

УДК 550.4

ГЕОХИМИЯ И ГЕНЕЗИС ПЕСЧАНИКОВ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ГЛАВНОГО ДЕВОНСКОГО ПОЛЯ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РУССКОЙ ПЛИТЫ

© 2011 г. С. Ю. Енгалычев*, Е. Г. Панова**

*Всероссийский научно-исследовательский геологический институт им. А.П. Карпинского
199074, г. Санкт-Петербург, Средний просп., 74
e-mail: sleng2005@mail.ru

**Санкт-Петербургский государственный университет, Геологический факультет
199034, г. Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9
e-mail: geochemistry@geology.spb.ru

Поступила в редакцию 29.04.2010 г.

Рассмотрены структурно-вещественные особенности песчаников северо-запада Русской платформы в пределах Ленинградской, Псковской, Новгородской и западной части Вологодской области. Изучен их минеральный и химический состав. Выделены различные минеральные типы цемента и установлена их геохимическая специализация. Проведена геохимическая индикация генезиса песчаных пород, в результате которой рассчитаны значения геохимических индикаторов при характеристике обстановок осадконакопления, осадочной дифференциации в бассейне седиментации, скорости осадконакопления, источников сноса, интенсивности выветривания в области палеосуши и палеоклиматических условий в области выветривания и в области седиментации.

Ключевые слова: *песчаники, Главное девонское поле, Русская плита, геохимические индикаторы, источники сноса, область седиментации.*

На северо-западе Русской плиты среди отложенных палеозоя широко распространены терригенные комплексы девона, слагающие Главное девонское поле (ГДП). Район является одной из классических областей развития девонских отложений, стоящий на одном уровне с такими хорошо изученными регионами как Шотландия, Уэльс, Аппалачи, Норвегия и о. Шпицберген. С отложениями девона связаны значительные запасы стекольных, формовочных и строительных песков. Кроме того, к девонскому комплексу приурочены рудопроявления урана, молибдена, фосфора, марганца, полиметаллов и находки алмаза.

Ряд структурно-вещественных особенностей песчаных пород ГДП были охарактеризованы в 40–70-е годы XX в. Р.Ф. Геккером, Д.В. Обручевым, Л.Б. Рухиным, Э.Ю. Самметом и др., а в 80–90-е гг. – в публикациях А.Б.Ронова и А.А.Мигдисова с соавторами. Однако, несмотря на длительную историю исследований осадочных отложений Русской плиты, с геохимической и минерагенической точки зрения песчаные породы девона к настоящему времени изучены слабо.

В качестве объекта исследования нами была выбрана восточная часть Главного девонского поля, где песчаные породы наиболее широко развиты и в наименьшей степени затронуты эпигенетическими изменениями. Геохимические исследования базируются

на структурно-текстурных и минералогических особенностях псаммитолитов. Из пород были выделены различные структурно-вещественные типы цемента и установлена их геохимическая специализация. Прослежена пространственно-временная изменчивость вещественных особенностей песчаных пород и определены основные факторы их контроля.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

В основу работы легли результаты тематических исследований на территории Ленинградской, Псковской, Новгородской и Вологодской областей, проведенных авторами в составе “Палеозойской экспедиции” СПбГУ в течение полевых сезонов 1998–2005 гг. Начало исследований было инициировано безвременно ушедшим в 1999 г. профессором СПбГУ В.Н. Швановым. В ходе полевых работ были описаны опорные разрезы Псковско-Демянской (ПД), Маловишерской (МВ) и Западно-Вологодской (ЗВ) структурно-фациальных зон (рис. 1, 2) по рекам Ордеж, Луга, Мста, Плюсса, Ловать, Паша, Оять, Сясь и Свирь, на Андомской горе и в карьерах у пос. Печоры и Новинка. Собрана представительная коллекция (более 1000) образцов песчаных пород.

В камеральных условиях были выполнены следующие виды работ: 1) определение карбонатности пород методом растворения – 40 обр.; 2) отму-

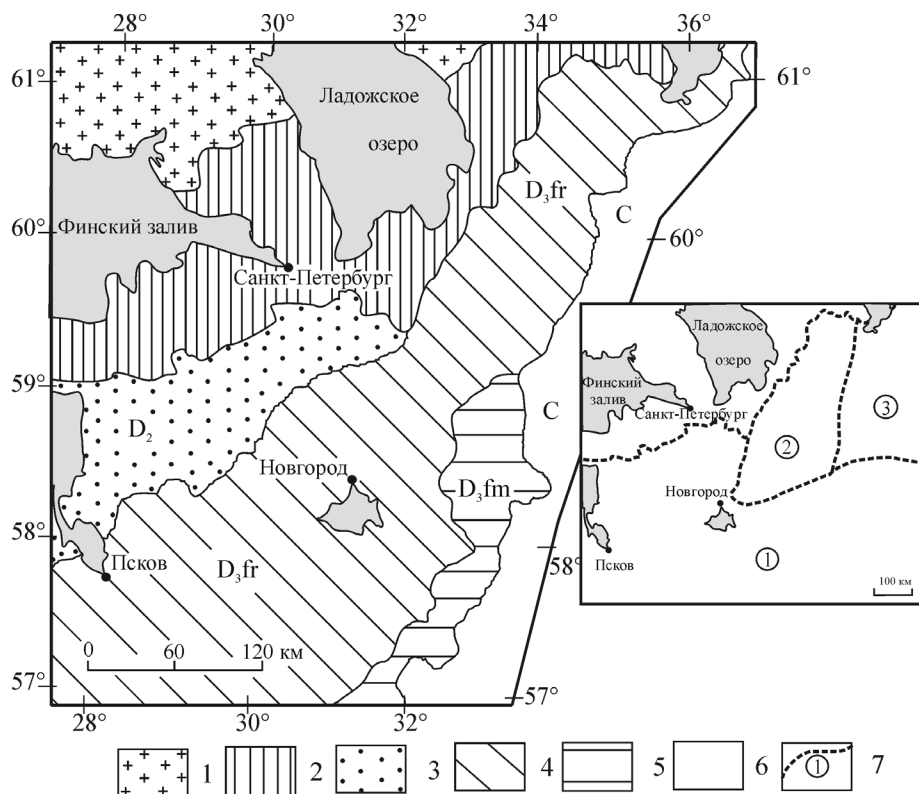


Рис. 1. Геологическая карта-схема восточной части Главного девонского поля, с обозначением границ структурно-фациальных зон в девонских отложениях по [12].

1 – магматические и метаморфические породы Балтийского щита, 2 – додевонские осадочные образования (венд–верхний ордовик), 3 – отложения среднего девона (эйфель–живет), 4 – верхний девон (фран), 5 – верхний девон (фамен), 6 – каменноугольные отложения, 7 – границы структурно-фациальных зон и их номера: 1 – Псковско-Демьянская, 2 – Маливишерская, 3 – Западно-Вологодская.

чивание глинистой составляющей песчаников – 55 обр.; 3) петрографическое изучение более 300 шлифов; 4) полуколичественный спектральный анализ – 600 обр.; 5) рентгено-спектральный силикатный анализ – 30 проб; 6) анализ цемента пород методом ICP-MS – 40 проб. Для выделения вещества различных структурно-вещественных типов цемента была разработана специальная методика, включающая: обработку проб ультразвуком (прибор УДЗН-2), отмучивание, “деликатное” дробление породы. Для установления последовательности минералообразования цемента песчаников он детально изучался в шлифах и под растровым электронным микроскопом, а определение его минерального состава проводилось с использованием рентгенофазового и дифференциально-термического анализов.

Полученные данные обрабатывались с помощью методов математической статистики с использованием программ Excel 9.0. и Statistica 5.0.

В процессе обобщения материалов были использованы фондовые данные СЗ ГПП “Севзапгеология”, ФГУП “ВСЕГЕИ” (группа В.Р. Вербицкого), Петербургской комплексной геологической экспедиции (группа А.С. Яновского, Э.Ю. Саммета).

СТРУКТУРНО-ВЕЩЕСТВЕННАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Результаты изучения текстурно-структурных особенностей песчаников и их минерального состава отражены в ряде публикаций [6–8, 11, 16, 22].

Тектурно-структурные особенности пород, их вещественный состав и содержащиеся в них остатки фауны и флоры свидетельствуют о том, что на территории восточной части ГДП существовали следующие обстановки осадконакопления песчаных пород: шельфовые, пляжевые, прибрежно-морские (различной степени глубинности), барьерных островов, дельтовые и лагунные. При этом в северо-восточной части палеобассейна преобладали относительно мелководные прибрежно-морские, пляжевые, дельтовые и лагунные отложения, тогда как в юго-западной части территории получили развитие более глубоководные фации, связанные с отложениями подводного берегового склона, удаленных участков прибрежной зоны и тиховодных областей ниже базиса воздействия волн. Выявленные особенности обстановок осадконакопления находят подтверждение в характере площадного рас-

пространения песчаных пород, в направлении палеотечений в палеобассейне, распространении растительных остатков и ихтиофауны [4]. Анализ приведенных материалов, свидетельствует о том, что на всех интервалах девонского разреза песчаные породы тяготеют к северо-восточной части палеобассейна. По мере продвижения на юго-запад, происходит постепенное замещение в разрезах песчаников глинами и карбонатолитами.

Минералого-петрографические исследования показали, что песчаники девона группируются преимущественно в поле кварцевых, олигомиктовых и, реже, мезомиктовых пород. Среди аутигенных минералов диагностированы полевые шпаты, кварц, халцедон, карбонаты, а также фосфоритовые конкреции и глауконит.

Цемент песчаных пород является высоко информативным объектом. В его составе контрастно отражаются изменения геохимических обстановок осадконакопления и дальнейшего преобразования пород. Нами выделяются следующие минеральные типы цемента песчаников: глинистый, железистый, карбонатный и кремнистый, для каждого из них характерны свои текстурные и структурные типы. Выделение глинистого цемента пород велось методом “деликатного” дробления, обработки проб ультразвуком и отмучивания. Железистый пленочный цемент выделялся из пород путем последовательных операций: выделение песчаной составляющей, отмучивание, с выделением глинистой части пород, ситование, обработка ультразвуком фракции 0.125–0.25 мм, отмучивание и осаждение. Для выделения карбонатного цемента без его растворения проводилось “деликатное” дробление породы, отсеивание алевритовых частиц и отделение по специальной методике фракции меньше 10 микрон. Для выделения кремнистого регенерационного цемента была использована аналогичная методика.

Исследования цемента псаммитолитов показали, что наиболее ранний – железистый цемент, сложен гетитом и гематитом, реже акаганеитом. Наряду с ними, в цементе присутствует значительное количество глинистых минералов (иллит, иллит-сметтит, шамозит). Глинистый цемент формируется после железистого и представлен преимущественно цементом заполнения, его доля составляет от 5 до 20 вес. % породы. В его составе преобладает гидрослюда (30–95), каолинит (1–50), хлорит (1–12), монтмориллонит (гидрослюда-монтмориллонит) (0–10); в виде примеси присутствуют гематит (до 15), кальцит и доломит (до 5) (вес в отн. %). Наиболее поздним по времени образования является карбонатный цемент, который развит неравномерно, корродирует обломочные зерна и другие типы цемента. По минеральному составу он бывает кальцитовым и доломитовым, в виде примеси присутствуют иллит, каолинит, хлорит, гидроксиды железа и гипс. Доломитовый цемент развивается позднее, за счет преобразования кальцитового цемента,

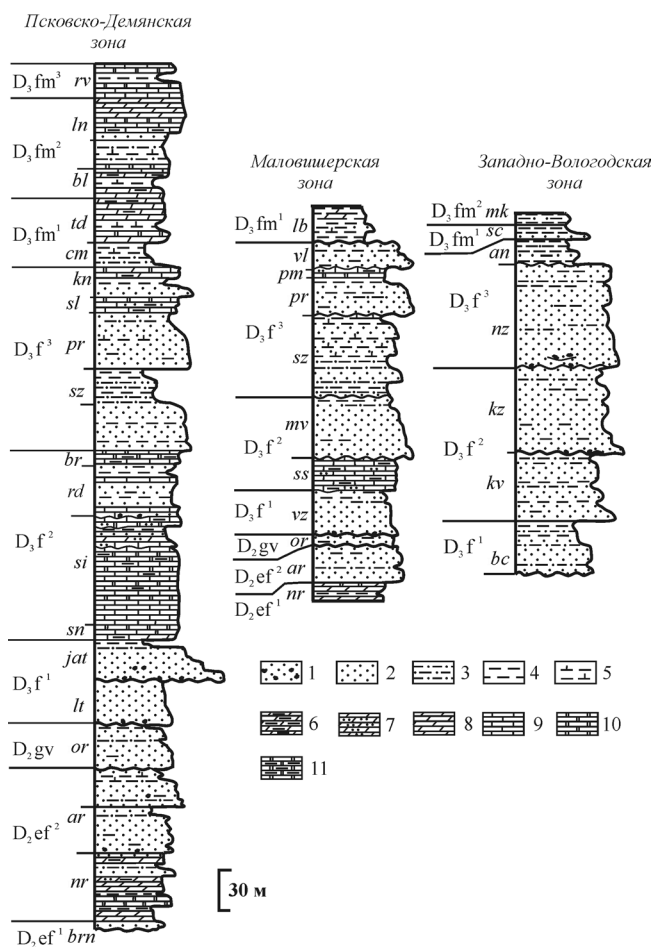


Рис. 2. Сводные разрезы трех структурно-фациальных зон восточной части ГДП.

1 – песчаник с гальками, 2 – песчаник, 3 – алевролит, 4 – глина, 5 – карбонатная глина, 6 – глинистый мергель, 7 – песчаный мергель, 8 – мергель, 9 – известняк, 10 – доломит, 11 – глинистый доломит. Сокращенные названия свит: Псковско-Демянская (ПД) зона: *vrn* – веймарнская, *nr* – наровская, *ar* – арукюлаская, *or* – ореджская, *lt* – лютинская, *jat* – ям-тесовская, *sn* – снетогорская, *si* – староизборская, *rd* – рдейская, *br* – буржская, *sz* – снежская, *pr* – приловатская, *sl* – смолтинско-ловатская, *kn* – куньинская, *cm* – чимаевская, *td* – тудерская, *bl* – биловская, *ln* – льнянская, *rv* – раевская; Маловишерская (МВ) зона: *nr* – наровская, *ar* – арукюлаская, *or* – ореджская, *vz* – важинская, *ss* – сясинская, *mv* – маловишерская, *sz* – снежская, *pr* – приловатская, *pt* – пярдомльская, *vl* – воложинская, *lb* – любытинская; Западно-Вологодская (ЗВ) зона: *bc* – белоручейская, *kv* – каровская, *kz* – курозерская, *nz* – нозрекая, *an* – андреевская, *sc* – сарручейская, *mk* – макарьевская.

имеет зональное строение и насыщен тонкодисперсными частицами оксидов и гидроксидов железа. На поздних стадиях в породах образуется кремнистый цемент, который развит локально в виде регенерационных каемок преимущественно на зернах кварца. По минеральному составу он представлен кварцем и халцедоном с незначительными примесями кальцита, доломита, иллита и каолинита.

Различные минеральные типы цемента неравномерно распространены в песчаных породах восточной части ГДП. Так, в северо-восточной части полигона велика доля железистого и глинистого, а в юго-западной части девонского палеобассейна преобладает карбонатный цемент. Последнее согласуется с увеличением “мористости” отложений в этом направлении и сменой опресненных прибрежно-морских отложений более солоноватоводными шельфовыми образованиями и далее – морскими, при увеличении в них доли карбонатного материала.

В целом, особенности минерального состава песчаных пород восточной части ГДП определяются многочисленными факторами, такими как состав пород области сноса, тектонический режим, климат, гидродинамика среды осадконакопления и постседиментационные процессы. Относительная роль каждого из перечисленных факторов может быть различна при формировании разновозрастных отложений, однако, наиболее существенным следует признать влияние породного состава питающей провинции Балтийского кристаллического щита.

ГЕОХИМИЯ ПЕСЧАНИКОВ

Данные о содержании петрогенных оксидов, полученные методом рентгеноспектрального силикатного анализа, сравнивались с кларками алевропесчаных пород Русской плиты [20] (табл. 1). В целом, следует отметить близость значений, однако наблюдается относительное обогащение девонских песчаников СаО и обеднение их Al_2O_3 и K_2O , что объясняется пониженным содержанием в них глинистой составляющей по сравнению с алевропесчаными породами Русской плиты.

Для песчаных пород восточной части ГДП наиболее значимые различия наблюдаются между песчаниками с карбонатным и железисто-глинистым цементом (табл. 1). Первые обогащены СаО, MgO, MnO и обеднены SiO_2 . Для остальных оксидов установлены близкие значения, что свидетельствует о сходстве кластического матрикса. Сравнивая песчаники из различных структурно-фациальных зон, следует отметить, что в Псковско-Демянской зоне породы наиболее химически зрелые. Они обогащены кремнеземом, что хорошо согласуется с результатами минералогических исследований, свидетельствующих о высокой минеральной зрелости пород.

Состав элементов-примесей песчаных пород оценивался на основании данных полуколичественного спектрального анализа по выборке из более чем 600 проб. Средние содержания химических элементов в породах рассчитывались как в целом для восточной части ГДП, так и для различных структурно-фациальных зон (табл. 1). Анализ данных показал, что в девонских песчаниках выше регионального кларка накапливаются Cu и Zr, а содержания Sr, Ba, V, Cr, Co, Sc, Pb, Zn, Ga – значи-

тельно ниже кларка, что свидетельствует об их общей химической зрелости.

При появлении в песчаниках карбонатного цемента в них, наряду с высоким содержанием Са, Mg и Mn, **накапливаются Ва, Zn и Pb.** По сравнению с породами среднего девона, породы верхнего девона обогащены Са, Mg, Mn, Y, Sc, Ni и Cr, что характеризует, в целом, более карбонатный состав верхнедевонских образований.

Результаты спектрального анализа песчаников были обработаны с помощью метода главных компонент факторного анализа. В выборке из 512 проб были учтены данные по пятнадцати элементам-примесям и пяти петрогенным оксидам (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , СаО, MgO, Na_2O), содержания которых были пересчитаны из окисной, в элементную форму. Виду относительной близости минерального и химического состава песчаников, были использованы данные по средним содержаниям химических элементов в песчаных отложениях каждой из 20 свит. На факторных диаграммах в координатах первого, второго и третьего факторов заметно разделение полей точек, отвечающих породам различного возраста и территориального положения. Наиболее высокие нагрузки связаны с первыми тремя факторами ($F_1 - 61$, $F_2 - 17$, $F_3 - 13\%$) (рис. 3), каждый из которых имеет достаточно сложную структуру.

Первый фактор отвечает за общее обогащение пород химическими элементами и характеризует химическую зрелость пород. Его отрицательные значения связаны с породами высокой минеральной и геохимической зрелости. Второй фактор отвечает за разделение пород на “прибрежно-морские” (отрицательные значения) и “морские” (положительные значения) образования. Последние обычно обогащены алевро-глинистой составляющей и, соответственно, имеют повышенные значения Al и Y. “Прибрежно-морские” песчаники накапливают Sr и Cu. Стронций накапливается в полевых шпатах, а их доля выше в отложениях МВ и ЗВ зон по сравнению с отложениями ПД зоны. Медь концентрируется на геохимических барьерах, характерных для прибрежно-морских условий и относительно более окислительных обстановок, что проявляется в их окраске. Наиболее высокие концентрации меди установлены в красноцветных породах.

Третий фактор отвечает за мористость отложений и позволяет выделить из выборки породы с карбонатным цементом, что соответствует накоплению в них Са, Mn и Mg. От общей выборки отличаются песчаники, обогащенные карбонатным цементом (льнянская, биловская, смотинско-ловатская, куньинская, важинская, любытинская свиты). Отрицательные значения фактора соответствуют увеличению роли Ni, повышенные содержания которого характерны для лагунных и морских обстановок. Типичные образования прибрежно-морского генезиса – отложения ЗВ зоны, ряд свит МВ и ПД зон.

Таблица 1. Средние содержания петрогенных оксидов (мас. %) и ряда химических элементов (г/т) в девонских песчаниках различных структурно-фациальных зон

| Оксиды | Кларк РП | Среднее по ГДП | Среднее по трем зонам | | | ПД зона | | | МВ зона | | | ЗВ зона | | |
|--------------------------------|----------|----------------|-----------------------|---------------|--------------|---------------|-------------|--------------|-------------|--------------|--|---------|--|--|
| | | | П | | | П | | | П | | | П | | |
| | | | n = 98 | ПК n = 31 | П n = 47 | ПК n = 14 | П n = 25 | ПК n = 5 | П n = 26 | ПК n = 2 | | | | |
| SiO ₂ | 73.90 | 73.55 | 56.17 | 94.45 | 54.34 | 92.09 | 68.77 | 80.76 | 41.28 | | | | | |
| TiO ₂ | 0.50 | 0.35 | 0.40 | 0.18 | 0.61 | 0.23 | 0.31 | 0.58 | 0.29 | | | | | |
| Al ₂ O ₃ | 9.67 | 4.20 | 4.04 | 2.28 | 6.51 | 4.17 | 2.89 | 8.12 | 3.06 | | | | | |
| Fe ₂ O ₃ | 2.74 | 2.04 | 2.49 | 0.59 | 2.10 | 1.91 | 1.12 | 3.33 | 5.72 | | | | | |
| FeO | 1.55 | 0.1 | 0.03 | 0.10 | 0.11 | 0.15 | 0.03 | 0.33 | 0.01 | | | | | |
| MnO | 0.07 | 0.08 | 0.15 | 0.01 | 0.02 | 0.01 | 0.18 | 0.01 | 1.00 | | | | | |
| MgO | 1.73 | 1.59 | 2.83 | 0.19 | 1.83 | 0.25 | 1.22 | 0.81 | 8.82 | | | | | |
| CaO | 3.51 | 8.10 | 15.68 | 0.43 | 16.79 | 0.38 | 12.22 | 0.88 | 16.36 | | | | | |
| Na ₂ O | 0.79 | 0.07 | 0.07 | 0.04 | 0.12 | 0.07 | 0.05 | 0.12 | 0.05 | | | | | |
| K ₂ O | 2.68 | 1.33 | 1.52 | 1.02 | 2.87 | 0.65 | 0.96 | 2.08 | 1.10 | | | | | |
| P ₂ O ₅ | 0.16 | 0.06 | 0.10 | 0.05 | 0.04 | 0.02 | 0.06 | 0.003 | 0.39 | | | | | |
| ппп | 2.70 | 8.53 | 16.51 | 0.67 | 14.65 | 0.08 | 12.20 | 2.98 | 21.92 | | | | | |
| Химический элемент | Кларк РП | Среднее по ГДП | Среднее по трем зонам | | | ПД зона | | | МВ зона | | | ЗВ зона | | |
| | | | П | | | П | | | П | | | П | | |
| | | | n = 320 | ПК n = 192 | П n = 215 | ПК n = 114 | П n = 76 | ПК n = 63 | П n = 29 | ПК n = 15 | | | | |
| Sr | 236 | 129 | 108 | 146 | 152 | 68 | 140 | 121 | 150 | | | | | |
| Ba | 415 | 389 | 331 | 473 | 428 | 317 | 514 | 361 | 550 | | | | | |
| V | 95 | 62 | 54 | 79 | 74 | 64 | 84 | 60 | 85 | | | | | |
| Cr | 80 | 55 | 49 | 73 | 56 | 54 | 88 | 66 | 57 | | | | | |
| Co | 16 | 9 | 9 | 12 | 12 | 12 | 12 | 8 | 10 | | | | | |
| Ni | 44 | 41 | 37 | 52 | 42 | 42 | 60 | 56 | 42 | | | | | |
| Zr | 224 | 314 | 289 | 376 | 323 | 341 | 423 | 316 | 454 | | | | | |
| Sc | 17 | 10 | 8 | 13 | 9 | 8 | 16 | 9 | 12 | | | | | |
| Y | 28 | 22 | 18 | 31 | 23 | 24 | 37 | 20 | 37 | | | | | |
| Cu | 30 | 41 | 36 | 48 | 45 | 33 | 50 | 41 | 56 | | | | | |
| Pb | 18 | 11 | 11 | 11 | 11 | 13 | 11 | 10 | 12 | | | | | |
| Zn | 74 | 44 | 41 | 49 | 48 | 48 | 50 | 41 | 66 | | | | | |
| Ga | 23 | 9 | 9 | 10 | 11 | 11 | 9 | 9 | 9 | | | | | |

Примечание. Кларк РП – средние содержания петрогенных оксидов и ряда химических элементов в алевропесчаных породах Русской плиты, [20]; П – песчаник без карбонатного цемента, ПК – песчаник с карбонатным цементом.

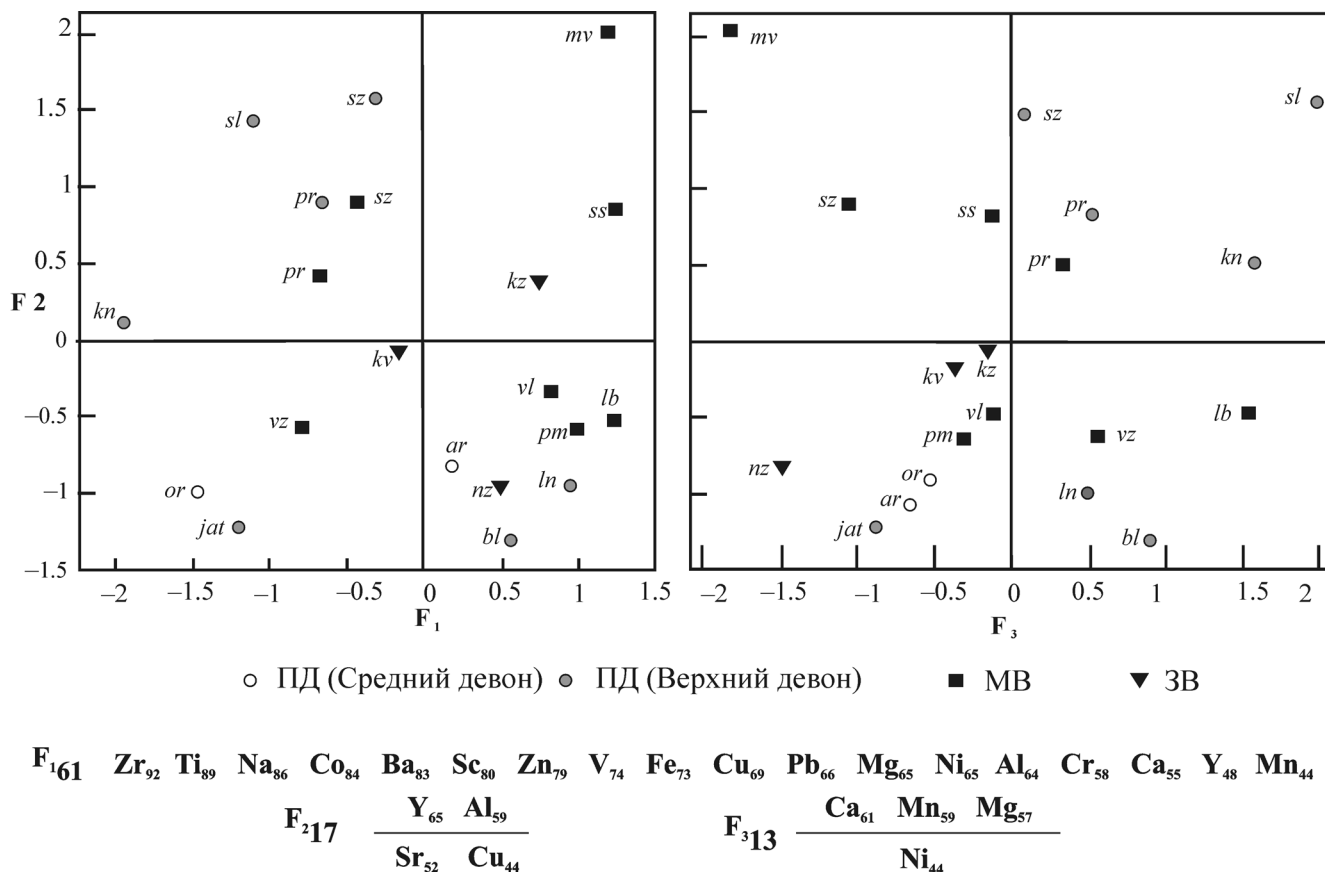


Рис. 3. Факторные диаграммы песчаных пород восточной части Главного девонского поля. Каждая точка соответствует среднему составу свиты. Сокращенные названия зон см. на рис 2.

По третьему фактору хорошо видно различие свит нижней (ореджеская, арукюлаская, ям-тесовская свиты) и верхней (льнянская, биловская свиты) терригенных толщ Псковско-Демянской зоны.

Наличие большого фактического материала позволило проследить изменчивость химического состава пород арукюлаской свиты среднего девона (ПД зона) по простиранию и выявить геохимическую специализацию различных обстановок осадконакопления, установленных на основе фациального анализа. Задача была решена с использованием метода главных компонент факторного анализа (рис. 4). На рисунке наблюдается частичное перекрытие полей барьерных островов и закрытого шельфа, что хорошо соотносится с близостью структурно-текстурных особенностей и минерального состава пород, сформировавшихся в этих зонах.

Первый фактор показывает общее обогащение проб рядом химических элементов. В генетическом плане он может быть интерпретирован, как показатель накопления в песчаных породах алевритоглинистой фракции, которой обычно обогащены породы, формирующиеся в спокойных и относительно глубоководных обстановках. Отрицательные значе-

ния второго фактора отвечают накоплению Na, Al, Mg, Ca, которые входят в состав глинистого и карбонатного цемента. Положительные значения этого фактора соотносятся с преобладанием в разрезе полевошпат-кварцевых песчаников с карбонатным цементом, которые накапливаются в условиях закрытого шельфа.

По третьему фактору происходит разделение полей закрытого шельфа и барьерных островов. Этот фактор можно связать с относительной солёностью палеобассейна. При этом, точки проб, относящихся к открытому шельфу разделились на два поля. Такое положение полей можно объяснить следующим образом: при влажных условиях на суше в бассейн осадконакопления поступают пресные воды, следствием чего является опреснение открытого шельфа. В случае сухих условий на суше, в бассейне наблюдается повышение солёности и падение уровня вод закрытого шельфа, соединение барьерных островов и, как следствие, формирование на закрытом шельфе засоленного бассейна.

Четвертый фактор характеризует гидродинамику застойных условий на закрытом шельфе, где накапливается медь. В условиях высокой подвижности вод на барьерных островах накапливается

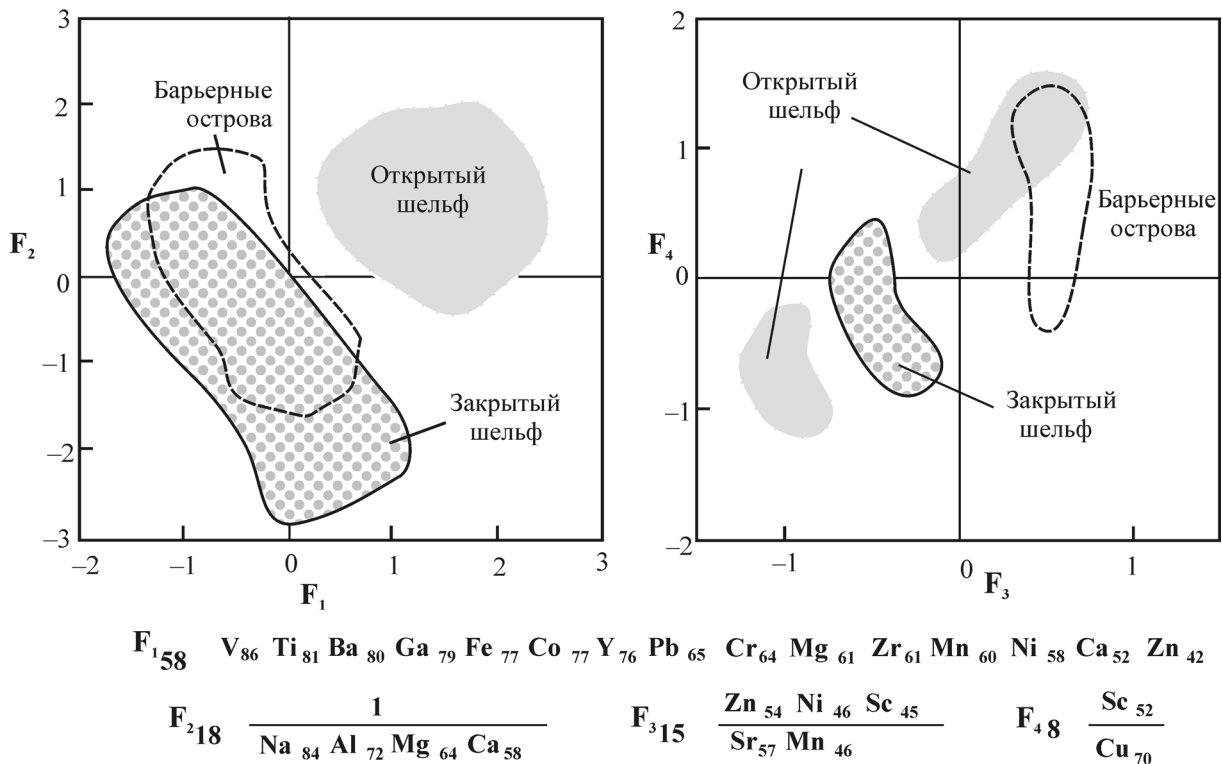


Рис. 4. Факторные диаграммы для песчаников арукюлаской свиты ПД зоны.

Количество проб: закрытый шельф – 110, барьерные острова – 48, открытый шельф – 32.

скандий. Заметно разделение отложений открытого шельфа на два поля, одно из которых тяготеет к барьерным островам, где в мелководной, прибрежной зоне существовали аэрируемые условия. Поле, близкое к ареалу закрытого шельфа – это относительно глубоководные осадки застойных вод.

Полученные результаты хорошо согласуются с изменением средних содержаний химических элементов по идеализированному литолого-фациальному профилю арукюлаского палеобассейна (рис. 5). Средние значения рассчитывались отдельно для каждой из фациальных зон: закрытый шельф – 110 проб, барьерные острова – 48 проб, открытый шельф – 32 пробы. Как видно из рисунка, в сторону открытого шельфа увеличиваются концентрации большинства химических элементов: Ba, V, Y, Ni, Co, Cu, Pb, Zn, Cr, Sc, Ti, Fe, Al. Для песчаников закрытого шельфа характерно накопление Mn, Ca и Mg.

ГЕОХИМИЯ ЦЕМЕНТА ПЕСЧАНИКОВ

Как было показано выше, в песчаных породах присутствуют различные структурно-вещественные типы цемента, каждый из которых был проанализирован методом ICP-MS.

Состав элементов-примесей *глинистого цемента* приведен в табл. 2. Сравнение его состава с кларками элементов для глин Русской плиты и с глинами ГДП показало значительное сходство при его обогащенно-

сти REE, Ni, Cr, V, Zn. Такой характер распределения химических элементов в глинистом цементе песчаников объясняется формированием последних, в мелководных прибрежно-морских условиях. Сравнение химизма цемента пород из различных структурно-фациальных зон свидетельствует о накоплении в МВ и ЗВ зонах Ba, Li, Rb, Cs, и высоком значении Ce/Y отношения, что соответствует относительной их определенности, по мере приближения к палеосуше.

Химический состав пленочного *железистого цемента* приведен в табл. 2. Как отмечалось выше, он содержит в своем составе примесь глинистых минералов. В пробах железистого цемента, обогащенных иллитом, накапливаются Sc и V, а присутствие каолинита приводит к накоплению Co, Ni и Mn. Сравнение пленочного глинисто-железистого цемента с существенно гематитовым цементом (цемент заполнения) показало, что в первом накапливаются Li, Rb, REE, Y и Sc, а второй обогащен группой халькофильных элементов – Cu, Zn, Cd, Pb, Sb, Mo. Железистый цемент песчаников обогащен, по сравнению с другими типами цемента и глинами Русской плиты, V, Cr, Ni, Pb, Zn, Co, Ni, Th и REE.

В составе *карбонатного цемента* наблюдается широкий спектр элементов-примесей (табл. 2). Сравнение его химического состава с кларками элементов для карбонатолитов Русской плиты показало его обогащенность REE, Y, Rb, Ba, Sc, Ga, Th, U и группой халькофильных элементов. Этот факт мож-

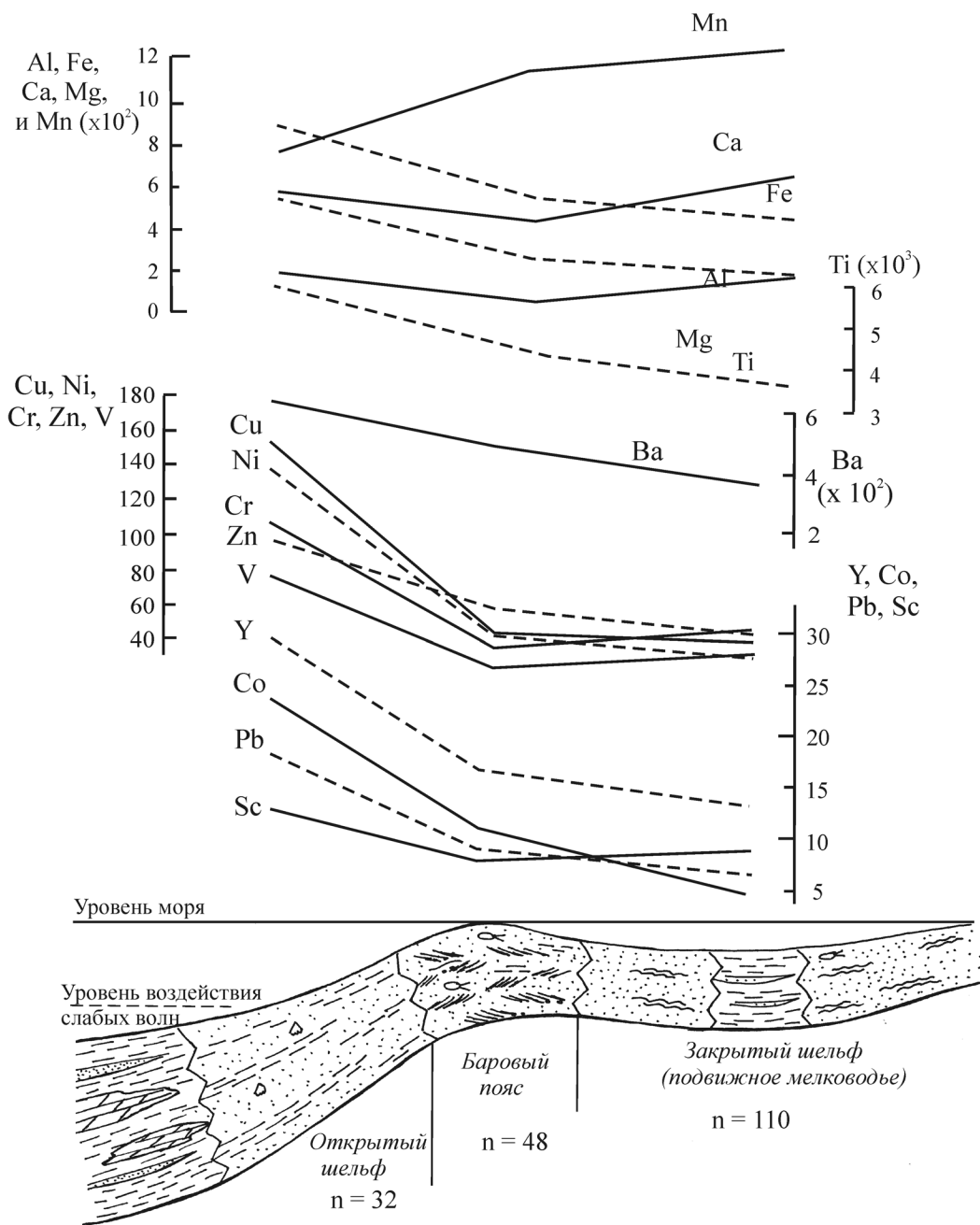


Рис. 5. Изменение содержаний ряда химических элементов в песчаниках литолого-фациального профиля арукюлаского палеобассейна ПД зоны, г/т.

но объяснить различиями в условиях формирования пород. Песчаники с карбонатным цементом образовались в более мелководных условиях, чем карбонатные породы. Контрастные различия наблюдаются между цементами кальцитового и доломитового состава. В кальцитовом цементе кроме Ca накапливаются Li и U, а в доломитовом – Sr, Rb, Ba и REE.

Кремнистый регенерационный цемент в геохимическом отношении является наиболее “чистым” в сравнении с другими типами цемента (табл. 2). Содержание практически всех химических элемен-

тов в его составе ниже, чем в других минеральных типах. Он обогащен Sr, что согласуется с петрографическими данными о присутствии в его составе полевых шпатов, которые накапливают стронций.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ИНДИКАЦИЯ ГЕНЕЗИСА ПЕСЧАНИКОВ

К настоящему времени геохимической индикации условий формирования осадочных пород уделяется значительное внимание [1–3, 5, 9, 10, 13–15, 23

Таблица 2. Средние содержания ряда химических элементов в различных минеральных типах цемента песчаников (г/т)

| Химический элемент | Тип цемента песчаных пород восточной части ГДП | | | | | Глины РП | Карбонаты РП |
|--------------------|--|------------|-------------|-------------|------------|----------|--------------|
| | глинистый | железистый | карбонатный | | кремнистый | | |
| | | | кальциевый | доломитовый | | | |
| n = 16 | n = 12 | n = 2 | n = 2 | n = 3 | | | |
| Li | 31.3 | 42.4 | 43.6 | 9.9 | 10.1 | 63 | 13 |
| Rb | 126.9 | 167.5 | 28.2 | 291.8 | 10.1 | 126 | 15 |
| Cs | 5.7 | 7.2 | 0.9 | 1.25 | 0.3 | 5.6 | 0.9 |
| Ba | 447.2 | 402.5 | 134.5 | 461.3 | 263.5 | 415.0 | 84 |
| Sr | 112.7 | 107.3 | 136 | 569 | 730.3 | 236 | 566 |
| La | 70.1 | 90.4 | 45.5 | 61 | 33.8 | 39 | 7.5 |
| Ce | 173.8 | 221.1 | 125 | 198.8 | 85.2 | 75 | 11.2 |
| Pr | 38.5 | 24 | 17.8 | 44.8 | 11.2 | 8.5 | 1.4 |
| Nd | 76.3 | 92 | 99 | 105.5 | 40.5 | 34 | 6.9 |
| Sm | 14.4 | 16.7 | 23.2 | 22 | 7.8 | 6.8 | 1.3 |
| Eu | 3.2 | 3.7 | 5.2 | 5.3 | 1.7 | 1.6 | 0.3 |
| Gd | 13.6 | 15 | 22.9 | 21.2 | 7.2 | 6 | 1.1 |
| Tb | 1.8 | 1.9 | 2.8 | 3 | 0.9 | 1 | 0.2 |
| Dy | 9.8 | 10.5 | 4.6 | 3 | 4.8 | 4.4 | 1.2 |
| Ho | 2.2 | 2.1 | 1.6 | 1.8 | 0.93 | 1.1 | 0.2 |
| Er | 4.9 | 5.2 | 6.4 | 8.6 | 2.2 | 3.1 | 0.7 |
| Tm | 0.8 | 0.9 | 1 | 1.4 | 0.36 | 0.5 | 0.1 |
| Yb | 4.3 | 4.6 | 5.4 | 6.9 | 1.6 | 2.7 | 0.6 |
| Lu | 0.6 | 0.6 | 0.8 | 0.9 | 0.2 | 0.4 | 0.1 |
| Y | 38.4 | 43.1 | 60.4 | 81 | 19.4 | 28 | 4.6 |
| Sc | 16.9 | 21.3 | 4.6 | 7.9 | 1.7 | 16.8 | 1.9 |
| Ga | 29.9 | 32.8 | 6.2 | 6.6 | 2.9 | 23 | 2 |
| Cu | 29.7 | 26.9 | 14 | 12 | 13.2 | 30 | 9 |
| Zn | 178 | 235.9 | 64.5 | 63.7 | 40.4 | 74 | 17 |
| Cd | 0.3 | 0.6 | 0.4 | 0.3 | 0.2 | 0.1 | 0.2 |
| Pb | 24 | 37.5 | 20.1 | 12.6 | 11.8 | 18 | 7 |
| Zr | 182.2 | 192.2 | 25.8 | 14 | 17.1 | 224 | 32 |
| Nb | 23.6 | 28.8 | 2.1 | 2 | 2 | 20 | – |
| Ta | 3.2 | 3.7 | 0.2 | 0.9 | 0.1 | 3 | 0.2 |
| V | 154.1 | 171 | 27.1 | 33.8 | 17.1 | 95 | 22 |
| Cr | 181.6 | 150.6 | 33.5 | 31.8 | 36 | 80 | 17 |
| Ni | 80.7 | 89.4 | 27.5 | 23.4 | 17.6 | 44 | 7.8 |
| Co | 24.1 | 33.8 | 7.8 | 14.8 | 3.2 | 16 | 2.2 |
| Sb | 0.8 | 1.3 | 0.5 | 0.2 | 0.4 | 1.1 | 0.3 |
| Th | 23.9 | 33.6 | 3.6 | 4.1 | 6.1 | 11.5 | 1.1 |
| U | 4.7 | 4.8 | 20 | 9.8 | 2.7 | 3.8 | 0.9 |

Примечание. Глины РП – средние содержания ряда химических элементов в глинистых породах Русской плиты, карбонаты РП – средние содержания ряда химических элементов в карбонатных породах Русской плиты [20].

и др.]. Применение геохимических индикаторов при реконструкции генезиса песчаников востока ГДП целесообразно ввиду того, что они, сформировавшиеся в переходных семиаридных и семигумидных условиях, имеют высококонтрастную геохимическую специализацию при слабом развитии процессов эпигенеза.

Обстановки осадконакопления

Первоначально реконструкция обстановок осадконакопления песчаников ГДП проводилась на

основе комплекса литолого-фациальных признаков, что позволило выделить шельфовые, пляжевые, прибрежно-морские (различной степени глубинности), барьерных островов, дельтовые и лагуны обстановки.

Для анализа условий осадконакопления традиционно используют ряд отношений химических элементов и модулей, некоторые из которых были впервые введены в середине XX в., но системно применены Я.Э. Юдовичем и М.П. Кетрис в конце прошлого века. Нами были выбраны отношения

Fe/Mn, Ti/Zr, Sr/Ba, Mn/Ni, Mn/Ga, Ti/Mn, а также гидролизатный, титановый, алюмокремниевый, щелочной, закисный, натриевый и калиевый модули (табл. 3).

Отношение Fe/Mn может являться индикатором условий осадконакопления. Его величина уменьшается с увеличением глубины бассейна при переходе от шельфовых зон к пелагическим [19], что объясняется накоплением марганца в глубоководных условиях, тогда как железо накапливается в мелководных обстановках. По величине этого отношения осадочные породы классифицируются следующим образом: Fe/Mn < 40 – глубоководные, 40–80 – мелководные, 80–160 – мелководно-прибрежные с преимущественно терригенным источником сноса.

Отношение Ti/Mn является показателем мелководности отложений. Оно уменьшается при удалении от области сноса и растет при приближении к суше. На континенте величина отношения составляет 110–150. Ввиду устойчивости минералов титана к химическому выветриванию они накапливаются в аллювиальных и прибрежно-морских условиях. В нормально-соленом морском бассейне содержание Ti **понижено, что объясняется отсутствием** его истинных растворов.

Значение отношения Ti/Mn для песчаников восточной части ГДП, свидетельствует о большей мелководности бассейна (табл. 3). Выводы, полученные на основе геохимических данных, хорошо согласуются с текстурно-структурными (седиментационные текстуры, следы биотурбации) и минералогическими особенностями пород и подтверждаются наличием мелководной фауны, прослоев мелкогалечных конгломератов и скоплений обломков ихтиофауны (“рыбные брекчии”).

На основе комплекса текстурно-структурных и вещественных признаков можно утверждать, что глубина палеобассейна в лагунах, заливах, на периферии дельт, подводных пляжах и подводном береговом склоне составляла первые метры, а на удаленных участках прибрежно-морской зоны достигала 20 м и более.

Отношения Mn/Ni и Mn/Ga выбраны в качестве индикаторных в связи с различной миграционной способностью этих химических элементов. Максимальные содержания марганца характерны для участков шельфа удаленных от берега, а галлий накапливается в прибрежной части моря и его количество быстро убывает в сторону моря. Никель концентрируется преимущественно в лагунных отложениях при наличии значительного количества органического вещества. Они могут использоваться как фациальные индикаторы прибрежно-морских обстановок осадконакопления [13].

Расчет этих отношений для песчаников восточной части ГДП показал, что высокие значения этих отношений наблюдаются в смотинско-ловатской, приловатской, маловишерской, любытинской и ку-

розерской свитах при максимальных значениях в отложениях ПД зоны, что соответствует высокой степени их мористости.

Отношение Ti/Zr используется при оценке дальности переноса терригенного материала [9]. При длительной транспортировке циркон (основной носитель циркония) сохраняется лучше по сравнению с минералами титана, и высокие значения этого отношения, соответственно, характеризуют относительно глубоководные условия, пониженные – прибрежно-морские.

Расчет отношений для пород восточной части ГДП показал, что они колеблются в достаточно узком интервале от 0.05 до 0.08 и изменяются по разрезу незначительно (табл. 3). Близость значений модуля свидетельствует об общности источника сноса, и прохождении обломочным материалом близких расстояний от области сноса до места захоронения.

Отношение Sr/Ba используется для разделения морских и пресноводных отложений. Как правило, пресноводные отложения имеют значение индекса менее 1, а морские – больше 1 [2]. Генетическая сущность отношения заключается в том, что барий при выветривании и седиментации легко адсорбируется коллоидными частицами. В случае смешения пресных вод с морскими, богатыми сульфатами, основная масса бария осаждается в виде BaSO₄. Высокие содержания бария фиксируются в прибрежно-морских осадках, в частности, вблизи устьев крупных рек, а в открытом море его количество уменьшается. Стронций, в отличие от бария, мигрирует вместе с кальцием, причем в морской воде он не осаждается химическим путем до достижения повышенной солености воды.

Величина отношения Sr/Ba в песчаниках востока ГДП меньше единицы и меняется от 0.2 до 0.8 (табл. 3). Рост отношения показывает относительное увеличение солености водоема. Максимальные значения установлены для ордежской свиты. Высокие значения модуля характерны в целом для отложений ПД зоны, а наименьшие – для пород арукюлаской, льянской, билловской свит и для большинства песчаников МВ и ЗВ зон. Пониженные значения палеосолености в породах МВ и ЗВ зон (в среднем 0.25–0.3), по сравнению с ПД (в среднем 0.5), хорошо согласуются с их близостью к палеосуше и нахождением вблизи неё наиболее опресненных зон палеобассейна. Подтверждением этого вывода является факт развития в песчаниках ПД зоны карбонатного цемента, что указывает на увеличение солености вод.

Полученные данные по индикаторным отношениям хорошо согласуются с развитием мелководных текстур, находками фауны и флоры, а также находят подтверждение в составе комплекса аутигенных минералов песчаников, которые представлены оксидами и гидроксидами железа, иллитом, каолином, шамозитом, характерными для относитель-

Таблица 3. Индикаторные отношения Fe/Mn, Ti/Mn, Mn/Ni, Mn/Ga, Ti/Zr, Sr/Ba и геохимические модули ГМ, АМ, ТМ, ЗМ, ЦМ, НМ, КМ в породах восточной части Главного девонского поля

| Зона | Свита | Fe/Mn | Ti/Mn | Mn/Ni | Mn/Ga | Ti/Zr | Sr/Ba | ГМ | АМ | ТМ | ЗМ | HKM | ЦМ | НМ | КМ |
|------|---------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| ПД | арукюлаская | 56 | 4.25 | 24 | 104 | 0.07 | 0.35 | 0.04 | 0.03 | 0.10 | 0.19 | 0.55 | 0.08 | 0.03 | 0.52 |
| ПД | ореджская | 110 | 13.06 | 17 | 27 | 0.09 | 0.81 | 0.02 | 0.02 | 0.09 | 4.57 | 0.13 | 0.15 | 0.02 | 0.11 |
| ПД | лютинская | — | — | — | — | — | — | 0.01 | 0.01 | 0.10 | 0.00 | 0.24 | 0.17 | 0.03 | 0.20 |
| ПД | ям-тесовская | 485 | 46.50 | 3 | 14 | 0.05 | 0.62 | 0.04 | 0.02 | 0.26 | 0.34 | 0.55 | 0.08 | 0.02 | 0.53 |
| ПД | рдейская | — | — | — | — | — | — | 0.05 | 0.04 | 0.13 | 0.01 | 0.69 | 0.03 | 0.02 | 0.67 |
| ПД | снежская | 12 | 1.43 | 51 | 201 | 0.08 | 0.53 | 0.06 | 0.04 | 0.06 | 0.13 | 0.51 | 0.01 | 0.01 | 0.51 |
| ПД | приловатская | 25 | 2.06 | 20 | 95 | 0.08 | 0.51 | 0.10 | 0.08 | 0.05 | 0.22 | 0.63 | 0.02 | 0.01 | 0.62 |
| ПД | смотинско-ловатская | 6 | 0.86 | 121 | 396 | 0.07 | 0.57 | 0.04 | 0.03 | 0.12 | 0.31 | 0.77 | 0.01 | 0.01 | 0.76 |
| ПД | куньинская | 190 | 14.76 | 5 | 11 | 0.10 | 0.57 | 0.03 | 0.02 | 0.09 | 0.12 | 0.76 | 0.02 | 0.02 | 0.74 |
| ПД | биловская | 27 | 3.57 | 28 | 165 | 0.10 | 0.25 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ПД | льнянская | 130 | 15.22 | 6 | 33 | 0.10 | 0.29 | 0.08 | 0.07 | 0.11 | 1.20 | 0.50 | 0.03 | 0.01 | 0.49 |
| МВ | важинская | 18 | 2.01 | 51 | 194 | 0.08 | 0.36 | 0.21 | 0.13 | 0.08 | 0.05 | 0.31 | 0.04 | 0.01 | 0.30 |
| МВ | сясинская | 21 | 3.10 | 40 | 111 | 0.09 | 0.22 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| МВ | маловишерская | 36 | 2.03 | 13 | 190 | 0.09 | 0.30 | 0.11 | 0.06 | 0.10 | 0.11 | 0.50 | 0.18 | 0.05 | 0.45 |
| МВ | снежская | 35 | 4.37 | 20 | 58 | 0.09 | 0.34 | 0.07 | 0.05 | 0.11 | 0.24 | 0.45 | 0.12 | 0.04 | 0.41 |
| МВ | приловатская | 22 | 2.21 | 44 | 182 | 0.10 | 0.25 | 0.06 | 0.04 | 0.16 | 0.47 | 0.54 | 0.07 | 0.03 | 0.50 |
| МВ | пярдомльская | 62 | 4.56 | 23 | 94 | 0.09 | 0.22 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| МВ | воложинская | 28 | 3.36 | 30 | 138 | 0.09 | 0.22 | 0.12 | 0.09 | 0.07 | 0.01 | 0.00 | 1.00 | 0.00 | 0.00 |
| МВ | любытинская | 14 | 1.88 | 57 | 356 | 0.07 | 0.25 | — | — | — | — | — | — | — | — |
| ЗВ | белоручейская | — | — | — | — | — | — | 0.47 | 0.28 | 0.06 | 0.00 | 0.28 | 0.05 | 0.01 | 0.27 |
| ЗВ | каровская | 26 | 2.71 | 28 | 161 | 0.08 | 0.38 | 0.15 | 0.10 | 0.10 | 0.26 | 0.40 | 0.05 | 0.02 | 0.38 |
| ЗВ | курозерская | 11 | 0.94 | 123 | 591 | 0.10 | 0.22 | 0.19 | 0.13 | 0.08 | 0.15 | 0.28 | 0.03 | 0.01 | 0.28 |
| ЗВ | нозрекская | 100 | 6.16 | 11 | 67 | 0.07 | 0.54 | 0.26 | 0.17 | 0.09 | 0.07 | 0.25 | 0.10 | 0.02 | 0.23 |

Примечание. Зоны: ПД – Псковско-Демянская, МВ – Маловишерская, ЗВ – Западно-Вологодская. Модули: ГМ – гидролизатный, АМ – алюмокремниевый, ТМ – титановый, ЗМ – Закисный, ЦМ – щелочной, НМ – натриевый, КМ – калиевый.

но опресненных условий. В нижнефранских песчаниках установлены фосфатные конкреции и редкие зерна глауконита, указывающие на нормально морской характер водоема (или его части). В изолированных мелководных лагунах, расположенных на относительно удалении от палеосуши (в южных, юго-западных частях палеобассейна) господствовали условия повышенной солености, приводящие к отложению гипса.

Одним из важнейших модулей, используемых при изучении терригенных отложений, является *гидролизатный модуль* ($ГМ = (Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$). Его генетический смысл заключается в том, что при выветривании пород элементы-гидролизаты образуют трудно растворимые оксиды (Al_2O_3 , TiO_2 , Fe_2O_3 , MnO). Модуль позволяет количественно оценить проявление двух важнейших гипергенных процессов – выщелачивания и гидролиза. Чем выше величина модуля, тем более глубокому выветриванию подверглись породы области сноса, а чем меньше эта величина, тем выше химическая зрелость осадочной породы. По величине ГМ большинство песчаников девона ГДП относятся к силитам, единичные пробы – к сиааллитам и сиферлитам.

Алюмокремнистый модуль ($АМ = Al_2O_3/SiO_2$) показывает степень химического выветривания пород. Величина модуля для песчаников находится в

интервале 0.1–0.22; кварцевым разностям и кремнистым породам соответствуют величины <0.1, глинистым породам – 0.22–0.35.

Расчеты, выполненные для пород восточной части ГДП показывают, что изменение ГМ и АМ имеет сходный характер. При переходе от ПД к МВ и ЗВ зоне в целом наблюдается увеличение их значений, что объясняется продвижением в сторону палеосуши и поступлением свежих продуктов выветривания с палеосуши. Понижение величины модулей вглубь палеобассейна хорошо соотносится с общим увеличением химической и минеральной зрелости пород. В пределах каждой из структурно-фациальных зон наиболее низкие значения ГМ и АМ модулей характерны для интервалов, отличающихся высокой зрелостью терригенно-минералогических ассоциаций. В разрезе ПД зоны наименьшие значения модулей установлены для ореджской, лютинской и кунинской свит. Рост значений модулей для верхнефранских и фаменских отложений связан с увеличением доли глинистого и карбонатного материала в песчаниках. Низкие значения модулей ГМ и АМ в породах МВ зоны связаны с относительной зрелостью песчаных пород приловатской и снежской свит, тогда как в менее зрелых образованиях важинской и воложинской свит наблюдаются более высокие величины модулей.

Щелочной модуль ($\text{ЩМ} = \text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}$), характеризует интенсивность процессов химического выветривания в области размыва. Его величина уменьшается в период усиления выветривания и увеличивается в эпохи его ослабления. Этот модуль часто используют совместно с натриевым и калиевым модулями. Величина этого модуля дает дополнительную информацию об относительной доле глинистого вещества в составе пород, ввиду того, что в глинистых породах количество Na_2O значительно меньше, чем K_2O , а в обломочных разностях Na_2O преобладает над K_2O . Увеличение ЩМ наблюдается в эпохи наиболее значительного поступления в бассейн седиментации относительно свежего обломочного материала, в котором была высока доля полевых шпатов. Для песчаников востока ГДП повышенные значения установлены для лютинской (ПД зона), маловишерской, воложинской (МВ зона) и нозрежской свиты (ЗВ зона). Такой рост ЩМ соответствует высокой минералогической зрелости пород.

Калиевый модуль ($\text{KM} = \text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$) определяется интенсивностью процессов химического выветривания в области размыва. Калий входит в состав полевых шпатов и накапливается при их разрушении в континентальных отложениях в условиях засушливого климата. Во влажном климате он переносится в виде растворов и взвеси и концентрируется в морских и озерных осадках. Алюминий связан с глинистой частью пород, и его содержание в осадках увеличивается в сторону открытого бассейна. Низкие значения калиевого модуля характерны для континентальных осадков, тогда как в прибрежно-морских и пелагических отложениях его значение увеличивается.

Величина калиевого модуля меняется в песчаниках ГДП от 0.15 до 0.8. Наиболее высокие его значения характерны для отложений франского времени, что соотносится с их мористостью. Причем в ПД зоне оно составляет 0.6–0.8 единиц, в МВ зоне – 0.4–0.5, а в ЗВ зоне – 0.3–0.4. Уменьшение значения калиевого модуля от ПД к МВ и ЗВ зонам соответствует переходу к прибрежно-морским и континентальным осадкам.

Натриевый модуль ($\text{NM} = \text{Na}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$). Натрий обычно переносится в виде растворов и взвеси; максимальные его концентрации наблюдаются в континентальных отложениях в условиях засушливого климата и в морских и озерных осадках в условиях влажного климата. Наиболее бедны натрием прибрежно-морские образования. Накопление Al в основном связано с глинистой составляющей пород, в связи с чем его количество возрастает в сторону открытого бассейна.

В пределах ГДП максимальные значения натриевого модуля приурочены к зонам открытого морского бассейна, а его изменения позволяют судить о ходе развития трансгрессий и регрессий бассейна.

Титановый модуль ($\text{TM} = \text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$) часто используется при выявлении происхождения осадков [21]. Величина его возрастает при переходе из аридной зоны в гумидную, а в пределах последней – по мере движения от глубоководных зон к прибрежно-морским и континентальным фациям. Высокие значения TM характерны для песчаников по сравнению с глинами, что определяется проявлением сортировки обломочного материала, приводящей к частичному разделению акцессорных минералов титана и более легкого глинистого вещества – носителя глинозема. Ряд исследователей используют этот модуль для выявления условий древнего климата, что возможно лишь в условиях постоянства источника сноса. В ряде случаев динамическая сортировка материала и состав пелитонда влияют на величину TM гораздо сильнее, чем климатический фактор.

Повышенные значения TM были установлены на уровнях развития мелководных отложений (ямтесовская, смотинско-ловатская и приловатская свиты) МВ зоны (табл. 3). Увеличение этого модуля в породах указанных интервалов свидетельствует о частичной гумидизации климата вблизи палеосуши (МВ и ЗВ зоны).

Таким образом, можно утверждать, что прилегающая к области сноса прибрежная часть водоема была сильно опреснена. Объем поступающих с суши пресных вод был весьма значителен, что говорит о высокой степени увлажнения палеосуши. Характерно, что в отрезки времени, когда имело место наибольшее опреснение бассейнов, увеличивалась и зрелость поступающего в них обломочного материала.

Осадочная дифференциация в бассейне седиментации

Дифференциация в бассейне седиментации наиболее ярко проявляется в эпохи спокойного тектонического режима, когда сокращается объем материала, приносимого с палеосуши, и обломочный материал дольше перерабатывается в бассейне осадконакопления. В эпохи значительной тектонической активности усиливается снос с палеосуши и объемы поступающих в бассейн седиментации рыхлых продуктов выветривания, которые относительно быстро захораниваются. Для определения степени проявления осадочной дифференциации А.А. Предовским был предложен параметр d , который вычисляется по результатам силикатных анализов с использованием пересчета на молекулярные количества по формуле: $d = (A_{\text{пл}}/F_{\text{пс}}) \times 1000$, где $A_{\text{пл}}$ – средняя величина параметра А для пелитов, а $F_{\text{пс}}$ – средняя величина для псаммитов. Значения $A_{\text{пл}}$ и $F_{\text{пс}}$ вычисляются, как отношение $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ [17, 18].

Наибольшая степень дифференциации характерна для отложений фамена ПД зоны. Для пород

среднего и верхнего франа ЗВ зоны отмечаются близкие значения величины этого параметра (0.41–0.45), что соответствует сходству условий их формирования.

Различия в степени дифференциации можно проиллюстрировать на примере арукюлаской и оредежской свит среднего девона ПД зоны. Значение параметра d составляет для арукюлаской свиты – 0.09, а для оредежской – 0.16. Изменение минерального и химического состава пород в ходе дифференциации выражается в увеличении мономинеральности пород, накоплении устойчивых минералов тяжелой фракции, повышенной сортировке обломочного материала и увеличении окатанности обломков. Кроме того, песчаные породы арукюлаской свиты имеют мезомиктовый, а оредежской – олигомиктовый состав. В составе минералов тяжелой фракции песчаных пород данных свит, заметны отличия – в песчаниках оредежской свиты повышено количества циркона и граната. В химическом составе также заметны существенные отличия – породы оредежской свиты, обладающие более высокими значениями параметра d , обеднены большинством химических элементов по сравнению с породами арукюлаской свиты.

Интенсивность выветривания в области палеосуши

Состав первичного обломочного материала, поступающего в бассейн седиментации, отражает состав пород петрофонда и интенсивность процессов выветривания в области размыва. При этом особое значение имеют степень выветрелости обломочного материала и скорость его поступления в конечный водоем стока.

Для оценки интенсивности выветривания в области размыва А.А. Предовским [17, 18] был предложен параметр W , представляющий собой сумму частной глиноземистости $A = Al_2O_3 - (K_2O + Na_2O + CaO)$ и суммы щелочей $K = K_2O + Na_2O$, которые вычисляются по данным силикатных анализов с использованием пересчета на молекулярные количества.

Величина параметра W для песчаников востока ГДП колеблется от 30 до 140 ед. Для пород ПД зоны отмечается значительный разброс значений W , по сравнению с МВ и ЗВ зонами. По величине W можно заключить, что усиление выветривания в области сноса происходило в оредежское, снежское и тудерское время. Полученные выводы хорошо соотносятся с увеличением доли каолинита в цементе песчаных пород, отвечающих этим возрастным интервалам. Наиболее высокие значения индекса установлены в мелководных обстановках пляжей и шельфовых поднятий. Вверх по разрезу ПД зоны наблюдается направленное увеличение степени осадочной дифференциации, что хорошо согласуется с минералогическими данными и фациальными

изменениями отложений.

Кроме того, степень выветрелости обломочного материала, поступающего в бассейн, можно оценить по породам, территориально тяготеющим к источнику сноса. В разрезах МВ и ЗВ зон установлены более высокие значения и меньшие дисперсии этого параметра, по сравнению с ПД зоной. В породах первых двух зон отмечена высокая доля легко разрушающихся акцессорных минералов и слабо окатанных зерен, что может свидетельствовать о сильном влиянии на состав отложений пород источника сноса.

Характер выветривания в области палеосуши (южная часть Балтийского щита) в течение девонского периода менялся. Усиление тектонической активности в области сноса способствует быстрому разрушению пород и выносу в области накопления незрелых продуктов выветривания. Если в областях накопления преобладают нисходящие тектонические движения, то в бассейне накапливаются мощные толщи слабо сортированных осадков, характеризующихся незначительной зрелостью минерального состава. Глубина и характер процессов выветривания, а в зависимости от них, и интенсивность денудационных процессов являются функцией совместного проявления тектонических движений и климата.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые на единой методологической основе собран и обобщен материал по песчаным отложениям среднего и верхнего девона, развитым на востоке Главного девонского поля. Определены основные обстановки седиментации песчаных отложений в палеобассейне, оценена пространственная и временная изменчивость минерального и химического состава песчаных пород. Впервые выделены основные минеральные типы цемента песчаных пород и установлена их геохимическая специализация.

На основе геохимических данных выявлены особенности среды осадконакопления, степень дифференциации материала в бассейне седиментации, интенсивность выветривания в области палеосуши. С использованием геохимических данных рассчитаны индикаторные отношения позволяющие диагностировать удаленность от палеосуши и глубину палеобассейна.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Геохимические исследования для решения задач региональной геологии. Л.: ВСЕГЕИ, 1991. 126 с.
2. Геохимические исследования осадочных пород для решения геологических задач // Тр. ВСЕГЕИ. 1978. Т. 295. 133 с.
3. Геохимические показатели при изучении геологических процессов и поисках полезных ископаемых.

- емых // Под ред. В.К. Лукашева. Минск: Наука, 1980. 152 с.
4. *Енгальчев С.Ю.* Новые данные об ихнотекстурах из песчаных отложений Главного девонского поля // Вестник СПбГУ. 2003. Сер. 7. В. 3. С. 97–103.
 5. *Енгальчев С.Ю.* Применение петрохимических модулей при оценке зрелости девонских терригенных отложений на востоке Главного девонского поля // Геология и эволюционная география. СПб.: Эпиграф, 2004. С. 22–31.
 6. *Енгальчев С.Ю.* Тектурно-структурные особенности и генезис среднедевонских песчаников арукюлаской свиты на востоке Главного девонского поля // Вестник СПбГУ. 2005. Сер. 7. В. 3. С. 19–27.
 7. *Енгальчев С.Ю.* Глауконит из девонских песчаных отложений восточной части Главного девонского поля // Вестник СПбГУ. 2008. Сер. 7. В. 3. С. 47–57.
 8. *Енгальчев С.Ю., Панова Е.Г.* Геохимия девонских песчаников восточной части Главного девонского поля. СПб.: СПбГУ. 2008. 100 с.
 9. Интерпретация геохимических данных / Под ред. Е.В. Скляра. М.: Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.
 10. *Кулькова М.А.* Геохимическая индикация ландшафтно-палеоклиматических условий в голоцене регионов Двинско-Ловатского междуречья и южной Сибири. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб.: СПбГУ, 2005. 36 с.
 11. *Курис В.М.* Девонское терригенное осадконакопление на Главном девонском поле. Рига: Наука, 1992. 208 с.
 12. Легенда Ильменской серии листов Государственной геологической карты Российской Федерации масштаба 1 : 200 000 / Под ред. В.П. Кирикова. СПб.: ВСЕГЕИ, 1999. 76 с.
 13. *Лукашев В.К.* Геохимические индикаторы процессов гипергенеза и осадкообразования. Минск: Наука, 1972. 318 с.
 14. *Лукашев В.К., Аношко Я.И., Васильева Л.И. и др.* Геохимическая дифференциация элементов в морских и континентальных средах / Под ред. К.И. Лукашева. Минск: АН БССР, 1986. 207 с.
 15. *Маслов А.В.* Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: УГГУ, 2005. 289 с.
 16. *Панова Е.Г., Казак А.П., Якобсон К.Э.* Терригенное осадконакопление на Главном девонском поле // Литосфера. 2003. № 4. С. 19–32.
 17. *Предовский А.А.* Геохимическая реконструкция первичного состава метаморфизованных вулканогенно-осадочных образований докембрия. Апатиты: Наука, 1970. 115 с.
 18. *Предовский А.А.* Реконструкция условий седиментогенеза и вулканизма раннего докембрия. Л.: Наука, 1980. 152 с.
 19. *Резников А.Н.* Железо-марганцевый коэффициент как показатель обстановки осадконакопления // Изв. вузов. Нефть и газ. 1961. № 1. С. 19–22.
 20. *Ронов А.Б., Мигдисов А.А.* Количественные закономерности строения и состава осадочных толщ Восточно-Европейской платформы и Русской плиты и их место в ряду древних платформ мира // Литология и полез. ископаемые. 1996. № 5. С. 451–475.
 21. *Страхов Н.М.* Основы теории литогенеза. М.: Наука, 1960. Т. 1. 212 с.
 22. *Федоренко Я.Д., Менакер Е.А.* Закономерности распределения меди в девонских отложениях Латвии // Литология и полез. ископаемые. 1971. № 3. С. 57–66.
 23. *Юдович Я.Э., Кетрис М.П.* Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.

Рецензент М.Т. Крупенин

Geochemistry and origin of sandstones of eastern part of Main Devonian field in the north-west of Russian Plate

S. Yu. Engalychev*, E. G. Panova**

*All- Russian Geological Research Institute (VSEGEI)

**Saint-Petersburg State University, Geological department

The structure-matter peculiarities of sandstones of Russian Plate within the limits Leningrad, Pskov, Novgorod and Vologda districts are considered in the article. Their mineral and chemical composition was studied. Different mineral types of cement with its geochemical specialization were separated out. The geochemical indicators of sedimentation environment, sediment differentiation, velocity of sedimentation, sources of sediment drifting, intensity of paleoland weathering and paleoclimate in weathering and sedimentation provinces were determined.

Key word: sandstones, Main Devonian field, Russian Plate, geochemical indicators, sources of sediment drifting, sedimentation province.