub>0</sub> – активная пористость.

**Таблица 3.** Средний состав основных типов рассолов Мезенской синеклизы в мг-экв. % и их генетические коэффициенты (средние значения)

Тип рассола	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	rNa/rCl	Br/0.001Cl	Ca/Cl
I	87	9	4	96	4	0.9 (0.81–1.07)	1 (0.08–1.53)	0.06 (0.008–0.1)
II	75	17	8	99	1	0.73 (0.65–0.85)	4 (2.97–4.96)	0.11 (0.05–0.14)
III	55	36	9	99	1	0.52 (0.47–0.65)	5.7 (2.9–8.81)	0.19 (0.15–0.28)

Примечание. В скобках – интервал значений.

Это возможно при скоростях фильтрации  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  м/сут, когда преобладает диффузионный массообмен [Зверев, 1982]. Это – **зона весьма затрудненного водообмена**. Во всех остальных гидродинамических зонах преобладает конвективный массоперенос.

Формирование гидрогеологической зональности в Мезенской синеклизе связано с ее геодинамической историей. Последняя характеризуется преобладанием поднятий в кембрии–девоне, когда происходило опреснение подземных вод вендских отложений.

С верхним девонем связано формирование в Южном Приитиманье сереговой соленосной формации. Нужно отметить, что в Подмосковном бассейне, Припятской и Днепровско-Донецкой впадинах с отложениями верхнего девона связаны месторождения калийных солей. Это свидетельствует о более высокой степени испарительного концентрирования солеродных бассейнов в этот период. Эти солеродные бассейны могли являться источниками рассолов III типа в нижерасположенных водоносных горизонтах в восточной части синеклизы. В процессе позднедевонской тектоно-магматической активизации рассолы III типа могли проникнуть ниже регионального водоупора аргиллитов усть-пинежской свиты венда.

С нижней пермью также связан этап соленакопления и формирования гипсово-ангидритовых толщ в Мезенской синеклизе. С опусканием рассолов со дна солеродных бассейнов нижней перми связаны рассолы II типа, первоначально повсеместно заполнившие нижерасположенную осадочную толщу до регионального водоупора аргиллитов усть-пинежской свиты венда. Рассолы III типа сохранились “в чистом виде” только ниже последнего.

Для мезозоя-кайнозоя характерны максимальные различия геодинамических режимов в западной и восточной частях Мезенской синеклизы, что хорошо видно на рис. 2б. На западе поднятия территории и континентальные перерывы привели к денудации карбонатных и гипсовых толщ, выводу вендских отложений на поверхность, интенсивному дренированию и опреснению подземных вод, выносу растворимых соединений из по-

род. В восточной части Мезенской синеклизы наблюдается консервация состава подземных вод и горных пород.

В верхнем плейстоцене для западной части Мезенской синеклизы отмечается бореальная трансгрессия микулинского межледниковья. Она привела к образованию мощной толщи глин и алевритов в пределах побережья Белого моря и переуглубленных палеодолин, в частности – в устьевой области р. Северной Двины. В результате произошло засоление подземных вод падунской свиты венда. После отступления валдайского ледника 10000 лет назад и образования современных речных долин вновь создались гидродинамические условия, способствующие опреснению подземных вод; но вследствие незначительного по времени действия данной гидродинамической обстановки, отмеченное засоление продолжает частично сохраняться.

#### ФОРМИРОВАНИЕ СОСТАВОВ ВОДЫ И ВОДОВМЕЩАЮЩИХ ПОРОД

Состав рассолов и соленых вод Мезенской синеклизы приведен в общем виде в таблицах 3, 4; в работе [Малов, 2001б] приведены конкретные анализы. Химический состав терригенных отложений венда охарактеризован в табл. 5. В ней даны средние значения по свитам и тамецким слоям для восточной части синеклизы, где вендские отложения залегают на максимальных глубинах; средние значения для свит и тамецких слоев из средних по слоям – для района Золотицкого выступа (см. рис. 1). в западной ее части, где отложения венда залегают в интервале 40–930 м. Это – район расположения месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. Также приведены средние значения для свит и тамецких слоев из средних по слоям для полосы вдоль юго-восточного берега Белого моря, где вендские отложения выклиниваются и опробованы не глубже 300 м.

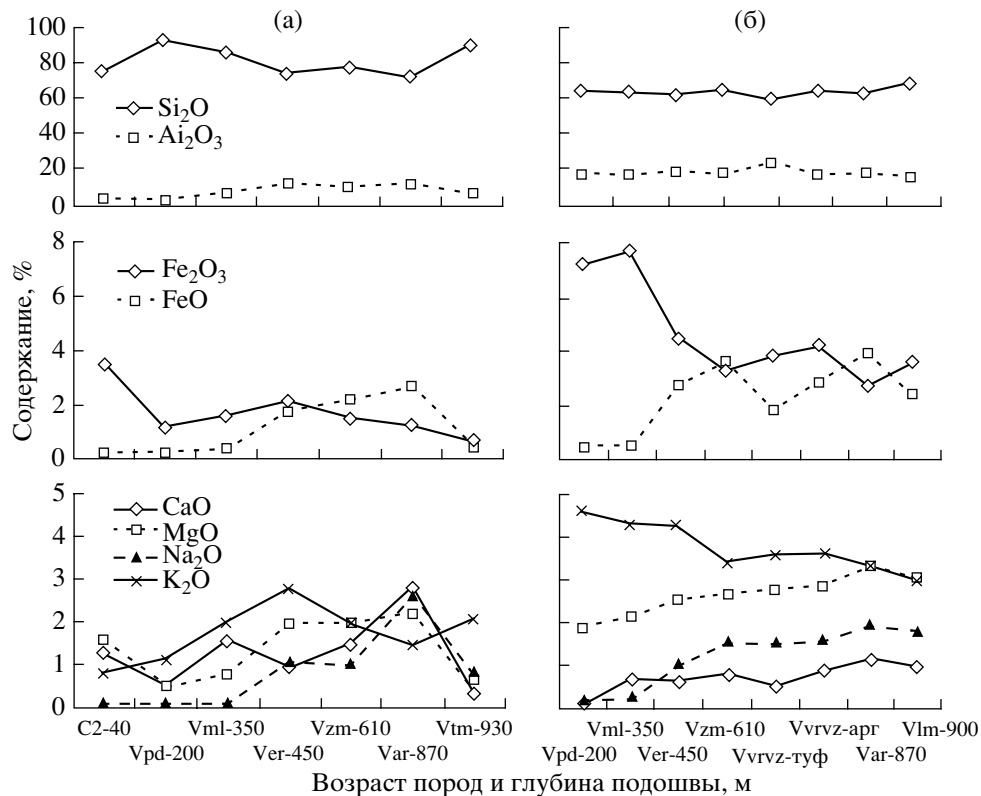
На рис. 3, 4 показан характер изменения среднего состава аргиллитов и песчаников по разрезу венда в восточной и западной частях Мезенской синеклизы. Основные различия почти по всем показателям проявляются в падунской свите: на западе растет содержание кремнезема и заметно

**Таблица 4.** Изменение состава подземных вод в верхней части толщи дочетвертичных отложений Северо-Двинской впадины в процессе движения от областей питания к областям разгрузки

№№ скважин	Возраст отложений	Инт. опр.	M, г/л	Единица измерения	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>
104	mIII mk	45	31.3	мг/л	17580	1650	900	9470	200	1500
				мг-экв. л	496	34	15	412	10	123
				мг-экв. %	91	6	3	75	2	23
96	C <sub>1</sub> -Vpd	96-158	2.92	мг/л	535	1260	240	300	495	90
				мг-экв. л	15	26	4	13	25	7
				мг-экв. %	33	58	9	29	55	16
Среднее			17.1	мг/л	9060	1460	570	4880	350	800
				мг-экв. л	256	30	9	213	17	65
				мг-экв. %	87	10	3	72	6	22
18	Vpd	55-70	17.4	мг/л	9530	1500	120	4350	1280	600
				мг-экв. л	269	31	2	189	64	49
				мг-экв. %	89	10	1	63	21	16
Разница между скв. 18 и средним				мг/л	+470	+40	-450	-530	+930	-200
				мг-экв. л	+13	+1	-7	-24	+47	-16
				мг-экв. %	+2	0	-2	-9	+15	-6

снижается содержание остальных компонентов в песчаниках. Однако поведение железа и особенно натрия существенно различается и в отложениях мезенской свиты. Можно увидеть специфику и в распределении магния по всему разрезу венда.

Для наиболее показательных элементов – натрия и кальция – построены графики их распределения в твердой фазе и растворе по разрезу осадочного чехла в западной и восточной частях Мезенской синеклизы. На этих графиках содержания



**Рис. 3.** Изменение среднего (по свитам и слоям) состава песчаников (а) и аргиллитов (б) в районе месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова в западной части Беломорско-Кулойского плато.



**Таблица 5.** Средний химический состав (по свитам и слоям) аргиллитов, песчаников и алевролитов в районе месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (БКП), Зимнего берега Белого моря и Онежского п-ова (ЗБ–ОП); восточной части Мезенской синеклизы (МС)

Возраст	Количество определений			Глубина подошвы слоя, м			SiO <sub>2</sub>				
	БКП	ЗБ–ОП	МС	БКП	ЗБ–ОП	МС	БКП	ЗБ–ОП	МС		
аргиллиты											
Vpd	1	13	15	200	100	1158–1685	63.8	60.3	62.64		
Vmz	21	60	12	450	250	1657–2156	61.15	61.54	63.4		
Vup	88	116	40	900	300	1967–4003	62.85	61.06	60.64		
песчаники											
Vpd	28	125	2	200	100	1158–1685	91.5	89.78	72.3		
Vmz	37	57	11	450	220	1657–2156	78.6	79.38	74.84		
Vup	13	6	5	870	270	1700–2061	72.84	79.54	75.22		
Vtm	5	2	7	930	300	2181–2554	88.12	87.9	88.92		
алевролиты											
Vpd	18	44	30	200	100	1158–1685	72	69.79	71.36		
Vmz	81	116	5	450	220	1657–2156	66.97	70.43	69.1		
Vup	25	55	9	870	270	1700–2061	72.77	68.23	68.12		
Vtm	1	1		930	300	2181–2554	88.12				
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			CaO			MgO			Na <sub>2</sub> O		
БКП	ЗБ–ОП	МС	БКП	ЗБ–ОП	МС	БКП	ЗБ–ОП	МС	БКП	ЗБ–ОП	МС
аргиллиты											
16.7	13.74	16.37	0.1	1.25	0.48	1.91	2.26	2.54	0.21	0.15	1.72
16.76	16.2	15.12	0.65	1.14	1.13	2.35	2.51	2.31	0.64	0.49	2.11
15.19	15.73	16.37	0.91	1.27	1.52	2.94	3.14	2.74	1.7	1.5	2.06
песчаники											
3.6	4.43	11.14	0.5	0.59	2.6	0.48	0.39	2.14	0.1	0.07	2.28
9	9.09	10.46	1.23	1.1	1.31	1.35	1.4	1.67	0.57	0.43	2.7
10.14	8.74	10.24	2.13	1.3	1.57	2.03	1.4	1.3	1.75	0.9	2.54
5.97	6.5	4.38	0.26	0.42	0.35	0.59	0.52	0.47	0.78		1
алевролиты											
12.8	13.62	12.87	0.48	0.81	0.43	1.24	1.34	1.85	0.14	0.11	1.46
14.34	12.51	13.21	0.76	1.31	1.08	1.99	1.87	1.94	0.6	0.62	2.43
14.81	13.59	13.27	1.46	1.2	1.24	2.68	2.16	2.64	1.8	1.63	2.61
11.7			0.3			0.95			1.12		
K <sub>2</sub> O			Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>			FeO					
БКП	ЗБ–ОП	МС	БКП	ЗБ–ОП	МС	БКП	ЗБ–ОП	МС	БКП	ЗБ–ОП	МС
аргиллиты											
4.58	3.43	3.57	7.2	7.04	5.7	0.5	0.47	1.56			
4.27	4.08	3.08	6.08	6.93	3.75	1.63	1	3.09			
3.29	3.66	3.61	3.39	4.57	3.15	3.16	2.96	3.88			
песчаники											
1.11	1.01	1.72	1.22	1.78	1.46	0.22	0.44	1.17			
2.39	2.45	1.73	1.8	2.23	1.75	1.04	0.59	1.74			
1.69	1.8	1.65	1.3	1.22	1.57	2.35	1.26	1.7			
2.03		1.62	0.54	1.1	0.54	0.33	0.42	1.05			
алевролиты											
2.94	3.5	2.93	5.3	5.63	3.79	0.3	0.36	0.85			
3.92	3.15	2.67	4.94	3.85	3.61	1.05	0.75	1.73			
3.21	2.96	2.33	3.48	2.67	2.75	3.41	2.3	2.59			
3.24			2.55			0.15					

Примечание. БКП – пробы отобраны при геологоразведочных работах ПГО Архангельскгеология на алмазы по структурным скважинам 570, 770, 771, 772, 774, 775, 1000, 1000/1, 200, расположенным в западной части Беломорско-Кулойского плато в районе месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова и к югу от него. ЗБ – пробы отобраны из отложений Vz1–Vzm до глубины порядка 300 м при геологосъемочных работах в районе Зимнего Берега Белого моря [Станковский и др., 1981]. ОП – пробы отобраны из отложений Var–Vtm до глубины порядка 190 м при геологосъемочных работах в районе Летнего Берега Онежского полуострова [Копылов]. МС – пробы отобраны из структурных скважин в восточной части Мезенской синеклизы: № 1 Сторожевская, Ценогорская (Vpd–Vup); Оменская, № 1 Серегово (Vmz–Vup); № 1 Нижняя Пеша (Vup) (27 анализов по скважинам Сторожевская и Серегово [Бабушкин], остальные из отчетов ГПП Ухтанефтегазгеология [Иванов, Пименов] и ПГО Архангельскгеология).

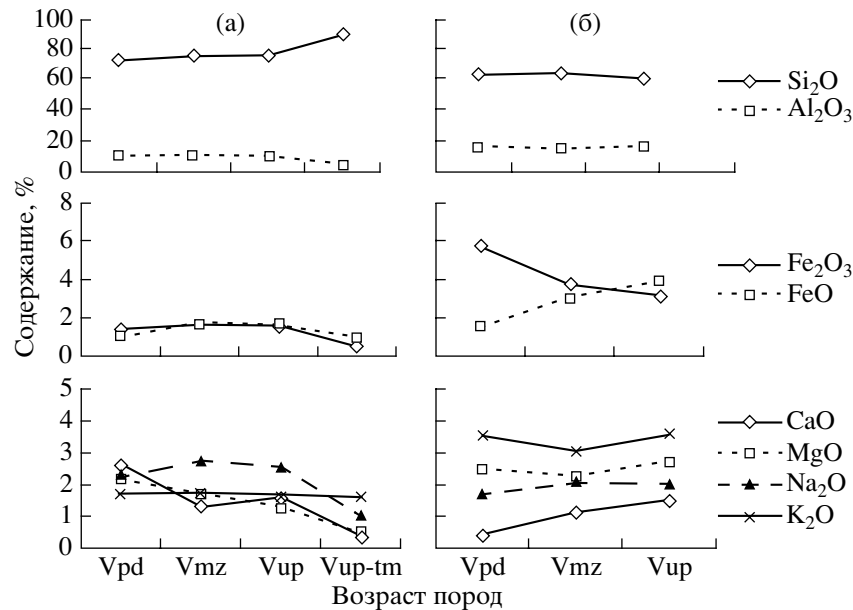


Рис. 4. Изменение среднего (по свитам и слоям) состава песчаников (а) и аргиллитов (б) венда в восточной части Мезенской синеклизы.

элементов в твердой фазе рассчитывались по данным табл. 5. Для каждой свиты венда слева направо на графиках приводятся по три значения: для аргиллитов, алевролитов и песчаников. На наш взгляд, на этих графиках наблюдается четкая корреляция между содержаниями натрия в твердой фазе и растворе. “Незакономерное” снижение содержания натрия в падунской свите в Мезенской синеклизе связано с тем, что мы располагаем, к сожалению, по этой свите в основном анализами по скважине Ценогорская-1 (18 – см. рис. 2а). Для этой скважины характерна и аномально низкая минерализация рассолов в падунской свите венда: 139 г/дм<sup>3</sup> при содержании натрия 34,8 г/дм<sup>3</sup>, кальция – 15,3 г/дм<sup>3</sup> [Малов, 2001б]. Эти содержания и показаны на графиках. Однако корреляция и в этом случае продолжает сохраняться. Для рифея на графиках также имеются данные по составу воды лишь для скважины Ценогорская-1 (минерализация 205 г/дм<sup>3</sup> при “нормальной” для восточной части синеклизы 270 г/дм<sup>3</sup>), а по породе – для западной части синеклизы, вследствие чего содержания натрия для рифея также занижены. Эти пояснения относятся и к графикам распределения кальция (рис. 5б). Значения содержания кальция для песчаников падунской свиты (средние из двух результатов) и рифея явно непредставительны. Корреляция между содержанием кальция в воде и породах выдерживается для восточной части синеклизы. Для западной части – по сравнению с натрием – она “запаздывает”: при снижении содержания кальция в воде на 15–20 г/дм<sup>3</sup> по всему разрезу, снижение содержания кальция в породах на 7–15 г/дм<sup>3</sup> отмечено только в отложениях падунской свиты.

Анализ таблиц и графиков позволяет сделать следующие предположения.

Накопление вендских отложений происходило в бассейне с нормальной морской соленостью. По данным, приведенным в работе [Котельников, Солодкова, 1993], наиболее характерным процессом при этом является синтез хлорита из поровых растворов. При погружении пород на глубину происходит гидрослюдизация смектитов и каолинита и существенное снижение фильтрационных и емкостных свойств пород (см. табл. 2) как за счет повышения давления, так и за счет новообразованных минералов.

Состав пород, сформированных в результате гипергенных процессов в период континентального перерыва в кембрии-девоне, по всей площади синеклизы, видимо, был близок к показанному на рис. 3.

В позднем девоне предполагается заполнение осадочной толщи венда в восточной части Мезенской синеклизы рассолами высокой степени испарительного концентрирования с минерализацией выше 320 г/дм<sup>3</sup>, из которых происходила садка галита. Исходя из состава рассолов [Малов, 2001б], можно полагать, что содержания брома в рапе составляли порядка 2 г/дм<sup>3</sup>, натрия – 60 г/дм<sup>3</sup>, магния – 50 г/дм<sup>3</sup>, калия – 10 г/дм<sup>3</sup>, кальция – 0,4 г/дм<sup>3</sup>. В настоящее время, в пересчете на минерализацию 320 г/дм<sup>3</sup>, они содержат: брома – 2 г/дм<sup>3</sup>, натрия – 60 г/дм<sup>3</sup>, магния – 3 г/дм<sup>3</sup>, калия – 0,7 г/дм<sup>3</sup>, кальция – 60 г/дм<sup>3</sup>. То есть в рассолах произошло снижение содержания магния на 47 г/дм<sup>3</sup>, калия на 9,3 г/дм<sup>3</sup>; концентрация кальция повысилась на 59,6 г/дм<sup>3</sup>. Содержание натрия практически не из-

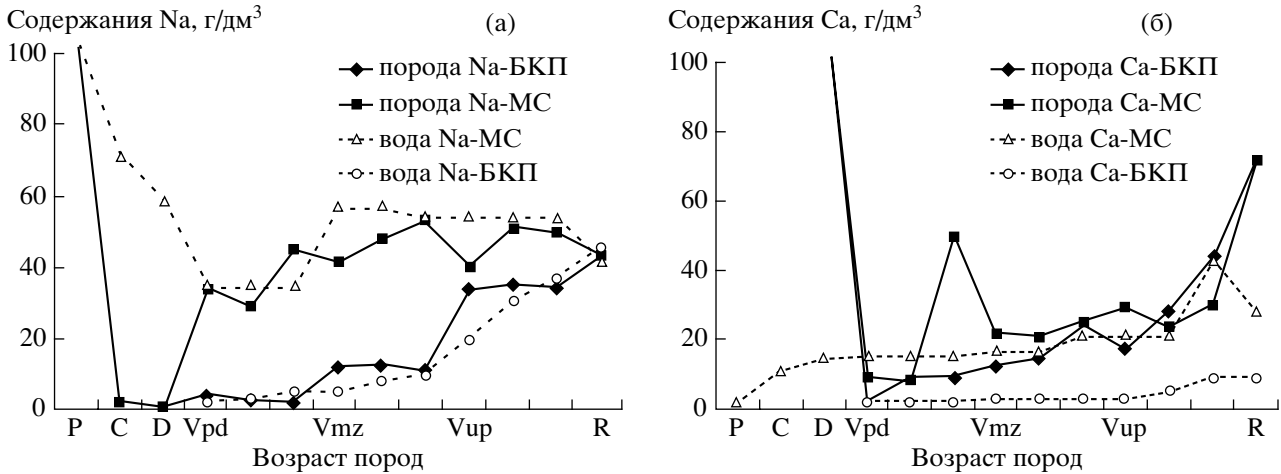


Рис. 5. Зависимость содержаний натрия (а) и кальция (б) в твердой фазе и растворе в зависимости от возраста пород: в районе месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова в западной части Беломорско-Кулойского плато (БКП) и в восточной части Мезенской синеклизы (МС).

менилось. Магний и калий были извлечены из рассолов в процессах хлоритизации и гидрослюдизации. Основную роль в выносе кальция из пород, видимо, играли процессы гидролиза кальциевых алюмосиликатов, неравновесных со всеми типами подземных вод, в том числе и с рассолами. **В зоне весьма затрудненного водообмена**, где преобладает диффузионный массоперенос, эти процессы идут по механизму диффузионной кинетики до выравнивания концентраций кальция в породах и растворе (см. рис. 5б). Для оценки параметров процесса проведены оценочные расчеты по формуле [Смирнов, 1971]:

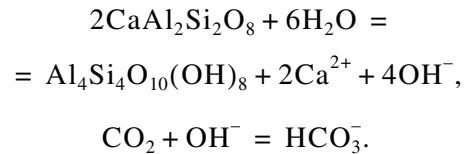
$$q = 2n_0C_c\sqrt{\frac{Dt}{\pi}},$$

где  $q$  – количество солей, продиффундировавших через единичное сечение за время  $t$ ,  $C_c$  – средний перепад концентраций,  $D$  – коэффициент диффузии,  $n_0$  – активная пористость.

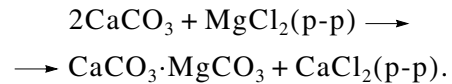
Расчеты велись для времени 0.36 млрд. лет. Принималось, что диффузия в объеме 1 дм<sup>3</sup> осуществлялась в основном по одной эффективной трещине площадью 0.1 дм<sup>2</sup>, что соответствует значению модуля трещиноватости в терригенных породах венда: 1 трещина на 2 пог. м керна. Получена величина  $D = 4 \times 10^{-19}$  м<sup>2</sup>/сут. Если же принять, что поступление кальция в рассол происходит путем диффузии из минеральных частиц размером 0.1 мм во всем объеме порового пространства, то значение  $D = 2 \times 10^{-30}$  м<sup>2</sup>/сут.

В результате в терригенных отложениях венда произошло частичное (до 10%) преобразование зерен полевых шпатов в глинистые минералы.

Как отмечается в работе [Шварцев, 1991], при гидролизе повышается щелочность раствора, нейтрализуемая углекислым газом:



При этом образуется гидрокарбонат-ион, который связывает часть кальция, формируя карбонатный цемент. То есть принципиально возможны и процессы доломитизации:

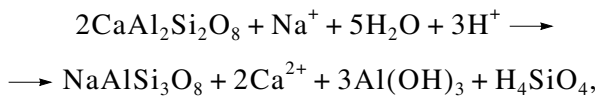


На основной части Мезенской синеклизы в позднем девоне существовал континентальный режим с максимумом поднятий в районах кимберлитового магматизма [Малов, 2001а, 2002].

В среднем карбоне бассейны с нормальной соленостью морской воды, видимо, не оказали существенного влияния на состав подземных вод и горных пород.

Пермские солеродные бассейны явились источником рассолов с относительно пониженным содержанием кальция и хлор-бромным коэффициентом, примерно соответствующим таковому в морской воде (II тип – см. табл. 3). Первоначально они заполняли весь осадочный чехол – до регионального водоупора аргиллитов усть-пинежской свиты венда. Минерализация рапы составляла до 270 г/л. Основные изменения состава рассолов в процессе взаимодействия с горными породами заключаются в снижении содержаний натрия с 80 до 60 г/дм<sup>3</sup>, магния с 12 до 8 г/дм<sup>3</sup>, калия с 3 до 0.5 г/дм<sup>3</sup>; содержания кальция выросли на 8–10 г/дм<sup>3</sup>. В условиях конвективного водообмена **в зоне затрудненного водообмена** эти изменения можно связывать в основном с катионным обме-

ном. Видимо, имели место и процессы альбитизации [Копелиович, 1965]:



доломитизации и гидрослюдизации.

Примерный состав пород, сформированных в результате взаимодействия с пермскими рассолами в пределах всей Мезенской синеклизы, демонстрирует рис. 4.

В мезозое-кайнозое в восточной части синеклизы он практически не изменился; в западной же части (в связи с ее стабильным поднятием) толща венда вошла в зоны сравнительно активного и активного водообмена и подверглась гипергенному выветриванию до глубины порядка 350 м. Результаты этого процесса отражены на рис. 3.

**В зоне сравнительно активного водообмена** до глубины 200–600 м формирование соленых вод происходит по схеме, характерной для водосборной площади устьевого части р. Северной Двины. Подземные воды в областях питания имеют гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав и являются пресными. По мере движения по загипсованным терригенным отложениям на левобережье р. С. Двины, они обогащаются кальцием и сульфатами за счет растворения гипса и в меньшей мере хлором и натрием, извлекаемыми из поровых вод, оставшихся от морских трансгрессий плейстоцена-девона, а также непосредственно из гидролизуемых горных пород, и приобретают хлоридно-сульфатный натриево-кальциевый состав. При этом минерализация подземных вод повышается до 2–3 г/л на сравнительно небольшом удалении от областей питания. Затем эти воды смешиваются с хлоридно-натриевыми, расположенными под областями распространения толщ глини микунинского межледниковья повышенной мощности. При этом происходит уменьшение минерализации хлоридно-натриевых вод, а также изменяется их состав, что отражено в табл. 4.

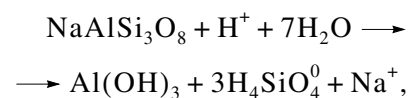
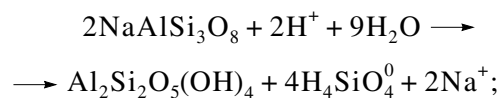
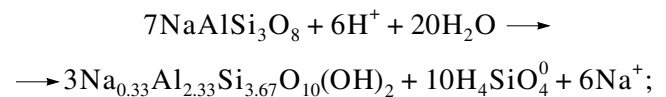
За счет процессов смешения вод растет процентное содержание кальция и сульфатов при соответствующем снижении доли натрия и хлора (см. строка 3 табл. 4), причем если весовое содержание перешедшего в раствор в областях питания кальция возрастает на 7 мг-экв. л, то содержание сульфатов морского происхождения снижается на 4 мг-экв. л. Абсолютные содержания остальных макрокомпонентов подземных вод, естественно, также снижаются.

Наблюдаемый в реальности состав “гибридных” подземных вод (см. строка 4 табл. 4) свидетельствует о протекании на фоне смешения также и процессов дальнейшего извлечения натрия и хлора (по 13 мг-экв. л), растворения гипса с переходом в раствор по 1 мг-экв. л кальция и сульфа-

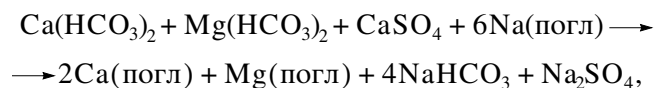
тов и осаждения карбонатов магния с выводом из раствора по 7 мг-экв. л гидрокарбонат-иона и магния. Наиболее интенсивными, однако, являются процессы катионного обмена кальция горных пород (46 мг-экв. л) на натрий (37 мг-экв. л) и магний (9 мг-экв. л), растворенные в подземных водах (см. строка 5 табл. 4).

**В зоне активного водообмена** пресные воды алевролитов и песчаников падунской свиты венда в западной части Мезенской синеклизы при минерализации до 0.2–0.3 г/л имеют гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав. При минерализации 0.3–0.7 г/л – гидрокарбонатный натриевый и хлоридно-гидрокарбонатный натриевый; в ходе появляется до 7.2 мг/л железа. При минерализации 0.9 г/л на первое место среди анионов уже выходит хлор.

То есть наиболее характерным процессом является гидролиз натриевых алюмосиликатов [Зверев, 1982]:

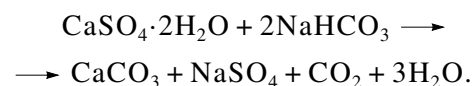


а также катионный обмен:



что приводит к относительно повышенному содержанию натрия в грунтовых водах, соответствующему содержанию его в породах (см. рис. 5а – БКП).

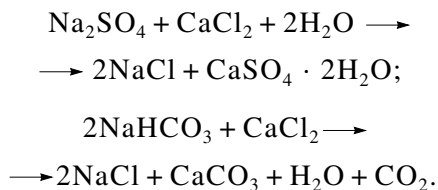
Вместе с тем наличие включений гипса в породах снижает содержание карбонатов в растворе:



То есть гидрокарбонатно-натриевые воды могут формироваться в песчано-глинистых отложениях только при снижении влияния карбонатных и сульфатных пород на состав воды.

Для карбонатов и сульфатов кальция в нижних частях зоны развития опресненных вод характерны и процессы их осаждения с формированием карбонатного и гипсового цементов (см. рис. 2а – Vml 350). Они связаны с денудацией карбонатно-сульфатных толщ на поверхности, фильтрацией карбонатных и сульфатных вод вглубь массива

осадочных пород и смешением их с солеными водами:



С перечисленными причинами связано “отставание” темпов снижения содержаний кальция в породах по сравнению с раствором (см. рис. 5б – БКП).

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, в зоне весьма затрудненного водообмена Мезенской синеклизы произошло снижение в рассолах магния на 47 г/дм<sup>3</sup>, калия на 9.3 г/дм<sup>3</sup>; повысилось содержание кальция на 59.6 г/дм<sup>3</sup>. Основную роль в выносе кальция из пород, видимо, играли процессы гидролиза кальциевых алюмосиликатов. В зоне затрудненного водообмена основные изменения состава рассолов заключаются в снижении содержаний натрия с 80 до 60 г/дм<sup>3</sup>, магния с 12 до 8 г/дм<sup>3</sup>, калия с 3 до 0.5 г/дм<sup>3</sup>; содержания кальция выросли на 8–10 г/дм<sup>3</sup>. В условиях конвективного водообмена эти изменения можно связывать в основном с катионным обменом. В зоне сравнительно активного водообмена наиболее интенсивными являются процессы катионного обмена кальция горных пород (46 мг-экв. л) на натрий (37 мг/экв. л) и магний (9 мг-экв. л), растворенные в подземных водах, осаждение карбонатов и сульфатов кальция; в зоне активного водообмена – гидролиз натриевых алюмосиликатов, катионный обмен кальция, калия и магния раствора на натрий пород.

Автор признателен Т.А. Бабушкину (Институт геологии КОМИ НЦ УрО РАН) за любезно

предоставленные анализы горных пород по восточной части Мезенской синеклизы.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Зверев В.П.* Роль подземных вод в миграции химических элементов. М.: Недра, 1982. 184 с.
- История развития и минерагения чехла Русской платформы / Под ред. Старицкого Ю.О. Л.: Недра, 1981. 224 с.
- Копелиович А.В.* Эпигенез древних толщ юго-запада Русской платформы. М.: Изд-во АН СССР, 1965. 312 с.
- Котельников Д.Д., Солодкова Н.А.* Роль ди- и триоктаэдрических глинистых минералов в осадочных образованиях // Изв. вузов. Геология и разведка. 1993. № 2. С. 54–63.
- Коротков А.И.* Гидрогеохимический анализ при региональных геологических и гидрогеологических исследованиях. Л.: Недра, 1983. 232 с.
- Малов А.И.* Магний в рассолах Северо-Двинского артезианского бассейна, как индикатор кимберлитового магматизма // Докл. РАН. 2001а. Т. 377. № 1. С. 82–85.
- Малов А.И.* Формирование рассолов в Мезенской синеклизе // Водные ресурсы. 2001б. Т. 28. № 6. С. 677–683.
- Малов А.И.* Взаимодействие вода–порода в ходе геологической эволюции месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова // Геоэкология. 2002. № 1. С. 18–27.
- Попов В.Г.* Геохимические особенности и возраст рассолов Волго-Уральского бассейна // Отечеств. геология. 1994. № 2. С. 62–66.
- Смирнов С.И.* Происхождение солёности подземных вод седиментационных бассейнов. М.: Недра, 1971. 172 с.
- Станковский А.Ф., Веричев Е.М., Гриб В.П. и др.* Венд Юго-Восточного Беломорья // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1981. № 2. С. 78–87.
- Тектоническая карта Баренцева моря и северной части Европейской России / Под ред. Богданова Н.А., Хаина В.Е. М.: ИЛ РАН, 1998.
- Шварцев С.Л.* Взаимодействие воды с алюмосиликатными горными породами. Обзор // Геология и геофизика. 1991. № 12. С. 16–50.