

## ТЕРРИГЕННОЕ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЕ НА ГЛАВНОМ ДЕВОНСКОМ ПОЛЕ

Е.Г. Панова\*, А.П. Казак\*\*, К.Э. Якобсон\*\*

\*Санкт-Петербургский государственный университет  
199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9

E-mail: Elena@vexp15.spb.org

\*\*Всероссийский геологический институт  
199106, Санкт-Петербург, Средний пр., 74

Поступила в редакцию 19 ноября 2002 г.

Рассмотрены результаты литологического изучения отложений девона на территории северо-запада Восточно-Европейской (Русской) платформы. Охарактеризованы структуры, текстуры пород и их минеральный состав. Основной особенностью формирования минеральных ассоциаций терригенных пород Главного девонского поля является существование принципиально одного источника сноса обломочного материала в течении среднего и позднего девона – Балтийского щита, расположенного на севере Русской платформы. Выявлена общая тенденция изменения минеральных ассоциаций вверх по разрезу: закономерное увеличение доли устойчивых минералов в этом направлении связано со сменой климатических условий и возрастанием роли химического выветривания в позднедевонское время. Палсоклиматическая обстановка, оцененная с использованием геохимических коэффициентов Е.П. Акульшиной и Ю.А. Балашова, характеризуется сменой семиаридного климата среднедевонского времени на гумидный в позднедевонское время. В девонском палеобассейне проявляется отчетливая латеральная зональность: при продвижении с севера на юг наблюдается смена генетических типов осадков от аллювиальных, прибрежно-морских до морских. Нормальная соленость воды (10–20 ‰) способствовала развитию широкого разнообразия биологических видов; среднегодовая температура в девонском палеобассейне составляла 19–20 °С.

Ключевые слова: *терригенные комплексы, Главное девонское поле, структурно-вещественный анализ, литогенез, палеоклиматические реконструкции.*

## TERRIGENOUS SEDIMENTATION ON THE MAIN DEVONIAN FIELD

E.G. Panova\*, A.P. Kazak\*\*, K.E. Jakobson\*\*

\*Saint-Petersburg state University

\*\*All Russian geological institute

The results of the lithological investigation of the devonian terrigenous deposits on the north-east of East-European (Russian) platform were analysed. The textures, structures and mineral compositions were characterized. The main relationships of terrigene-mineralogical zonation is the existance only the one provenance of clastogene materials – Baltic sheild. The main tendency of evolution of mineral composition upward devonian column is the enlargement of stable the chemical weathering minerals. Using the Akulshina and Balashov geochemical coefficients had shown the replacement of the semiarid climate in the middle devonian to the humid climate in the upper devonian period. From the north to the south of the devonian paleobasin the genetic types of sediments is changed from alluvium to coastal-marine and marine one. The salinity of the basin water was the normal (10–20 ‰); the mid-year temperature was near 19–20 °С.

Key words: *devonian terrigenous deposits, textures, structures, mineral compositions, paleochemical regime.*

Северо-запад Русской платформы представляет собой классическую провинцию распространения терригенных красноцветных отложений. Выходы пород девонского возраста известны на территории Ленинградской, Псковской, Новгородской и, частично, Вологодской областей. Располагаясь на северо-западном борту Московской синеклизы, отложения девона протянулись от Чудского озера на западе до Онежского озера на востоке (рис. 1). Изучение девонских отложений было начато в первой половине XIX-го столетия Л. Бухом, Э. Эйхвальдом, Г. Гельмерсеном, Х. Пандером, П.Н. Венюковым, А.Н. Миклухо-Маклаем. В начале XX века на этой территории работали Б.П. Асаткин, Р.Ф. Геккер, В.М. Куршс, Л.А. Лярская, А.М. Мигдисов, Д.В. Обручев, М.А. Ратеев, А.Б. Ронов, Л.Б. Рухин, Э.Ю. Саммет, С.В. Тихомиров, В.А. Филишова и многие другие. Литологические исследования, прерванные в 60-е годы, были частично продолжены в рамках работ по ГДП-200. Кроме того, в последние годы возрос интерес к этой территории в связи с обнаружением

первичных источников и поиском вторичных коллекторов алмазов, что предполагает проведение, в первую очередь, детальных литологических работ. Однако к настоящему времени, несмотря на длительную историю исследований Главного девонского поля, литологические особенности терригенных пород на территории Ленинградской, Псковской, Новгородской областей изучены довольно слабо по сравнению с районами выходов девонских отложений в Прибалтике [Куршс, 1992] и в Центральных областях России [Тихомиров, 1995]. Возрастающее прикладное значение девонских терригенных отложений обусловило необходимость обобщения данных об их составе и условиях образования. Таким образом, целью данной работы явилось изучение структурно-вещественных особенностей пород и условий формирования терригенных комплексов девона на северо-западе Восточно-Европейской (Русской) платформы. Каменный материал отбирался во время геологических маршрутов-сплавов по рекам Оредеж, Луга, Мста, Плюсса, Ловать, Андома, а также при посещении ряда естественных и искусственных обнажений на территории Главного девонского поля.

Осадочные породы девонского возраста на территории работ представлены терригенными и глинисто-карбонатными красно- и пестроцветными отложениями с подчиненным значением грубообломочных разностей, а также хемогенных карбонатных и сульфатных отложений, общая мощность которых достигает 1000 м (рис. 2). Породы среднего девона и нижнего подъяруса франского яруса верхнего девона представлены преимущественно алевро-песчаными отложениями с подчиненным количе-

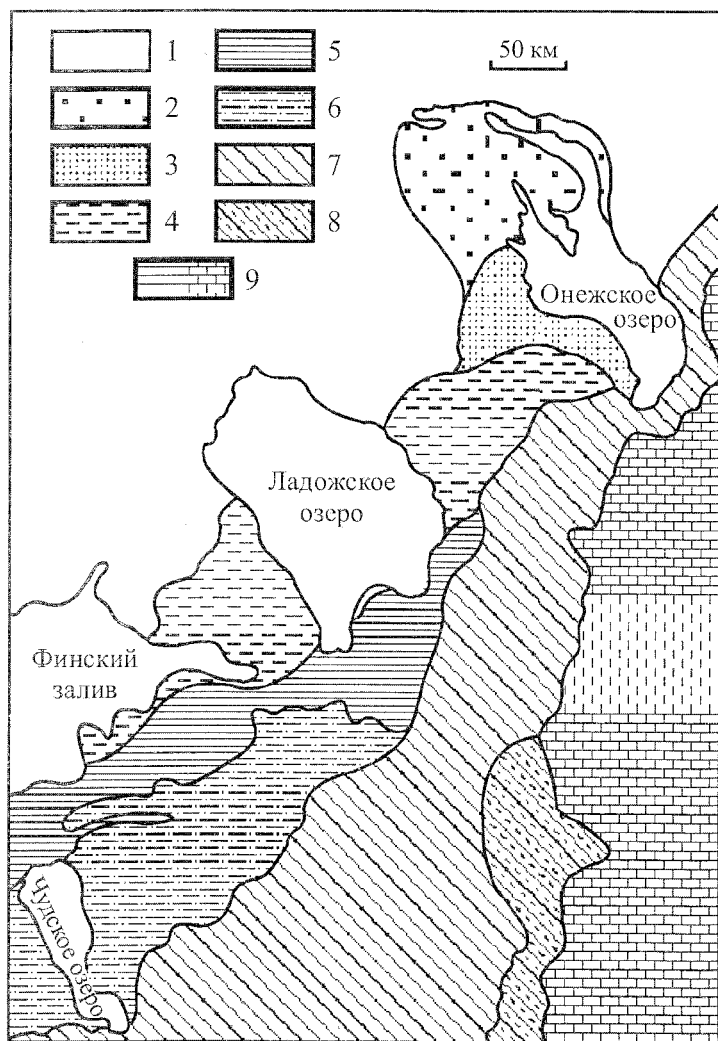


Рис. 1. Верхнепротерозойские и фанерозойские отложения осадочного чехла северо-запада Восточно-Европейской (Русской) платформы.

1 – образования щита; 2-9 – разновозрастные отложения осадочного чехла: 2 – ятулийские, 3 – венсийские, 4 – вендские, 5 – кембро-ордовикские, 6 – среднедевонские, 7 – верхнедевонские франского яруса, 8 – верхнедевонские фаменского яруса, 9 – каменноугольные.

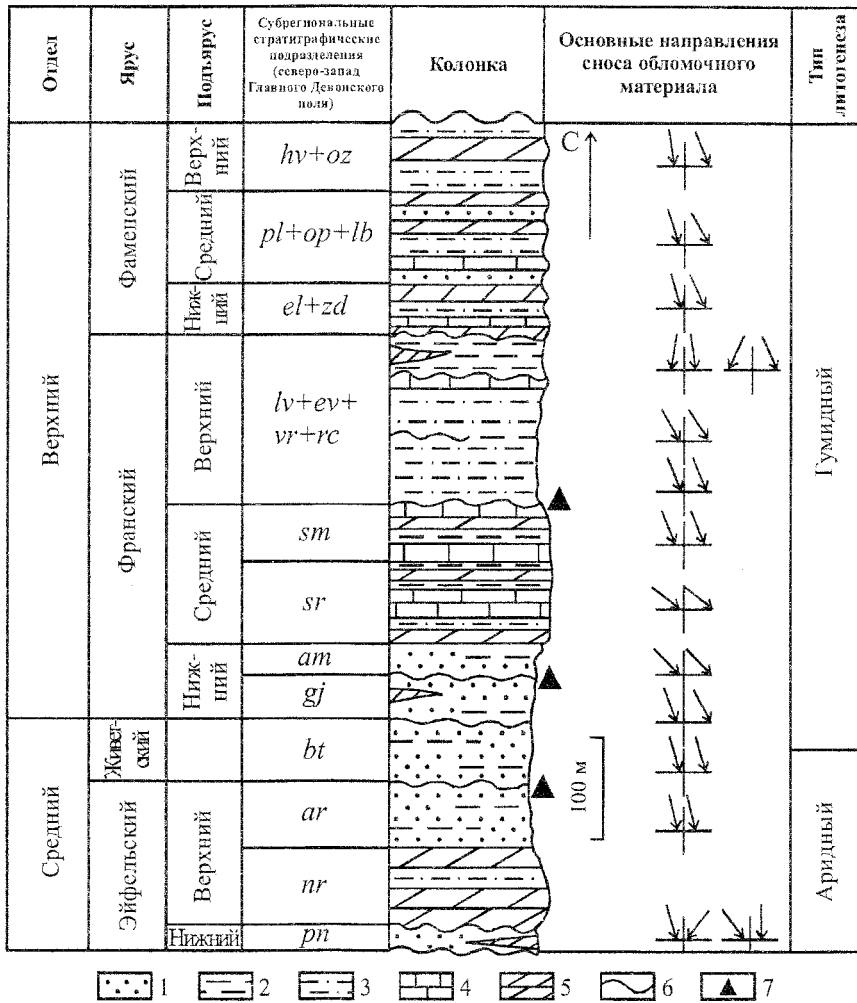


Рис. 2. Сводная стратиграфическая колонка девона Ленинградской, Псковской и Новгородской областей.

1 – песчаник; 2 – глина; 3 – переслаивание песчаников и глин; 4 – известняк; 5 – доломитолит, мергель; 6 – перерывы осадконакопления; 7 – излияния базальтов (по данным [Родионова, Умнова, 1997]).

Горизонты: pn – пярнуский; nr – наровский; ar – арукюлацкий; bt – буртниекский; gj – гауйский; am – аматский; sr – саргаевский; sm – семилуцкий; lv+ev+vr+rc – ливенский+евлановский+воронежский+речицкий; el+zd – елецкий+задонский; pl+op+lb – плавский+опуховский+лебедянский; hv+oz – хованский+озерский.

ством глин и карбонатолитов. Породы среднего франа – доломитолиты, известняки с подчиненным развитием глин, алевролитов и песчаников. Среди верхнефранских и фаменских отложений распространены мергели, глины, доломитолиты, алевролиты и песчаники.

Одной из характерных особенностей девонских отложений Главного девонского поля является их цикличность. В средне-верхнедевонских разрезах наиболее распространены асимметричные двух- и трехчленные циклы. В основании пачки, а также часто и внутри нее, залегают линзы конгломератов с фосфоритами,

обломками кремневых растений и ихтиофауны. Далее наблюдаются песчаники быстрых однонаправленных течений. Второй элемент циклов представлен глинисто-алевритовыми отложениями с прослоями мелкозернистых песчаников, образовавшимися в условиях сравнительно глубоководных шельфовых фаций. Для этих осадков характерна высокая слоистость, карбонатность (в виде желваков и журавчиков), бедность фаунистическими остатками. Третий элемент циклов представлен доломитолитами, известняками с фаунистическими остатками и неравномерно распределенным крупнопесча-

ным материалом. Этот элемент циклов относится к фации морского мелководья, иногда переходящий в фацию засоленных лагун. Для средне-верхнедевонских отложений характерны симметричные циклы, трансгрессивная фаза которых представлена песчаниками, загипсованными доломитами, мергелями или карбонатными глинами, соответствующими максимуму развития засоленных мелководных бассейнов. Вторая фаза цикла соответствует максимуму трансгрессии и представлена доломитами и известняками. Третья фаза цикла представлена карбонатными алевролитами и глинами с прослоями мелкозернистых песчаников. Регрессия сопровождалась опреснением вод и развитием ихтиофауны, лингул, эстерий. Асимметричные терригенные циклы представлены в основании косослоистыми песчаниками с многочисленными следами размыва и оползания осадков, в депрессиях дна бассейна – брекчированными песчаниками. Формирование базального элемента цикла связано с фацией авандельты, а завершающий элемент цикла представлен тонкодисперсными глинами, алевролитами с прослоями мелкозернистых песчаников. Породы содержат остатки рыб, конхостраков, наземных растений, фосфоритовые конкреции. Такие отложения характерны для мелководных бассейнов, сохранивших связь с морем и (или) для дельтовых областей опресненных лагун. Начало и конец крупных циклов седиментации выражаются в смене комплексов органических остатков, подчеркиваются перерывами осадконакопления, в отдельных случаях сопровождаются активизацией вулканической деятельности: ниже-среднедевонского, эйфельско-живетского, живетско-франского, средне-верхнефранского, франско-фаменского, среднефаменского и девонско-каменноугольного времени [Родионова, Умнова, 1997].

**Структурно-вещественная характеристика пород.** В составе песчаных пород участвуют аллотигенные и аутигенные минералы, обломки фосфоритов. В структурном отношении песчаники достаточно однородны, структура пород – мелкозернистая с преобладанием фракции 0,2–0,1 мм, с подчиненным распространением среднезернистых разностей (0,315–0,25 мм). В основании циклов наблюдаются более крупнозернистые разности вплоть до гравелитов. Формы песчаных зерен разнообразны: изометричные, вытянутые, удлиненные. Зерна пород характеризуются различной степенью окатан-

ности: окатанные, полуокатанные, округлые, остроугольные и угловатые. В основании толщи в песчаниках преобладают слабо окатанные зерна; хорошо окатанных зерен немного или они отсутствуют. Вверх по разрезу наблюдается увеличение доли окатанных зерен, что отчетливо проявляется в пределах отдельных циклов седиментации. Кроме зерен различной степени окатанности встречаются остроугольные, угловатые зерна. Остроугольные обломки отличаются свежестью, наличием остроугольных зазубренных краев, секториальными формами сколов, раковистым изломом.

Минеральный состав девонских отложений приведен в таблице 1. Согласно классификации осадочных пород [Систематика и классификация ..., 1998], песчаники Главного девонского поля по содержанию порообразующих компонентов относятся к мезомиктовым и олигомиктовым разностям. Кварц является основным порообразующим минералом рассматриваемых терригенных отложений. Его количество в породах изменяется от 65 до 99 об. %. Наибольшее содержание кварца отмечено для отложений буртниежского, гауйского, аматского горизонтов и для песчаников фаменского яруса. Вторым по значимости компонентом девонских песчаных пород являются обломки пород. Они представлены в разной степени окатанными, мелко-среднезернистыми кварцитами, слюдистыми сланцами, гнейсами и гранитами. Обломки кристаллических пород, как правило, сосредотачиваются в относительно крупно-среднезернистых разностях; их количество составляет 1–20 об. %. На долю полевых шпатов в песчаниках приходится 1–15 об. %, редко до 20 об. %. Полевые шпаты представлены кислыми плагиоклазами, микроклином и ортоклазом. Их обломки, как правило, подвержены вторичным изменениям, среди которых широко развиты серицитизация и каолинизация. Особенно широко каолинизация проявлена в буртниежских и гауйских песчаниках. В породах живетского возраста полевые шпаты почти нацело замещены каолинитом.

В песчаных породах средне-верхнедевонской терригенной толщи отмечается присутствие слюды, составляющей в среднем 1–10 об. %; в отдельных случаях встречаются микалиты, в которых количество слюды превышает 50 об. % [Панова, Шванов, 2000]. Наиболее крупные слои микалитов, сложенные чешуйками обломочной слюды размером до 3 мм, концентри-

Таблица 1

Средние содержания обломочных зерен и минералов тяжелой фракции в песчаных отложениях Главного девонского поля (об. %)

Ярус	Индекс	кварц	полевые шпаты	слюды	обломки пород	пирокс	ильменит	турмалин	ставролит	кнанит	гранат	рутил	апатит	Прочие (магнетит, лейкоксен, амфибол, пироксен)
Фаменский	D <sub>3</sub> fm <sub>3</sub>	90	8	1	1	2	18	6	20	24	0	6	8	16
	D <sub>3</sub> fm <sub>2</sub>	90	7	2	1	2	20	4	22	22	0	8	6	16
	D <sub>3</sub> fm <sub>1</sub>	92	4	3	1	2	35	20	4	4	0	2	1	32
Франский	D <sub>3</sub> fr <sub>3</sub>	88	2	9	1	2	30	5	5	20	0	8	10	20
	D <sub>3</sub> sm	85	7	3	5	2	48	2	2	2	0	1	1	42
	D <sub>3</sub> sr	91	4	2	3	2	50	2	2	2	0	1	1	40
	D <sub>3</sub> am	80	5	7	8	40	1	10	20	0	0	1	20	8
	D <sub>3</sub> gj	89	5	1	5	50	1	10	30	0	0	1	2	6
Живетский	D <sub>2</sub> bt	90	6	2	2	40	9	11	10	2	20	2	3	3
Эйфельский	D <sub>2</sub> ar	70	10	10	10	30	10	16	5	2	20	5	8	4
	D <sub>2</sub> nr	76	12	5	7	20	5	25	5	0	30	0	10	5
	D <sub>2</sub> pr	81	4	2	13	25	5	5	5	0	55	0	1	4

ругуются в нижних частях мощных косых серий. В составе слюд микалитов преобладает мусковит (55–100 отн. %), количество сидерофиллита составляет 40–18 отн. %, биотита – 1–5 отн. %. Снизу вверх по разрезу среднего девона и далее в породах позднего девона в песчаных породах уменьшается количество микалитов, а среди слагающих их слюд – доля биотита и сидерофиллита, неустойчивых к химическому выветриванию.

В песчаниках наблюдались различные структурные и минеральные типы цемента: железистый, кальцитовый, доломитовый, глинистый, реже сидеритовый и фосфатный. Железистый цемент – наиболее распространенный и определяющий красноцветную окраску песчаников. Чаще всего цемент пленочный, закрытый или открытый поровый. По данным рентгено-фазового анализа в состав железистой пленки входят преимущественно гематит и акаганеит. Карбонатный цемент разнообразен по составу и структуре. Преобладает кальцитовый, в основном, базальный и открытый поровый. Кальцитовый цемент образуется после железистого, а в случае отсутствия последнего каемки карбонатного состава обволакивают зерна пленкой. В ряде случаев карбонатная цементация приводит к образованию обособленных спемантированных участков причудливых округлых очертаний и форм, которые получили название журавчиков. Кроме кальцитового, встречается

доломитовый и сидеритовый цемент. Глинистый цемент встречается в песчаниках достаточно часто. Обычно он неравномерный пленочный. Среди глинистых минералов цемента преобладает гидрослюда (30–95 отн. %), каолинит составляет 1–50 отн. %, хлорит – 1–12 отн. %, монтмориллонит (гидрослюда-монтмориллонит) – 0–10 отн. %. Гидрослюда является постоянно присутствующим глинистым минералом цемента. Доля каолинита в составе цемента песчаников возрастает при переходе от отложений среднего к верхнему девону, что определяется, в первую очередь, сменой аридного на гумидный тип климата. Внутри отдельных толщ повышенные концентрации каолинита характерны для оснований циклов. Смешаннослойные минералы распространены спорадически; их повышенные содержания определяются постседиментационными изменениями. В песчаниках буртниецкого, гауйского и аматского горизонтов встречается фосфатный цемент, а также фосфоритовые стяжения и конкреции, приуроченные к основаниям косых серий. Среди аутигенных минералов в небольших количествах присутствует глауконит (1–2 об. %). Развиты аутигенные полевые шпаты, кварц, халцедон, карбонаты, апатит.

Минералогические исследования показали, что выход **тяжелой фракции** песчаников составляет от 2 до 15 об. %. Анализ результатов исследований свидетельствует о контраст-

ном распределении минералов в вертикальной колонке (табл. 1). Для отложений среднего девона характерна ассоциация циркон-гранат-турмалиновая, которая сменяется в гауйских отложениях верхнего девона циркон-ставролит-турмалиновой. Исчезает гранат, который является одним из наиболее неустойчивых к химическому выветриванию минералов. В аматском горизонте в циркон-ставролит-турмалиновой ассоциации появляется до 20 об. % апатита, а среди прочих минералов – до 10 об. % амфибола. В песчаниках среднего франа в ассоциации тяжелых минералов преобладает ильменит, магнетит и лейкоксен. В отложениях верхнего франа в песчаниках накапливается ильменит-кианит-апатит-ставролитовая ассоциация. Песчаники нижнего фамена отличаются высоким содержанием ильменита, турмалина, амфибола, а для песчаников среднего фамена характерна ставролит-ильменит-кианитовая ассоциация тяжелых минералов. В целом, в песчаниках верхнего девона наблюдается практически полное отсутствие граната, что подтверждает интенсивное протекание процессов химического выветривания в позднем девоне, в то время как циркон и турмалин проявляют устойчивость к химическому выветриванию [Бергер, 1986]. При формировании ассоциации тяжелых минералов верхнего франа и нижнего-среднего фамена в пробах наблюдается отсутствие и граната и циркона; для проб из этих отложений характерна тесная корреляция апатита, рутила, кианита, силлиманита, дистена, амфиболов, мусковита и биотита. Наблюдаемые изменения минеральных ассоциаций могут свидетельствовать о появлении других факторов кроме гумидизации

климата. В частности, такими факторами могут быть изменение состава источников сноса, появление новых источников, усиление роли механического выветривания. По-видимому, при формировании песчаников верхнего девона в области размыва преобладали кристаллические сланцы кианит-ставролит-биотит-кварцевого, кианит-ставролит-мусковитового, биотит-кварцевого состава и кварциты.

Глины широко распространены на территории Главного девонского поля, однако практически все горизонты пелитолитов содержат примесь алевролитового материала, количество которого колеблется от 20 до 45 об. %. В составе фракции < 0,002 мм наиболее широко распространена диоктаэдрическая гидрослюда политипных модификаций 2M<sub>1</sub> и 1M. Вторым по распространенности глинистым минералом является каолинит. Хлорит представлен двумя разновидностями: магниезальный хлорит характерен для отложений среднего девона, а в отложениях франского и фаменского ярусов преобладает железистые разновидности. Монтмориллонит в вертикальном разрезе распространен спорадически; его максимальное количество наблюдается в отложениях среднего франа. Минеральный состав глинистых прослоев меняется снизу вверх по разрезу (табл. 2).

Как известно, аллотигенные глинистые минералы могут быть размещены в следующий ряд устойчивости в условиях гумидного выветривания: каолинит-гидрослюда-хлорит. Каолинит будет являться аналогом по устойчивости циркону и турмалину. Увеличение доли каолинита в позднеживетское время согласуется со сменой в это время аридного на гумидный тип литоген-

Таблица 2

Минеральный состав глин (отн. %)

Ярус	Подъярус	Гидрослюда	Каолинит	Монтмориллонит	Хлорит
Фаменский	D <sub>3</sub> fm <sub>3</sub>	83	5	2	10
	D <sub>3</sub> fm <sub>2</sub>	80	5	5	10
	D <sub>3</sub> fm <sub>1</sub>	70	10	5	10
Франский	D <sub>3</sub> fr <sub>3</sub>	75	20	2	3
	D <sub>3</sub> fr <sub>2</sub>	50	35	10	5
	D <sub>3</sub> fr <sub>1</sub>	80 75	20 25	- -	- -
Живетский	D <sub>2</sub> bt	70 90	30 10	- -	- -
	D <sub>2</sub> ag	90	8	-	2
Эйфельский	D <sub>2</sub> ng	88	2	5	5
	D <sub>2</sub> pr	85	5	5	5

неза. В отложениях верхнего франа преобладает гидрослюда при широком распространении каолинита, хлорита, и невысоких концентрациях монтмориллонита и смешаннослойных (монтмориллонит-хлорит и монтмориллонит-гидрослюда).

Наиболее существенные изменения состава глин наблюдаются с запада на восток при переходе от более глубоководных к мелководным обстановкам накопления осадков. В этом направлении в породах происходит уменьшение роли гидрослюды и увеличение доли каолинита при постепенном исчезновении хлорита. В южной части Главного девонского поля в разрезе девонских отложений возрастает количество доломита и гипса, содержание хлорита не меняется, а каолинит постепенно исчезает, одновременно появляется смешаннослойный монтмориллонит-хлорит. Таким образом, при переходе от континентальных к морским отложениям меняется минеральный состав глин: для прибрежных фаций характерна гидрослюдисто-каолининовая ассоциация, для морских мелководных фаций типична хлорит-гидрослюдистая или хлорит-каолинит-гидрослюдистая, а для морских – хлорит-гидрослюдисто-монтмориллонитовая ассоциация.

**Общие закономерности формирования минерального состава терригенных пород.** Результаты массовых замеров падения косой слоистости песчаников среднего и позднего девона (рис. 2), а также анализ положения изопакит девонского палеобассейна позволили определить местоположение источников сноса. Результаты исследований свидетельствуют, что в течении среднего и позднего девона существовал в основном один источник сноса – Балтийский щит, расположенный на севере Восточно-Европейской платформы, который поставлял обломочный материал в бассейн осадконакопления; влияние Балтийско-Мазурской антеклизы было незначительным.

Среди обломков пород в составе разновозрастных песчаников, конгломератов и брекчий девона наиболее распространены кварциты, в том числе кварциты малинового цвета (шокшинские), а также микрокварциты, жильный кварц, биотитовые сланцы. О составе петрофонда области сноса можно судить по составу микалитов. Микалиты и слюдосодержащие песчаники сложены коричневым биотитом, темно-зеленым сидерофиллитом и серебристо-зеленым мусковит-фенгитом. Среди пород кристаллического фундамента, содержащих слюды,

на территории Карело-Кольского региона известны амфибол-биотитовые сланцы, комплекс гранито-гнейсов, слагающих куполовидные структуры, и прорывающие эти структуры плагио- и микроклиновые граниты, а также граниты-рапакиви. В биотитовых сланцах широко распространен биотит (флогопит); среди гранито-гнейсов развит высокожелезистый биотит (сидерофиллит); источником мусковит-фенгита могут являться постладожские граниты и граниты-рапакиви с Li-содержащим мусковит-фенгитом. Полученные результаты согласуются с данными В.М. Куршса [1992] о распространении различных типов изверженных и метаморфических пород на территории Финляндии, где поверхность современного эрозионного среза сложена на 53 % гранитоидами и диоритами, 22 % – гнейсами, 25 % – сланцами, амфиболитами, метабазитами. В результате выветривания таких пород обычно и образуется каолинит-гидрослюдистая кора выветривания. Сохранению в породах биотита – минерала, как известно, весьма неустойчивого, возможно объяснить значительной расчлененностью области сноса, откуда выносился материал кор выветривания. Ассоциации тяжелых аллотогенных минералов также свидетельствуют о том, что среди материнских пород значительная роль принадлежала гранитоидам и щелочным породам; роль ультраосновных и основных формаций была менее значительна. На наличие в области сноса пород метаморфического комплекса указывает присутствие среди тяжелых минералов ассоциации ставролит-дистен-турмалин.

Изотопные исследования идиоморфных кристаллов циркона, выделенного из тяжелой фракции песчаников верхнего эйфеля (арукюлаского горизонта), выполненные Л.К. Левским (ИГГД РАН), показали, что его возраст составляет  $1610 \pm 10$  млн лет, что соответствует возрасту гранитов рапакиви, выходы которых известны в пределах Балтийского щита, а характерные удлиненные кристаллы циркона по морфологии сходны с таковыми из гранитов Выборгского массива рапакиви.

В результате рассмотрения минерального состава терригенных отложений Главного девонского поля установлена общая тенденция изменения минеральной ассоциации вверх по разрезу, выраженная в смене олигомиктовых песчаников кварцевыми разностями, накоплении от горизонта к горизонту устойчивых минералов – кварца, циркона, ставролита, турмалина, муско-

вита, каолинита и уменьшении в этом же направлении количества неустойчивых минералов – граната, биотита, сидерофиллита. Закономерное увеличение доли устойчивых минералов вверх по разрезу связано со смесью климатических условий и возрастанием роли химического выветривания в позднедевонское время.

Влияние постседиментационных процессов на ассоциации обломочных минералов проявляется относительно слабо ввиду незначительного погружения осадков. Изменения имеют локальное распространение и выражаются в виде понижения фонового содержания неустойчивых к химическому выветриванию минералов. Более значительные изменения на состав минеральных ассоциаций оказывает внутрислойное растворение в песчаниках, чередующихся с глинами и карбонатными породами. Циркуляцией межпластовых вод можно объяснить повышенное содержание апатита и граната в прослоях, сцементированных на ранних стадиях диагенеза, а также менее зрелая ассоциация карбонатолитов и глин по сравнению с песчаниками и алевролитами. Индикатором этого процесса является ряд минералов титана – ильменит-рутил-лейкоксен-анатаз, в котором первые два являются аллотигенными, а последний – аутигенным образованием. Лейкоксен может быть привнесен из области сноса и может образовываться в процессе лейкоксенизации ильменита. В песчаниках развит кварцевый регенерационный цемент сопряженного типа. В вертикальном разрезе его роль различна: в среднем девоне относительно слабее, в отложениях верхнего девона наблюдается усиление роли регенерационных явлений. Полевые шпаты подвергаются каолинизации, серицитизации. Наиболее интенсивно эти процессы проявлены в гауйском горизонте. Постседиментационные изменения слюд заключаются в гидратации, разбухании в сторону порового пространства, появлении новообразованного каолинита. Для горизонтов с наибольшей степенью развития конформного и регенерационного типов цемента характерно отсутствие карбонатных разностей пород. В случае совместного развития карбонатного и контактово-кварцевого типа цемента для кластических зерен характерна коррозия и возрастание их размеров. Наибольшие изменения гранулометрического и минерального состава первичного кластического материала происходят в случае каолинизации полевых шпатов и слюд с совместной регене-

рацией кварца. Такое сочетание процессов характерно для хорошо проницаемых слюдястых и глинистых песчаников. В результате получается песчаник с повышенным количеством кварца и явно выраженной бимодальной кривой распределения размеров. Карбонатный цемент развивается позднее железистого, он поровый или базально-поровый, оказывает интенсивное коррозионное воздействие на зерна кварца и полевых шпатов. При этом регенерационный кварцевый цемент характерен для песчаников аллювиального типа, а поровый глинисто-карбонатный – для отложений шельфовой области.

Из эпизодически действующих факторов кластогенеза наибольшее влияние на эволюцию минерального состава рассматриваемого разреза оказала вулканическая деятельность. Её минеральные индикаторы: появление примеси вулканического стекла, магнитных и немагнитных шариков, микротектитов, которые практически не испытали воздействия процессов выветривания, а также типоморфизм кластогенных зерен, появление новообразованных полевого шпата (санидина), халцедона, кварца, флюорита (ратовкита), барита, правильных кристаллов биотита, циркона, апатита и смешаннослойного минерала монтмориллонит-гидрослюда. Типоморфным отличием обломков является их полуугловатые, оскольчатые формы, причем характер распределения оскольчатого материала по площади Главного девонского поля неравномерен: по мере удаления от предполагаемых центров количество таких обломков постепенно уменьшается [Казак и др., 2001]. Таким образом, в формировании минеральных ассоциаций девонских терригенных пород района кроме традиционно известного источника сноса – Балтийского щита, принимал участие и локальный источник, поставлявший в ограниченных количествах пирокластический материал. Остроугольные обломки не переносились на большие расстояния, а аккумулировались на месте.

**Палеоландшафтная обстановка.** Область сноса, Балтийский щит, в додевонское и девонское время был приподнят, высота гор могла достигать 2 км [Ясманов, 1985]. Рельеф области сноса был в достаточной степени расчлененным. Расстояние от наиболее приподнятой части области сноса до береговой линии девонского бассейна составляло 100–800 км. Ближе к береговой линии находились выходы кембрийских отложений, которые располагались в области транзита потоков и имели менее



контрастный рельеф, чем основная область денудации – Балтийский щит и не вносили существенный вклад в состав терригенных комплексов девона. Такой вывод можно сделать на основании того, что кварцевые зерна кембрийских песчаников отличаются от девонских более высоким коэффициентом окатанности и сферичности. Таким образом, девонские терригенные толщи формировались, преимущественно, за счет разрушавшихся магматических и метаморфических пород Балтийского щита, а роль продуктов перемыва более древних продуктов осадконакопления была, по-видимому, незначительна. Оценить соотношение процессов механического и химического дезинтегрирования пород можно на основании косвенных наблюдений. Так, центральные блоки щита, начиная с протерозоя, испытывали интенсивное воздымание, вследствие чего процессы химического выветривания были подавлены. Происходило разрушение и быстрое захоронение обломочного материала. Останцы девонских пород, сохранившихся на Кольском полуострове и в Норвегии, представлены грубозернистыми слабо выветрелыми разностями кластолитов. На территории юго-западной Норвегии в основании нижне-среднедевонских отложений залегают мощные (до сотни метров) слои конгломератов и брекчий, а подстилающие породы не обнаруживают следов химического выветривания [Куршс, 1992].

Девонский палеобассейн характеризуется отчетливо выраженной латеральной зональностью, в котором при продвижении с севера на юг наблюдается смена генетических типов осадков от аллювиальных, прибрежно-морских до морских. О широком распространении прибрежно-морских условий седиментогенеза свидетельствуют текстуры пород, находки замковых брахиопод и фосфоритовых конкреций. Динамическая обстановка осадконакопления в бассейне характеризуется интенсивной волновой деятельностью, сильными придонными течениями. Потоки, сносившие обломочный материал, имели значительную силу, о чем можно судить по размеру мультдобразных серий (размером 10–20 м) в песчаных отложениях.

**Палеоклиматическая обстановка.** Территория северо-запада Русской платформы, по данным Н.М. Страхова [1963], в среднем девоне находилась вблизи экватора в зоне аридного климата. Для отложений аридной зоны характерны пестроцветные окраски, разнообразный состав обломков, часто без признаков химичес-

кого выветривания, хорошая сохранность темноцветных минералов, широкое развитие аутигенной доломитизации, сапропелевый состав захороненного органического вещества.

Во второй половине живетского века произошла смена аридного типа литогенеза на гумидный. Усиление влияния химического выветривания в позднедевонское время фиксируется по результатам минералогических исследований: в составе кластолитов уменьшается количество полевых шпатов, биотита и сидерофиллита, присутствующих в легкой фракции, а в ассоциации тяжелых минералов – граната; увеличивается доля каолинита в глинах. Высокая кварцевость буртниеких, гауйских и аматских песков при низкой окатанности обломочных зерен, также свидетельствует о существенных масштабах химического выветривания. Отложения, сформировавшиеся в зоне гумидного климата, имеют яркие, в целом, разнообразные окраски; характеризуются широким проявлением конкреционных, оолитовых структур, относительно однообразным составом обломков, несущих следы химического выветривания, отсутствием темноцветных минералов, развитием аутигенных каолинита, арагонита и кальцита; захороненное органическое вещество имеет гумусовый состав. Зона карбонатного осадконакопления в зависимости от массы привнесенного кластического материала при гумидном типе литогенеза располагалась на значительном расстоянии от берега. Осаждению карбонатного материала препятствовала низкая соленость воды в бассейне. Поэтому частично карбонатный материал представлен в виде наложенной постседиментационной минерализации. Кроме того, выпадение гидроксидов железа в виде цемента песчаников и алевролитов, по-видимому, происходило в этой же зоне смешения пресной и морской воды. Гидрохимический фактор оказывал существенное влияние на количество новообразованного глауконита, который формировался за счет распада обломочных зерен биотита, роговой обманки, пироксенов в щелочных условиях. В девонских отложениях небольшое количество глауконита наблюдается в отложениях карбонатного состава.

В распределении фосфоритов на территории Главного девонского поля намечается закономерная связь со степенью выветривания обломочного материала, поступавшего в бассейн осадконакопления. Характер процессов химического выветривания в области сноса оп-

ределил тот факт, что в светлоокрашенных, высокозрелых, преимущественно песчаных горизонтах пород фосфориты и фосфатные остатки организмов отсутствуют. По-видимому, кислотность вод палеопотоков, формировавшихся преимущественно за счет вод, дренировавших каолинит-гидрослюдистые коры выветривания, не только препятствовала хемогенному фосфатонакоплению, но и способствовала растворению фосфатных остатков организмов. Фосфатонакопление осуществлялось в относительно более щелочных условиях, о возникновении которых можно судить по присутствию в отдельных горизонтах красноцветов примеси карбонатного материала. Кроме того, в верхнедевонских отложениях наблюдается обилие детрита наземной флоры, что также указывает на увеличение влажности климата в условиях гумидного типа литогенеза.

Палеоклиматические реконструкции были выполнены на основании данных о макро- и микрокомпонентном составе глин и цемента песчаников. Для этой цели из пород была выделена фракция <0,002 мм и выполнено определение петрогенных оксидов методом рентгено-спектрального силикатного анализа, а макрокомпонентный состав был определен рентгено-спектральным методом с индуктивно-связанной плазмой. Как известно, глинистое вещество несет в своем составе важную информацию о физико-химических процессах, протекавших при формировании осадков. Е.П. Акульшиной разработан метод параметрического описания глинистого вещества, позволяющий количественно охарактеризовать процессы осадконакопления с помощью ряда геохимических параметров [Акульшина, 1971]. Особенности поведения ряда петрогенных оксидов и отдельных химических элементов позволяют использовать их соотношение в глинистом веществе для выявления характера процессов на водосборной суше и в бассейне седиментации. Химическая дифференциация глинистого вещества (зрелость) определяется относительным увеличением содержания стойких при выветривании компонентов и уменьшением нестойких. Согласно Е.П. Акульшиной, величина отношения  $Al_2O_3/Na_2O$  менее 30 характеризует слабую, 30–60 – среднюю, 60–150 – высокую, и более 150 – очень высокую интенсивность химического выветривания. Кроме того, существует зависимость отношения  $Al_2O_3/TiO_2$  в глинистых минералах от физико-химической среды (рН) выветривания.

При кислых условиях (рН<6) отношение  $Al_2O_3/TiO_2$  менее 20, при рН=6–7 – от 20 до 30, при рН>8 – более 30. Ввиду того, что кислые условия выветривания соответствуют гумидному климату, щелочные – аридному, отношение  $Al_2O_3/TiO_2$  менее 20 будет являться индикатором гумидного климата, более 30 – аридного, от 20 до 30 – переходного (семиаридного).

На территории Главного девонского поля отношение  $Al_2O_3/TiO_2$  в глинах меняется в вертикальном разрезе отложений. Для среднедевонского бассейна эта величина колеблется в интервале 20–22, что соответствует переходным (семиаридным) условиям выветривания при рН=6–7. Отложения позднедевонского времени характеризуются величиной этого отношения 16,5–19,5, что отвечает гумидному выветриванию при рН<6. Отношение  $Al_2O_3/Na_2O$  для времени среднего девона колеблется в интервале 60–70, что соответствует средней степени химического выветривания; в верхнедевонское время интенсивность химического выветривания по величине этого отношения характеризуется как высокая и составляет 75–120 относительных единиц.

Оценить режим кислотности-щелочности в бассейне осадконакопления возможно на основании анализа минеральных ассоциаций отложений различных фациальных зон. Континентальные обстановки осадконакопления характеризуются развитием таких аутигенных минералов как гетит, каолинит, опал; среди аллотигенного материала присутствуют обычно крупные обломки. Для лагунных фаций типично преобладание в осадках гидрослюды, хлорита, развитие глауконита, кальцита, арагонита; аллотигенный материал представлен относительно мелкими обломками. Морские фации характеризуются присутствием в составе глин монтморрилонита, смешаннослойных минералов (гидрослюда-монтморрилонит), а также широким развитием минералов фосфора, пирит-марказита, сохранившегося пеплового материала.

Относительная щелочность-кислотность седиментогенеза в различных климатических зонах может быть охарактеризована соотношением редкоземельных элементов Се/У в составе глинистого цемента песчаников. В связи с тем, что Се обладает наибольшей подвижностью в щелочных условиях, а У – в кислых [Балашов, 1976], наиболее высокие значения Се/У отношения (4–6) в глинистом цементе песчаников Главного девонского поля и, соответствен-

но, наиболее щелочные условия седиментогенеза характерны для франского времени; отложение в прибрежно-морских и континентальных обстановках происходило в относительно более кислотных условиях, которые характеризуются величиной этого отношения 4–3 и 2–3, соответственно.

По составу аутигенных минералов возможно оценить относительный **окислительно-восстановительный** потенциал среды седиментации. Широкое развитие гетита, гематита, гидрогетита, лимонита свидетельствует об окислительных условиях седиментогенеза; появление в осадках пирита, марказита, сульфидов меди, свинца, цинка, фосфатов характеризуют относительно восстановительные обстановки осадконакопления. В целом для Главного девонского поля характерны окислительные и переходные (окислительно-восстановительные) условия седиментогенеза с развитием восстановительных условий на локальных участках территории.

Анализ режима **солености** палеобассейна можно провести на основании фаунистических и геохимических критериев. Известно [Тихомиров, 1995], что в случае пресноводных условий (соленость  $< 10 \text{ ‰}$ ) фауна бедна видами, но многочисленна, среди аутигенных минералов преобладает арагонит. Соленовато-водная среда ( $10\text{--}20 \text{ ‰}$ ) характеризуется разнообразием видов и их многочисленностью, а также появлением в составе аутигенных минералов доломита, кальцита. При содержании солей  $> 20 \text{ ‰}$  фаунистические остатки бедны, а среди аутигенных минералов распространены соли. Таким образом, на основании косвенных данных девонский палеобассейн может быть охарактеризован как бассейн нормальной солености. Для раковинного вещества брахиопод *Cyrtospirifer* из рдейской и бурегской свит Л.А. Дорофеевой проведен анализ соотношения Са и Mg и реконструирована температура придонных вод в палеобассейне. Установлено, что воды обладали нормальной соленостью и среднегодовой температурой близкой к  $19\text{--}20$  градусам [Вербицкий и др., 2000]. Данные Ю.П. Казанского [1977] о газово-солевом составе вод девонского палеобассейна свидетельствуют о преобладании катионов Na, Mg и газов  $N_2$ ,  $O_2$ ,  $CO_2$  в их составе.

**Биогенные процессы** играют важную роль в преобразовании геохимического режима седиментации в девонском бассейне. Как известно [Ньюман и др., 1961; Неручев, 1982; и др.],

макро- и микроэлементный состав биогенной составляющей геологической среды в значительной мере отражает геохимический режим существования биотопов, а биогенные процессы накладывают отпечаток на преобразование геохимического режима седиментации. В ископаемых остатках устанавливается широкий спектр химических элементов, концентрация которых определяется составом и структурно-текстурными характеристиками первичного минерального вещества костных тканей, а также особенностями палеоклимата, химизмом и фациальными условиями среды обитания организмов и захоронения их остатков.

Наиболее широко распространены в отложениях девона остатки панцирных рыб *Asterolepis*, *Pycnosteus*, *Pterichthys*, *Homostius*, которые имеют хорошую сохранность и приурочены к глинистым элементам ритмов, характерным для углублений дна палеобассейна. В песчаных горизонтах, сформированных на небольших глубинах, со значительной подвижностью придонных вод обнаруживаются лишь скопления разрозненных обломков панцирей и кости скелета. Чаще всего встречаются части пластин панциря (до 20 см), плавники (до 12 см), кости (до 5 см), зубы (до 3 см).

Основными минеральными компонентами костных тканей современных и ископаемых организмов являются кристаллические, нестехиометрические по составу, апатиты, содержащие карбонат-ионы (карбонатапатиты) [Elliott, 1994]. В структуре биогенных апатитов карбонат-ионы замещают, как правило, группы  $PO_4$ , что сопровождается уменьшением параметра *a* элементарной ячейки апатита и некоторым увеличением параметра *c*. Биогенные карбонатапатиты содержат 3–5 мас. %  $CO_2$  и, в зависимости от содержания фтора, различаются по параметрам их элементарных ячеек [Кольцов и др., 2000]. Общеизвестным является тот факт, что содержание фтора и степень окристаллизованности биогенного апатита возрастают с увеличением возраста организмов или в процессе их фоссилизации. По значениям параметров элементарной ячейки, варьирующих в пределах:  $a = 9,358(2)\text{--}9,383(1)$  и  $c = 6,885(1)\text{--}6,895(2)$  Å, апатиты всех исследованных образцов занимают промежуточное положение между эталонным фторапатитом и апатитами фосфоритов. В образцах присутствует молекулярная вода и незначительная примесь органического вещества. Содержание  $CO_2$  в апатите исследованных

нами образцов составляет 2,0–2,5 мас. %, фтора – 2,6–2,8 мас. %. Типовая кристаллохимическая формула апатита костного детрита панцирных рыб из девонских отложений имеет вид:  $M^{2+}_{10-3/2y-z} M^+_x M^{3+}_y (PO_4)_{6-z} (CO_3)_{z/2} (F_{2-(z-x)} H_2O_{z-x})$ , где  $M^{2+}$  – Ca, Mg, Mn, Ba, Sr;  $M^+$  – Na, K;  $M^{3+}$  – Y, Ln.

Основные различия в химическом составе костной ткани образцов были установлены в содержании редкоземельных элементов (РЗЭ) от 0,8 до 4 мас. % и фтора (1,3–2,9 мас. %). В связи с этим фактом были предприняты попытки поиска собственных фаз РЗЭ с помощью метода сканирующей электронной микроскопии. Электронно-микроскопические исследования [Панова и др., 2001] свидетельствуют о высокой пористости костной ткани, наличии вытянутых каналов и полостей различной величины и формы. Изучение концентрически-зональных трубчатых полостей кости в разрезах вкрест удлинения выявило неоднородности их состава. В непосредственной близости от канала отношения Ca/P, Fe/Ca и Y/Ca в костной ткани ниже, чем в зонах, удаленных от канальных полостей, а отношение Nd/Ca выше. По результатам исследования не было обнаружено минеральных фаз этих элементов, что предполагает изоморфное их вхождение в апатит костной ткани.

Для выявления возможного накопления РЗЭ в костной ткани при диагенезе были проанализированы костные остатки и вмещающие их породы [Панова, Иванова, 2001]. Концентрация РЗЭ в исследованных образцах костного детрита на один-два порядка выше, чем во вмещающих остатках песчаниках, глинах и известняках. Рассчитанные коэффициенты концентрации химических элементов для соответствующих пар проб (КК–содержание в детрите/содержание в породе) имеют различные значения для проб фосфоритов захороненных в песчанике, глине, известняке. Кроме того, уровень накопления РЗЭ в детрите выше, чем в фосфоритах, найденных в этих горизонтах.

По-видимому, накопление РЗЭ в апатите костей происходило из морской воды при жизни рыб, так как не обнаружено собственных фаз РЗЭ в костном детрите при их достаточно высоких концентрациях. Кроме того, фосфоритовые конкреции, распространенные в девонских отложениях северо-запада Русской платформы, накапливают РЗЭ, но в меньших количествах, чем детрит фосфоритов, и распределение этой группы химических элементов в них имеет иной характер. Корреляция содержаний РЗЭ в кос-

тях современных рыб с их содержанием в морской воде, отмеченная Д. Хаберманном с соавторами [Habermann et al., 2000], может являться достаточно хорошим подтверждением вывода о накоплении РЗЭ при жизни рыб и позволяет предположить, что содержания РЗЭ в костном детрите являются отражением их содержания в воде палеобассейна.

Таким образом, выполненное автором изучение структур, текстур и минерального состава терригенных отложений девона на территории северо-запада Русской платформы с использованием современных методов исследования позволяет сделать следующие выводы.

Основной особенностью формирования минерального состава терригенных пород Главного девонского поля является существование принципиально одного источника сноса обломочного материала в течении среднего и позднего девона – Балтийского щита, расположенного на севере Русской платформы. Об этом свидетельствуют результаты массовых замеров падения кривой слоистости песчаников, анализ положения изопакит девонских отложений на этой территории, состав каркаса песчаников и конгломератов, ассоциации тяжелых минералов, состав микалитов и глин, а также изотопный возраст циркона.

Выявлена общая тенденция изменения минеральной ассоциации вверх по разрезу, выраженной в накоплении от горизонта к горизонту устойчивых минералов – кварца, циркона, ставролита, турмалина, мусковита, каолинита и уменьшении в этом же направлении количества неустойчивых минералов – граната, биотита, сидерофиллита. Закономерное увеличение доли устойчивых минералов вверх по разрезу связано со сменой климатических условий и возрастанием роли химического выветривания в позднедевонское время.

Из эпизодически действующих факторов кластогенеза наибольшее влияние на эволюцию минерального состава рассматриваемого разреза оказала вулканическая деятельность, проявляющаяся в появлении в терригенных породах примеси вулканического стекла, магнитных и немагнитных шариков, микротектитов, возникновении новообразованных полевого шпата (санидина), халцедона, кварца, флюорита (ратовкита), барита, правильных кристаллов биотита, циркона, апатита и смешаннослойного минерала (монтмориллонит-гидрослода). Типоморфным отличием обломков является преобладание полугловатых, оскольчатых форм.

Девонский палеобассейн характеризовался отчетливо выраженной латеральной зональностью, в котором при продвижении с севера на юг наблюдается смена генетических типов осадков от аллювиальных, прибрежно-морских до морских. Формирование девонского палеобассейна можно разделить на три крупных возрастных этапа: среднедевонский, франкий и фаменский. Для каждого из них характерна вытянутость в северо-восточном направлении, развитие относительно более глубоководных фаций в юго-западном окончании, а более мелководных – в северо-восточной части.

Палеоклиматическая обстановка, оцененная на основании данных о макро- и микрокомпонентном составе глин и цемента песчаников с использованием геохимических коэффициентов Е.П. Акульшиной и Ю.А. Балашова, характеризуется сменой семиаридного климата среднедевонского времени на гумидный в позднедевонское время.

Солоновато-водная среда (10–20‰) способствовала развитию широкого разнообразия видов, а среднегодовая температура в девонском палеобассейне составляла 19–20 °С.

Преобразование геохимического режима седиментации происходило при активном участии биогенных процессов в девонском бассейне. Накопление РЗЭ в апатите костной ткани фосиллий происходило при жизни рыб из морской воды, что является отражением их содержания в воде палеобассейна.

### Список литературы

- Акульшина Е.П.* Вещественный состав глинистой части пород палеозоя Сибирской и Русской платформ и его эволюция. Новосибирск: Наука, 1971. 150 с.
- Балашов Ю.А.* Геохимия редкоземельных элементов. М.: Наука, 1976. 267 с.
- Бергер М.Г.* Терригенная минералогия. М.: Недра, 1986. 227 с.
- Вербицкий В.Р., Кямря В.В., Саванин В.В. и др.* Объяснительная записка к государственной геологической карте масштаба 1:200 000 (Ильменская серия). СПб.: ВСЕГЕИ, 2000. 103 с.
- Глинистые минералы как показатель условий литогенеза. Новосибирск: Наука, 1976. 189 с.
- Казак А.П., Панова Е.Г., Скибина Л.Б., Вербицкий В.Р.* Минералогический метод выявления эндогенно-эксплозивных признаков алмазности северо-запада Русской платформы // Алмазы и алмазность Тимано-Уральского региона. Сыктывкар: Геопринт, 2001. С. 123–124.
- Казанский Ю.П.* Об изменении газового и солевого состава океанских вод // Геология и геофизика. 1977. № 8. С. 56–66.
- Кольцов А.Б., Франк-Каменецкая О.В., Зорина М.Л. и др.* Сложный изоморфизм в синтетических карбонатанатах // Записки ВМО. 2000. № 2. С. 109–117.
- Куриш К.С.* Терригенное осадконакопление на Главном девонском поле. Рига: Зинатне, 1992. 323 с.
- Неручев С.Г.* Уран и жизнь в истории Земли. Л.: Недра, 1982. 123 с.
- Ньюман У., Ньюман М.* Минеральный обмен кости. М.: Мир, 1961. 154 с.
- Панова Е.Г., Иванова Т.И.* Состав костного детрита панцирных девонских рыб северо-запада Русской платформы. СПб.: МК ГШВ, 2001. С. 15–27.
- Панова Е.Г., Иванова Т.И., Франк-Каменецкая О.В. и др.* Апатит в костном детрите панцирных девонских рыб северо-запада Русской платформы // Записки ВМО. 2001. № 4. С. 97–107.
- Панова Е.Г., Шванов В.Н.* Микалиты среднедевонских пестроцветов района р. Оредеж (Ленинградской области) // Литология и полез. ископаемые. 2000. № 3. С. 331–336.
- Родионова Г.Д., Умнова В.Т.* Колебания уровня девонского моря в Московском бассейне // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1997. Т. 5. № 2. С. 21–28.
- Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов. СПб.: Недра, 1998. 352 с.
- Страхов Н.М.* Теория литогенеза. М.: Наука, 1963. 226 с.
- Тихомиров С.В.* Этапы осадконакопления девона Русской платформы. М.: Наука, 1995. 332 с.
- Ясманов Н.А.* Популярная палеогеография. М.: Недра, 1985. 134 с.
- Elliott J.C.* Structure and chemistry of the apatites and other calcium orthophosphates. Amsterdam: Elsevier, 1994. 389 p.
- Habermann D., Goette T., Meijer J. et. al.* High resolution rare-earth elements analyses of natural apatite and its application in geo-sciences: Combined microPIXE, quantitative CL spectroscopy and electron spin resonance analyses // Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B. 2000. V. 161–163. P. 846–851.

Рецензент доктор геол.-мин. наук А.В. Маслов