

УДК 550.84:551.494

## ОБ ИСХОДНОМ СОСТАВЕ ОТЛОЖЕНИЙ ВЕНДА МЕЗЕНСКОЙ СИНЕКЛИЗЫ

© 2003 г. А. И. Малов

Представлено академиком В.И. Осиповым 07.03.2003 г.

Поступило 27.05.2003 г.

Состав песчано-глинистых отложений на начальных этапах их 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 последнего процесса исследовались в работах [1, 7 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 песчано-глинистых отложений венда Мезенской синеклизы на основе палеогеологических реконструкций.

Мезенская синеклиза (МС) представляет собой депрессию на севере Русской плиты, ограниченную на западе Балтийским щитом, на востоке Канинско-Тиманским складчатым поясом. Фундамент на большей части синеклизы имеет архейско-раннепротерозойский возраст; он разбит на блоки, выделяющиеся в виде рифейских грабен и горстов. В составе осадочного чехла присутствуют образования среднего и верхнего рифея, верхнего венда, палеозоя, мезозоя и кайнозоя (рис. 1).

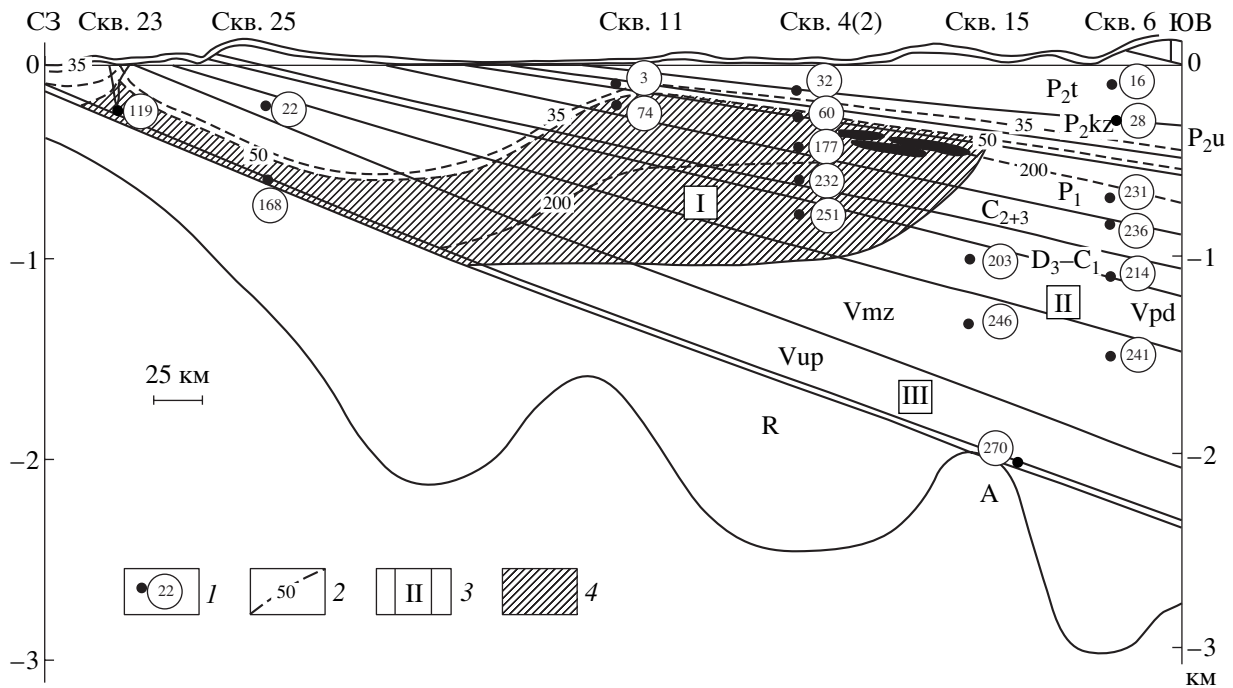
Вендские отложения представлены верхним отделом в объеме усть-пинезской ( $V_{up}$ ), мезенской ( $V_{mz}$ ) и падунской ( $V_{pd}$ ) свит. Для западной части МС характерно преобладание аргиллитов в усть-пинезской свите и повышение роли песчаников вверх по разрезу [5]. На этом фоне ано-

мальными выглядят тамбикские слои ( $V_{tm}$ ) – базальная пачка венда, представленная песчаниками и гравелитами. Полевые шпаты частично каолинитизированы. В составе глинистых минералов каолинит преобладает. Выше по разрезу среди глинистых минералов усть-пинезской свиты преобладают гидрослюды, также присутствует Na-монтмориллонит, слагающий тонкие прослойки пепловых туфов, хлорит. Характерно широкое развитие аутигенного пирита, преобладание закисной формы железа над окисной. Каолинит появляется в верхней части мезенской свиты; для падунской свиты характерен дальнейший рост его содержания вверх по разрезу. Монтмориллонит и хлорит фактически исчезают, также – пирит, органика; резко возрастает содержание гидроксидов железа. В восточной части МС состав отложений венда по разрезу более стабилен.

Высокие фильтрационные свойства ( $k_f \geq 0.5$ – $1$  м/сут) имеют отложения, залегающие выше абс. отметки –100 м. Это – зона активного водообмена. Для нее характерны скорости фильтрации не ниже  $10^{-1}$ – $10^{-2}$  м/сут и время полного водообмена не более  $10^2$ – $10^3$  лет. Для отложений венда, залегающих в западной части МС в интервале –100...–600 м (рис. 1),  $k_f = 0.03$ – $0.01$  м/сут. Скорости фильтрации здесь уже снижаются до  $10^{-3}$ – $10^{-4}$  м/сут, а время полного водообмена увеличивается до  $10^4$ – $10^5$  лет, т.е. примерно соответствует зоне сравнительно активного водообмена. В восточной части МС зона сравнительно активного водообмена ограничена по глубине региональным водупором гипсов и ангидритов нижней перми (рис. 1).

Для зоны активного водообмена характерно присутствие пресных инфильтрационных вод. В зоне сравнительно активного водообмена присутствуют солоноватые и соленые воды с минерализацией ниже  $35$  г/дм<sup>3</sup> (рис. 1). 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 (рис. 1). Эти рассолы связаны с растворением инфильтрационными водами камен-

Институт экологических проблем Севера  
Уральского отделения  
Российской Академии наук, Архангельск



**Рис. 1.** Гидрохимический профиль через Мезенскую синеклизу. 1 – минерализация воды в г/л в точке опробования; 2 – изолиния минерализации воды; 3 – тип рассола по [4]: I – с повышенным содержанием натрия, II – с относительно пониженным содержанием кальция, III – с относительно повышенным содержанием кальция; 4 – зона развития рассолов I типа.

ной соли в пермских отложениях [4]. Они приурочены к площадям, где региональный водоупор гипсов и ангидритов нижней перми денудирован.

Остальная часть разреза осадочного чехла МС занята рассолами II и III типов (рис. 1). Рассолы II типа имеют пермский возраст [4, 6]. Сохранились они благодаря экранирующей роли регионального водоупора гипсов и ангидритов нижней перми. Область их нахождения характеризуется временем полного водообмена более 250 млн. лет, что возможно при скоростях фильтрации порядка  $10^{-5}$ – $10^{-6}$  м/сут. Это – зона затрудненного водообмена. Отложения венда в ней залегают на глубинах более 1 км и характеризуются существенно пониженными фильтрационными и емкостными свойствами.

Рассолы III типа, особенно экранированные сверху региональным водоупором аргиллитов усть-пинезжской свиты венда, отличаются от рассолов II типа значительно более высокой степенью метаморфизации [4], что позволяет предполагать их более древний – позднедевонский – возраст. Время их полного водообмена более 360 млн. лет. Это возможно при скоростях фильтрации  $10^{-7}$ – $10^{-8}$  м/сут, когда преобладает диффузионный массообмен [1]. Это зона весьма затрудненного водообмена. Во всех остальных гидродинамиче-

ских зонах преобладает конвективный массообмен.

Состав рассолов МС приведен в работах [3, 4]. Химический состав отложений венда охарактеризован в табл. 1. В ней даны средние значения для восточной части синеклизы (МС), где вендские отложения залегают на максимальных глубинах, и западной, где они находятся в интервале 40–930 м (БКП). Это – район расположения месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова. Также приведены средние значения для полосы вдоль юго-восточного берега Белого моря, где вендские отложения выклиниваются и опробованы не глубже 300 м (ЗБ-ОП).

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 МС. Содержания элементов в твердой фазе рассчитывались по данным табл. 1. Для каждой свиты венда слева направо на графиках приводятся по три значения: для аргиллитов, алевролитов и песчаников. Наблюдается четкая корреляция между содержаниями натрия в твердой фазе и растворе. Корреляция содержаний кальция в воде и породах выдерживается для восточной части синеклизы. Для западной части – по сравнению с натрием – она “запаздывает”, хотя и намечена в отложениях падунской свиты.

**Таблица 1.** Средний химический состав (по свитам и слоям) аргиллитов, песчаников и алевролитов в западной части Мезенской синеклизы: в районе месторождения алмазов им. М.В. Ломоносова (БКП) и на побережье Белого моря (ЗБ-ОП), в восточной части Мезенской синеклизы

| № п. п.           | Возраст | Число определений |       |                   | Глубина подошвы слоя, м |       |                  | SiO <sub>2</sub> |       |                                | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> |       |       | CaO   |       |      |
|-------------------|---------|-------------------|-------|-------------------|-------------------------|-------|------------------|------------------|-------|--------------------------------|--------------------------------|-------|-------|-------|-------|------|
|                   |         | БКП               | ЗБ-ОП | МС                | БКП                     | ЗБ-ОП | МС               | БКП              | ЗБ-ОП | МС                             | БКП                            | ЗБ-ОП | МС    | БКП   | ЗБ-ОП | МС   |
| <b>Аргиллиты</b>  |         |                   |       |                   |                         |       |                  |                  |       |                                |                                |       |       |       |       |      |
| 1                 | Vpd     | 1                 | 13    | 15                | 200                     | 100   | 1158–1685        | 63.8             | 60.3  | 62.64                          | 16.7                           | 13.74 | 16.37 | 0.1   | 1.25  | 0.48 |
| 2                 | Vmz     | 21                | 60    | 12                | 450                     | 250   | 1657–2156        | 61.15            | 61.54 | 63.4                           | 16.76                          | 16.2  | 15.12 | 0.65  | 1.14  | 1.13 |
| 3                 | Vup     | 88                | 116   | 40                | 900                     | 300   | 1967–4003        | 62.85            | 61.06 | 60.64                          | 15.19                          | 15.73 | 16.37 | 0.91  | 1.27  | 1.52 |
| <b>Песчаники</b>  |         |                   |       |                   |                         |       |                  |                  |       |                                |                                |       |       |       |       |      |
| 4                 | Vpd     | 28                | 125   | 2                 | 200                     | 100   | 1158–1685        | 91.5             | 89.78 | 72.3                           | 3.6                            | 4.43  | 11.14 | 0.5   | 0.59  | 2.6  |
| 5                 | Vmz     | 37                | 57    | 11                | 450                     | 220   | 1657–2156        | 78.6             | 79.38 | 74.84                          | 9                              | 9.09  | 10.46 | 1.23  | 1.1   | 1.31 |
| 6                 | Vup     | 13                | 6     | 5                 | 870                     | 270   | 1700–2061        | 72.84            | 79.54 | 75.22                          | 10.14                          | 8.74  | 10.24 | 2.13  | 1.3   | 1.57 |
| 7                 | Vup–tm  | 5                 | 2     | 7                 | 930                     | 300   | 2181–2554        | 88.12            | 87.9  | 88.92                          | 5.97                           | 6.5   | 4.38  | 0.26  | 0.42  | 0.35 |
| <b>Алевролиты</b> |         |                   |       |                   |                         |       |                  |                  |       |                                |                                |       |       |       |       |      |
| 8                 | Vpd     | 18                | 44    | 30                | 200                     | 100   | 1158–1685        | 72               | 69.79 | 71.36                          | 12.8                           | 13.62 | 12.87 | 0.48  | 0.81  | 0.43 |
| 9                 | Vmz     | 81                | 116   | 5                 | 450                     | 220   | 1657–2156        | 66.97            | 70.43 | 69.1                           | 14.34                          | 12.51 | 13.21 | 0.76  | 1.31  | 1.08 |
| 10                | Vup     | 25                | 55    | 9                 | 870                     | 270   | 1700–2061        | 72.77            | 68.23 | 68.12                          | 14.81                          | 13.59 | 13.27 | 1.46  | 1.2   | 1.24 |
| 11                | Vup–tm  | 1                 | 1     |                   | 930                     | 300   | 2181–2554        | 88.12            |       |                                | 11.7                           |       |       | 0.3   |       |      |
| № п. п.           | MgO     |                   |       | Na <sub>2</sub> O |                         |       | 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    | БКП   | ЗБ-ОП | МС    |      |
| <b>Аргиллиты</b>  |         |                   |       |                   |                         |       |                  |                  |       |                                |                                |       |       |       |       |      |
| 1                 | 1.91    | 2.26              | 2.54  | 0.21              | 0.15                    | 1.72  | 4.58             | 3.43             | 3.57  | 7.2                            | 7.04                           | 5.7   | 0.5   | 0.47  | 1.56  |      |
| 2                 | 2.35    | 2.51              | 2.31  | 0.64              | 0.49                    | 2.11  | 4.27             | 4.08             | 3.08  | 6.08                           | 6.93                           | 3.75  | 1.63  | 1     | 3.09  |      |
| 3                 | 2.94    | 3.14              | 2.74  | 1.7               | 1.5                     | 2.06  | 3.29             | 3.66             | 3.61  | 3.39                           | 4.57                           | 3.15  | 3.16  | 2.96  | 3.88  |      |
| <b>Песчаники</b>  |         |                   |       |                   |                         |       |                  |                  |       |                                |                                |       |       |       |       |      |
| 4                 | 0.48    | 0.39              | 2.14  | 0.1               | 0.07                    | 2.28  | 1.11             | 1.01             | 1.72  | 1.1                            | 1.78                           | 1.46  | 0.22  | 0.44  | 1.17  |      |
| 5                 | 1.35    | 1.4               | 1.67  | 0.57              | 0.43                    | 2.7   | 2.39             | 2.45             | 1.73  | 1.8                            | 2.23                           | 1.75  | 1.04  | 0.59  | 1.74  |      |
| 6                 | 2.03    | 1.4               | 1.3   | 1.75              | 0.9                     | 2.54  | 1.69             | 1.8              | 1.65  | 1.3                            | 1.22                           | 1.57  | 2.35  | 1.26  | 1.7   |      |
| 7                 | 0.59    | 0.52              | 0.47  | 0.78              |                         | 1     | 2.03             |                  | 1.62  | 0.54                           | 1.1                            | 0.54  | 0.33  | 0.42  | 1.05  |      |
| <b>Алевролиты</b> |         |                   |       |                   |                         |       |                  |                  |       |                                |                                |       |       |       |       |      |
| 8                 | 1.24    | 1.34              | 1.85  | 0.14              | 0.11                    | 1.46  | 2.94             | 3.5              | 2.93  | 5.3                            | 5.63                           | 3.79  | 0.3   | 0.36  | 0.85  |      |
| 9                 | 1.99    | 1.87              | 1.94  | 0.6               | 0.62                    | 2.43  | 3.92             | 3.15             | 2.67  | 4.94                           | 3.85                           | 3.61  | 1.05  | 0.75  | 1.73  |      |
| 10                | 2.68    | 2.16              | 2.64  | 1.8               | 1.63                    | 2.61  | 3.21             | 2.96             | 2.33  | 3.48                           | 2.67                           | 2.75  | 3.41  | 2.3   | 2.59  |      |
| 11                | 0.95    |                   |       | 1.12              |                         |       | 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 геолого-съёмочных работах в районе Зимнего Берега Белого моря (результаты – по данным А.Ф. Станковского и др., 1981 г.); ОП – пробы отобраны из отложений Var–Vtm до глубины порядка 190 м при геолого-съёмочных работах в районе Летнего Берега Онежского полуострова (В.П. Копылов, 1974 г.). 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 – Т.А. Бабушкиной, остальные из отчетов ГПП “Ухтанефтегазгеология” (А.А. Иванов, 1993 г., Б.А. Пименов, 1990 г.) и ПГО “Архангельскгеология”).

Анализ таблиц и графиков позволяет сделать следующие выводы.

Накопление вендских отложений происходило в бассейне с нормальной морской соленостью. По [2] наиболее характерным процессом при этом является синтез хлорита из поровых растворов. При содержании магния в морской воде  $1.35 \text{ г/дм}^3$  и средней пористости осадка порядка 50% переход магния из поровых вод в породу мог привести к повышению содержания магния в ней не более чем на  $1.35 \text{ г/дм}^3$  твердой фазы, или повышению содержания  $\text{MgO}$  на 0.08%. Потеря водой калия привела к еще менее значительным результатам. В период континентального перерыва в кембрии–девоне гипергенные процессы, видимо, привели к снижению примерно на 0.5–1% содержания  $\text{Na}_2\text{O}$  и такому же повышению  $\text{K}_2\text{O}$  в горных породах, как это наблюдается для зоны активно водообмена в настоящее время.

В позднем девоне предполагается заполнение осадочной толщи венда в восточной части Мезенской синеклизы рассолами высокой степени испарительного концентрирования с минерализацией выше  $320 \text{ г/дм}^3$ , формировавшимися в процессе садки галита. Исходя из состава рассолов [4], можно полагать, что содержания брома в рапе составляли порядка  $2 \text{ г/дм}^3$ , натрия  $60 \text{ г/дм}^3$ , магния  $50 \text{ г/дм}^3$ , калия  $10 \text{ г/дм}^3$ , кальция  $0.4 \text{ г/дм}^3$ . В настоящее время, в пересчете на минерализацию  $320 \text{ г/дм}^3$ , они содержат брома  $2 \text{ г/дм}^3$ , натрия  $60 \text{ г/дм}^3$ , магния  $3 \text{ г/дм}^3$ , калия  $0.7 \text{ г/дм}^3$ , кальция  $60 \text{ г/дм}^3$ . То есть произошло снижение в рассолах магния на  $47 \text{ г/дм}^3$ , калия на  $9.3 \text{ г/дм}^3$ ; повысилось содержание кальция на  $59.6 \text{ г/дм}^3$ . Содержание натрия практически не изменилось. Магний и калий были использованы в процессах хлоритизации и гидрослюдизации. Переход магния в количестве  $47 \text{ г/дм}^3$  в породу при ее пористости 25% привел к повышению содержания  $\text{MgO}$  в ней на 1.25%. Переход калия в количестве  $9.3 \text{ г/дм}^3$  – к повышению содержания  $\text{K}_2\text{O}$  в породе на 0.25%. Повышение содержания кальция в рассоле на  $59.6 \text{ г/дм}^3$  при пористости пород 0.25 означает снижение содержания в породе  $\text{CaO}$  примерно на 1.5%. Основное значение в выносе кальция из пород, видимо, имели процессы гидролиза кальциевых алюмосиликатов, неравновесных со всеми типами подземных вод, в том числе и с рассолами. Эти процессы идут по механизму диффузионной кинетики до выравнивания в зоне весьма затрудненного водообмена, где преобладает диффузионный массоперенос концентраций кальция в породах и растворе (рис. 2б). Для оценки параметров процесса проведены оценочные расчеты для времени 0.36 млрд. лет. Принималось, что диффузия в объеме  $1 \text{ дм}^3$  осуществлялась в основном по одной эффективной трещине площадью  $0.1 \text{ дм}^2$ .

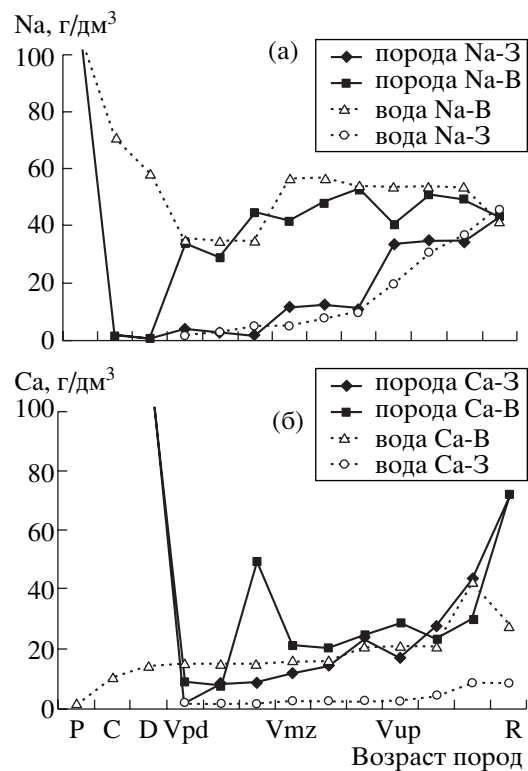


Рис. 2. Изменение содержаний натрия и кальция в твердой фазе и растворе в западной (З) и восточной (В) частях Мезенской синеклизы.

Получено значение  $D = 4 \cdot 10^{-19} \text{ м}^2/\text{сут}$ . В результате в терригенных отложениях венда произошло частичное (до 10%) преобразование зерен полевых шпатов в глинистые минералы. Как отмечается в работе [7], при гидролизе повышается щелочность раствора, нейтрализуемая углекислым газом. При этом образуется гидрокарбонат-ион, который связывает часть кальция, формируя карбонатный цемент. То есть принципиально возможны были и процессы доломитизации.

На основной части Мезенской синеклизы в позднем девоне существовал континентальный режим с максимумом поднятий в районах кимберлитового магматизма [3, 5]. В среднем карбоне бассейны с нормальной соленостью морской воды, как и в венде, видимо, не оказали существенного влияния на состав горных пород.

Пермские солеродные бассейны явились источником рассолов с относительно пониженным содержанием кальция и хлор-бромным коэффициентом, примерно соответствующим морской воде (II тип на рис. 1). Первоначально они заполняли весь осадочный чехол – до регионального водоупора аргиллитов усть-пинежской свиты венда. Минерализация рапы составляла до 270 г/л. Основные изменения их состава в процессе взаимодействия с горными породами заключались в сниже-

нии содержаний натрия со 100 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 обменом. Видимо, имели место и процессы альбитизации, доломитизации, гидрослюдизации. Снижение содержаний натрия на 40 г/дм<sup>3</sup> при пористости пород 0.25 могло привести к повышению содержаний Na<sub>2</sub>O в породах на 1%, магния на 4 г/дм<sup>3</sup> – к повышению MgO в породах на 0.1%, калия на 2.5 г/дм<sup>3</sup> – к повышению K<sub>2</sub>O в породах на 0.12%. Снижение содержаний в породе CaO – порядка 0.3%.

В поздней перми и мезозое–кайнозое в восточной части синеклизы химический состав отложенный венда практически не изменялся; в западной же части (в связи с ее стабильным поднятием) толща венда вошла в зоны сравнительно активного и активного водообменов и подверглась гипергенному выветриванию до глубины порядка 350 м. Этот процесс отражает рис. 2 в части характеристик состава воды и породы для западной части Мезенской синеклизы. В зоне сравнительно активного водообмена до глубины 200–600 м формирование соленых вод происходило за счет смешения пресных инфильтрационных вод с солеными седиментационными водами микулинского межледниковья и рассолами I типа. Наиболее интенсивными являлись процессы катионного обмена кальция горных пород на натрий, магний и калий подземных вод. В зоне активного водообмена для пресных вод алевролитов и песчаников падунской свиты венда в западной части Мезенской синеклизы при минерализации до 0.2–0.3 г/л характерен гидрокарбонатный магниевый-кальциевый состав. При минерализации 0.3–0.7 г/л – гидрокарбонатный натриевый и хлоридно-гидрокарбонатный натриевый. То есть наиболее характерным процессом является гидролиз натриевых алюмосиликатов, а также катионный обмен натрия горных пород на кальций, магний и калий. Для

карбонатов и сульфатов кальция в нижних частях зоны развития опресненных вод характерны и процессы осаждения с формированием карбонатного и гипсового цемента. Они связаны с фильтрацией карбонатных и сульфатных вод в глубь массива осадочных пород и смешением их с солеными водами. С этими причинами связано “отставание” темпов снижения содержаний кальция в породах по сравнению с раствором (рис.2б – 3).

Таким образом, исходный состав осадков венда существенно отличался от наблюдаемого сейчас. Он характеризовался высокими содержаниями CaO: 3–4%. Содержания Na<sub>2</sub>O 2–3%; K<sub>2</sub>O 1–2%. Минимальные содержания были характерны для MgO: 0.5–1%. Впоследствии они повысились в восточной части МС до 2–3% за счет процессов хлоритизации и доломитизации в позднем девоне. В западной части синеклизы морские источники магния в значительных количествах отсутствовали. Поэтому высокие содержания его здесь в нижних горизонтах венда можно связывать с процессами кимберлитового магматизма, когда большие количества магния перешли из кимберлитового расплава в раствор [3].

Наиболее изменен в настоящее время состав песчанников падунской свиты венда в западной части Мезенской синеклизы. Содержание SiO<sub>2</sub> в них повысилось на 15–20% (табл. 1) за счет выноса всех остальных компонентов химического состава.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Зверев В.П.* Роль подземных вод в миграции химических элементов. М.: Недра, 1982. 184 с.
2. *Котельников Д.Д., Солодкова Н.А.* // Изв. вузов. Геология и разведка. 1993. № 2. С. 54–63.
3. *Малов А.И.* // ДАН. 2001. Т. 377. № 1. С. 82–85.
4. *Малов А.И.* // Вод. ресурсы. 2001. Т. 28. № 6. С. 677–683.
5. *Малов А.И.* // Геоэкология. 2002. № 1. С. 18–27.
6. *Попов В.Г.* // Отеч. геология. 1994. № 2. С. 62–66.
7. *Шварцев С.Л.* // Геология и геофизика. 1991. № 12. С. 16–50.