

ВЕРХНИЙ ВЕНД ВОСТОКА, СЕВЕРО-ВОСТОКА И СЕВЕРА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ: ПРОЦЕССЫ ОСАДКОНАКОПЛЕНИЯ И ЭВОЛЮЦИЯ БИОТЫ

© 2018 г. А. В. Маслов^{1,2}, В. Н. Подковыров³, Д. В. Гражданкин⁴,
А. В. Колесников⁴

¹Институт геологии и геохимии УрО РАН, 620016, г. Екатеринбург, ул. Акад. Вонсовского, 15,
e-mail: amas2004@mail.ru

²Институт геологии УФИЦ РАН, 450077, г. Уфа, ул. К. Маркса, 16/2

³Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, 199034, г. Санкт-Петербург,
наб. Адм. Макарова, 2, e-mail: vpodk@mail.ru

⁴Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН, 630090, г. Новосибирск,
пр-т Акад. Коптюга, 3, e-mails: fbоеоиа@mac.com, ppp853@gmail.com

Поступила в редакцию 04.05.2017 г., принята к печати 26.09.2017 г.

Предмет исследования. На основе анализа значений ряда литогеохимических индикаторов среды и обстановок осадконакопления, свойственных глинистым породам редкинского, беломорского и котлинского региоарусов верхнего венда востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы (ВЕП) сделан вывод об отсутствии каких-либо принципиальных их вариаций на указанной территории на протяжении всего позднего венда. Вместе с тем в это время можно проследить некоторые крупные этапы макроэволюционных и макроэкологических преобразований биоты. Так, на редкинском этапе в низкоэнергетических обстановках внутреннего шельфа формируется авалонская экологическая ассоциация макроорганизмов (фрондоморфы и вендобиионты), появляются палеопасцхниды. Беломорский этап характеризовался диверсификацией фрондоморфных организмов и миграцией вендобиионтов в обстановки с относительно более высокой энергией среды, широкой экспансией и богатым видовым разнообразием палеопасцхнид, а также появлением трибрахиоморф и билатераломорф. В котлинское время произошло резкое сокращение таксономического разнообразия в сообществах эдиакарского типа (котлинский кризис), что рассматривается как следствие вытеснения вендобиионтов, трибрахиоморф и билатераломорф животными, а в каналах распределительных систем этого этапа продолжала эволюционировать намская ассоциация, демонстрирующая относительно широкое распространение палеопасцхнид и микробиальных сообществ арумбернеморфного типа. На проанализированном нами материале видно, что указанные преобразования не контролировались крупными факторами и обстановками осадконакопления (палеогеодинамика, палеоклимат, состав субстрата в областях осадконакопления, вулканическая деятельность и др.), а являлись, скорее всего, внутрисистемными экологическими перестройками. Таким образом, главная причина котлинского кризиса – биологическая эволюция, проявившаяся вне зависимости от изменения (или сохранности) факторов внешней среды.

Материалы и методы. В рамках настоящего исследования использованы данные о содержании основных породообразующих оксидов, а также редких и рассеянных элементов в тонкозернистых алюмосиликокластических породах (глинистых сланцах, аргиллитах и алевроаргиллитах), образцы которых отобраны из естественных разрезов ашинской серии Южного Урала, сыльвицкой серии Среднего Урала, керн скважин Кельтминская-1 (Вычегодский прогиб) и Тучкино-1000 (Юго-восточное Беломорье). Привлечены также сведения о химическом составе глин старорусской и василоостровской свит южного склона Балтийского щита. *Результаты.* Указанные данные позволили с той или иной степенью достоверности судить об особенностях рециклинга поступающего в различные районы поздневендского Мезенского бассейна осадочного материала, составе пород в областях размыва и, соответственно, составе субстрата в разных сегментах бассейна, на котором формировались микробиальные маты и обитали многоклеточные организмы, а также о палеогеодинамических обстановках и ряде других факторов внешней среды (среды осадконакопления), на фоне которых происходило формирование и развитие различных групп мягкотелых организмов.

Ключевые слова: верхний венд, Восточно-Европейская платформа, котлинский кризис, литогеохимические особенности глинистых пород

Для цитирования: Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гражданкин Д.В., Колесников А.В. (2018) Верхний венд востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы: процессы осадконакопления и эволюция биоты. *Литосфера*, **18**(4), 520-542. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-520-542

For citation: Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Grazhdankin D.V., Kolesnikov A.V. (2018) Upper Vendian in the east, northeast and north of East European Platform: Depositional processes and biotic evolution. *Litosfera*, **18**(4), 520-542. DOI: 10.24930/1681-9004-2018-18-4-520-542

UPPER VENDIAN IN THE EAST, NORTHEAST AND NORTH OF EAST EUROPEAN PLATFORM: DEPOSITIONAL PROCESSES AND BIOTIC EVOLUTION

Andrey V. Maslov^{1,2}, Viktor N. Podkovyrov³, Dmitry V. Grazhdankin⁴,
Anton V. Kolesnikov⁴

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, Urals Branch of RAS, 15 Akad. Vonsovsky st.,
Ekaterinburg, 620016, Russia, e-mail: amas2004@mail.ru

²Institute of Geology – Subdivision of the Ufa Federal Research Centre, RAS, 16/2 K. Marx st.,
Ufa, 450007, Russia

³Institute of Precambrian Geology and Geochronology RAS, 2 Adm. Makarova nab.,
St. Petersburg, 199034, Russia, e-mail: vpodk@mail.ru

⁴A.A. Trofimuk Institute of Petroleum Geology and Geophysics, Siberian Branch of RAS, 3 Akad. Koptug av.,
Novosibirsk, 630090, Russia, e-mails: f6oeoua@mac.com, ppp853@gmail.com

Received 04.05.2017, accepted 26.09.2017

Subject. Analysis of litho-geochemical proxies in the Upper Vendian mudstones reveals little if any variation in depositional environment for the Redkinian, Belomorian and Kotlinian regional stages in the east, northeast and north of East European Platform. The coeval macrobiota, in contrast, demonstrates significant macroevolutionary and macroecological transformations. Thus, the Avalon-type ecological association consisting of frondomorphs and vendobionts evolved in low-energy inner shelf during the Redkinian, the Belomorian Stage is characterised by diversification of frondomorphs, migration of vendobionts into relatively high-energy depositional settings (shoreface and prodelta), and emergence of tribrachiomorphs and bilateralomorphs, where as the Kotlinian Stage is marked by a sharp decline in taxonomic diversity of soft-bodied organisms (the Kotlinian Crisis). We don't know to what degree, if at all, depositional parameters as palaeogeodynamics, palaeoclimate, sediment composition, volcanic activity influenced the Ediacaran biota, but these agents were not responsible for the above mentioned biotic transformations. **Materials and methods.** We suggest that intrinsic factors such as ecological interactions could be the primary trigger of the Kotlinian crisis. This conclusion has been reached based on the study of composition of major rock-forming oxides, rare- and trace elements in fine-grained aluminosiliciclastic rocks (argillites, shales and silt-rich mudstones). Geological samples were collected in outcrops of the Asha Group of South Urals and Sylvitsa Group of Central Urals, as well as from the drill core of the Keltma-1 (Vychegda Trough) and Tuchkino-1000 (Southeast White Sea area) boreholes. We also used the data on chemical composition of mudstones from the Staraya Russa and Vasil'evsky Ostrov formations from the southern slope of the Baltic Shield. **Results.** With this information in hand we could assess, with varying degree of confidence, such parameters as a degree of recycling of the material supplied into the late Vendian Mezen Basin; sediment provenance; composition of the substrate that microbial mats and soft-bodied organisms lived on in different parts of the basin; and palaeogeodynamic environment at the time when different groups of soft-bodied organisms were emerging.

Keywords: Upper Vendian, East European platform, Kotlinian crisis, mudstone litho-geochemistry

Acknowledgments

The authors are sincerely grateful to the anonymous reviewer, a few, but extremely clear remarks and advice of which contributed to the improvement of the text of the manuscript. Illustrations to the article were made by N.S. Glushkova and A.V. Kolesnikov.

This work was financially supported by Russian Foundation for Basic Research (projects 15-05-01512, 14-05-00415, 16-35-00320).

ВВЕДЕНИЕ

Венд (600–540(?) млн лет) представляет собой один из важнейших этапов развития биосферы [Соколов, 1980, 1995, 2011; Вендская..., 1985; Fedonkin et al., 2007; Гражданкин, Маслов, 2015]. Именно с вендом связано начало широкого распространения образующих сложные биогеоценозы мягкотелых беспозвоночных животных (эдиакарская биота). Это событие произошло около 580 млн лет назад, когда в обстановках внутренних шельфовых морей появились группы рангеоморфных и фрондоморфных организмов авалонского типа (авалонская биота). Через 20 млн лет на шельфах и в обстановках проделта с высокой волновой и потоковой

активностью возникли сообщества беломорского (дикионсиниеморфы, трибрахиоморфы и билатераломорфы), а также намибийского типов (петалонамы и рангеоморфы), обитавшие в пределах дельтовых равнин с высокой гидродинамической активностью [Grazhdankin, 2014]. Около 550 млн лет разнообразие эдиакарской биоты резко снизилось, а к началу кембрия мягкотелые организмы исчезли из ископаемой летописи.

Первым на отсутствие биостратиграфического заполнения в интервале приблизительно от 550 до 540 млн лет обратил внимание Мартин Бразье [Brasier, 1992a], использовавший для него термин “котлинский кризис”. По его мнению, котлинский кризис мог быть первым и самым важным звеном

в цепочке событий, приведших к “кембрийскому взрыву биоразнообразия”. В качестве характерных признаков кризиса рассматривается внезапное исчезновение мягкотелых организмов групп трибрахиоморф, дикинсониморф и билатераломорф одновременно с широкой экспансией организмов группы палеопасихнид, демонстрирующих оппортунистическую стратегию¹, за которой последовали появление биологически контролируемой минерализации и роющих организмов [Grazhdankin, 2014].

Предложено несколько сценариев событий, предшествовавших и в той или иной степени обусловивших котлинский кризис. Первым явился “питательно-стимулирующий сценарий” [Brasier, 1992б; Brasier, Lindsay, 2001], в соответствии с которым кризис был вызван ростом количества питательных веществ в относительно глубоководных морских условиях на фоне глобальной морской регрессии (“котлинская регрессия”). Последовавшая затем трансгрессия привела к поступлению питательных компонентов на мелководные шельфы, что вызвало кардинальное изменение экосистем и быструю эволюцию многоклеточных организмов. Альтернативой этому сценарию являются представления о том, что резкое уменьшение биоразнообразия мягкотелых организмов в конце венда было следствием возникновения и прогрессивной эволюции эуметазой (настоящих многоклеточных животных, обладавших интегрированной системой тканей и органов движения, захвата пищи и пищеварения со сложным моторно-нейронным механизмом контроля), которые отличались способностями усиливать круговорот питательных веществ и элементов в экосистемах, форсировать рост биоразнообразия, наращивание биомассы и укрупнение размеров организмов [Butterfield, 2007, 2011; Grazhdankin, 2014; Lenton et al., 2014; Darroch et al., 2015]. В рамках этой концепции биогеохимические пертурбации являются не причиной, а следствием биотической эволюции.

В свете сказанного в задачу наших исследований входил анализ ряда литогеохимических характеристик тонкозернистых обломочных (глинистых) пород различных регионарусов верхнего венда, которые позволяют в той или иной мере судить об общих обстановках накопления (палеоклимат,

¹ Палеопасихниды явились одной из немногих групп венд-эдиакарских организмов, переживших массовое вымирание (кризис) в начале котлинского времени. Более того, они сохраняли большую часть видового разнообразия до конца котлинского времени, демонстрируя тем самым оппортунистическую по отношению к другим группам экологическую стратегию, которая заключалась в возможной регуляции численности популяций, при которой ключевую роль играла способность к быстрому развитию и расселению в условиях низкой конкуренции.

палеогеодинамика, состав пород на палеоводосборах и, соответственно, состав субстрата/донных отложений и др.) осадочных образований. Объектами исследований выступали глинистые породы ашинской, сыльвицкой и валдайской серий Южного и Среднего Урала, Вычегодского прогиба, Юго-восточного Беломорья и Лужско-Ладужской моноклинали (юго-восточный и южный склоны Балтийского щита соответственно) (рис. 1).

Методические основы такого рода работ достаточно хорошо освещены как в зарубежной [Maynard et al., 1982; Nesbitt, Young, 1982; Bhatia, 1983; Taylor, McLennan, 1985; Roser, Korsch, 1986, 1988; Rollinson, 1994; Cullers, 2002; Geochemistry..., 2003; Turgeon, Brumsack, 2006; и др.], так и в отечественной литературе [Юдович, Кетрис, 2000; Интерпретация..., 2001; Маслов, 2005; и др.]. Следует заметить, что в настоящее время суждения об обстановках накопления тех или иных осадочных последовательностей, в том числе и докембрийских, все чаще основываются на данных, полученных более тонкими инструментами, например, при исследова-

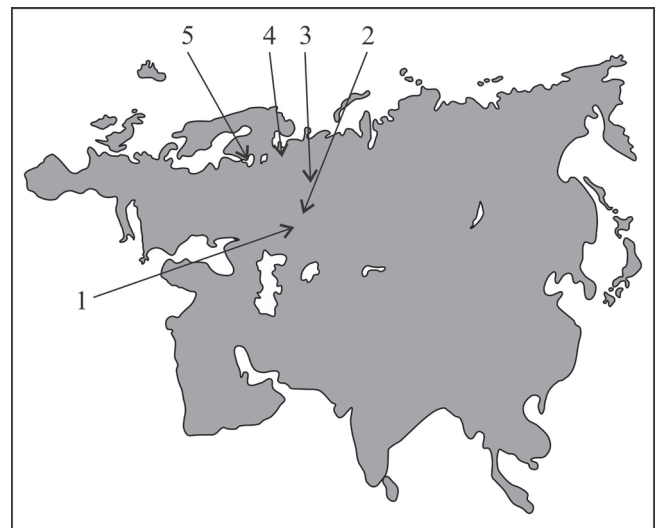


Рис. 1. Положение регионов, рассматриваемых в настоящей работе.

1 – Южный Урал (Башкирский мегантиклинорий); 2 – Средний Урал (Кваркушко-Каменногорский мегантиклинорий); 3 – Вычегодский прогиб (южная часть Мезенской впадины); 4 – юго-восточный склон Балтийского щита (Юго-восточное Беломорье); 5 – южный склон Балтийского щита (Лужско-Ладужская моноклинал).

Fig. 1. Position of the studied regions.

1 – South Urals (Bashkirian megantiklinorium); 2 – Central Urals (Kvarkush-Kamennogorsk megantiklinorium); 3 – Vychegdga Trough (southern part of the Mezen Syncline); 4 – southeastern slope of the Baltic Shield (Southeast White Sea area); 5 – southern slope of the Baltic Shield (Luga-Ladoga Monocline).

нии вариаций изотопного состава углерода, стронция, серы, железа и ряда других элементов, анализе распределения в осадочных породах элементов, чувствительных к изменению окислительно-восстановительных обстановок в придонных слоях бассейнов осадконакопления (элементы группы RST) и т. п. [Schroder, Grotzinger, 2007; Li et al., 2010; Johnston et al., 2012; Sahoo et al., 2012; Guan et al., 2014; Lenton et al., 2014], хотя потенциал подходов, на которых базируется настоящая работа, на наш взгляд, еще не исчерпан.

В позднем венде на восточной и северо-восточной (в современных координатах) окраине ВЕП перед фронтом Канино-Тиманского складчатонадвигового пояса, существовал протяженный относительно мелководный предгорный Мезенский палеобассейн, в котором происходило накопление туфогенно-терригенных осадочных последовательностей валдайской серии [Аксенов, 1985; Grazhdankin, 2004; Маслов и др., 2008]. Временами море проникало и в пределы Московской синеклизы [Вендская..., 1985; и др.].

Сходство палеонтологических комплексов остатков в разрезах верхнего венда по периферии Балтийского щита, Вычегодского прогиба и Среднего Урала указывает на существование в это время устойчивых биогеографических связей в пределах всего палеобассейна, что подтверждается и находками представителей ископаемой беломорской биоты в керне скважин Мезенской синеклизы [Гражданкин и др., 2005, 2007]. Отложения ашинской серии Башкирского мегантиклинория характеризуются, по данным [Kolesnikov et al., 2015], сравнительно молодым возрастом; они соответствуют только котлинскому региоярсу [Grazhdankin, 2014; Гражданкин, Маслов, 2015] (рис. 2). Имеющиеся в настоящее время материалы позволяют предполагать, что отложения ашинской серии накопились в пределах внутриконтинентального залива, ограниченного с запада Волго-Камским блоком, с севера – аллювиальной системой предгорного бассейна Тиманид, с востока – собственно Тиманским орогеном, а на юге – сообщавшимся с открытым морским бассейном.

РЕГИОНАЛЬНЫЕ ЯРУСЫ ВЕРХНЕГО ВЕНДА ВОСТОЧНО-ЕВРОПЕЙСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

В настоящее время верхний венд может быть расчленен на редкинский, беломорский и котлинский региоярсы, прототипами которых служат региональные ярусы ВЕП [Гражданкин, Маслов, 2015].

Редкинский региоярус

На Среднем Урале к редкинскому региоярсу принадлежат керноская, старопечнинская и перевалокская свиты [Гражданкин, Маслов, 2015]. Кер-

ноская свита (200–1200 м) объединяет песчаники с прослоями гравелитов и филлитовидных алевроглинистых пород. Изотопный возраст присутствующих в ее верхней части трахиандезитов дворцевого комплекса [Петров и др., 2005; Государственная..., 2010] оценивается в 559 ± 16 (Rb-Sr метод) или 569 ± 42 (Sm-Nd метод) млн лет [Карпухина и др., 2001]. U-Pb LA-ICP-MS-изотопный возраст детритового циркона в песчаниках керносской свиты изменяется от 3076 до 893 млн лет [Маслов и др., 2012a]. Старопечнинская свита (200–500 м) представлена диамиктитами, песчаниками, алевролитами и глинистыми сланцами. Перевалокская свита (до 300 м) объединяет темно-серые аргиллиты, песчаники и гравелиты. U-Pb-изотопный возраст цирконов из вулканических туфов этой свиты составляет 567.2 ± 3.9 млн лет [Гражданкин и др., 2011].

Юго-восточная часть Мезенской синеклизы (Вычегодский прогиб). К редкинскому региоярсу в скв. Кельтменская-1 относятся породы, вскрытые в интервале 2790 (80)–2309 м: пятнисто-окрашенная толща тонкопереслаивающихся аргиллитов, алевролитов и песчаников.

Юго-восточный склон Балтийского щита (Юго-восточное Беломорье). Здесь редкинскому региоярсу принадлежит нижняя часть лямичской свиты, которая сложена толщиной тонкого переслаивания алевролитов и глин, среди которых присутствуют клинья сероцветных песчаников [Гражданкин, Маслов, 2015].

На южном склоне Балтийского щита (Лужско-Ладожская моноклираль) к рассматриваемому уровню относится старорусская свита (до 45 м), представленная пестроцветными алевролитами и аргиллитами, чередующимися в основании и кровле со светлыми олигомиктовыми песчаниками [Геология..., 1971].

Беломорский региоярус

К беломорскому региоярсу на Среднем Урале относятся вилухинская, шурышская, черемуховская, синемакаменская и коноваловская подсвиты чернокаменской свиты [Гражданкин, Маслов, 2015]. Вилухинская подсвита (до 200 м) сложена чередованием пачек зеленовато-серых песчаников и фисташково-зеленых и вишнево-красных тонкослоистых алевроаргиллитов. U-Pb-изотопный возраст циркона из вулканических туфов, присутствующих в нижней части вилухинской подсвиты, составляет 557 ± 13 млн лет [Ронкин и др., 2006]. Шурышская подсвита (170–200 м) объединяет светло- и зеленовато-серые тонкослоистые алевролиты с многочисленными прослоями и пластами песчаников. Черемуховская подсвита (30–35 м) – это преимущественно переслаивание светло- и зеленовато-серых песчаников. В основании синемакаменской подсвиты (до 160 м) залегает пакет песчаников,

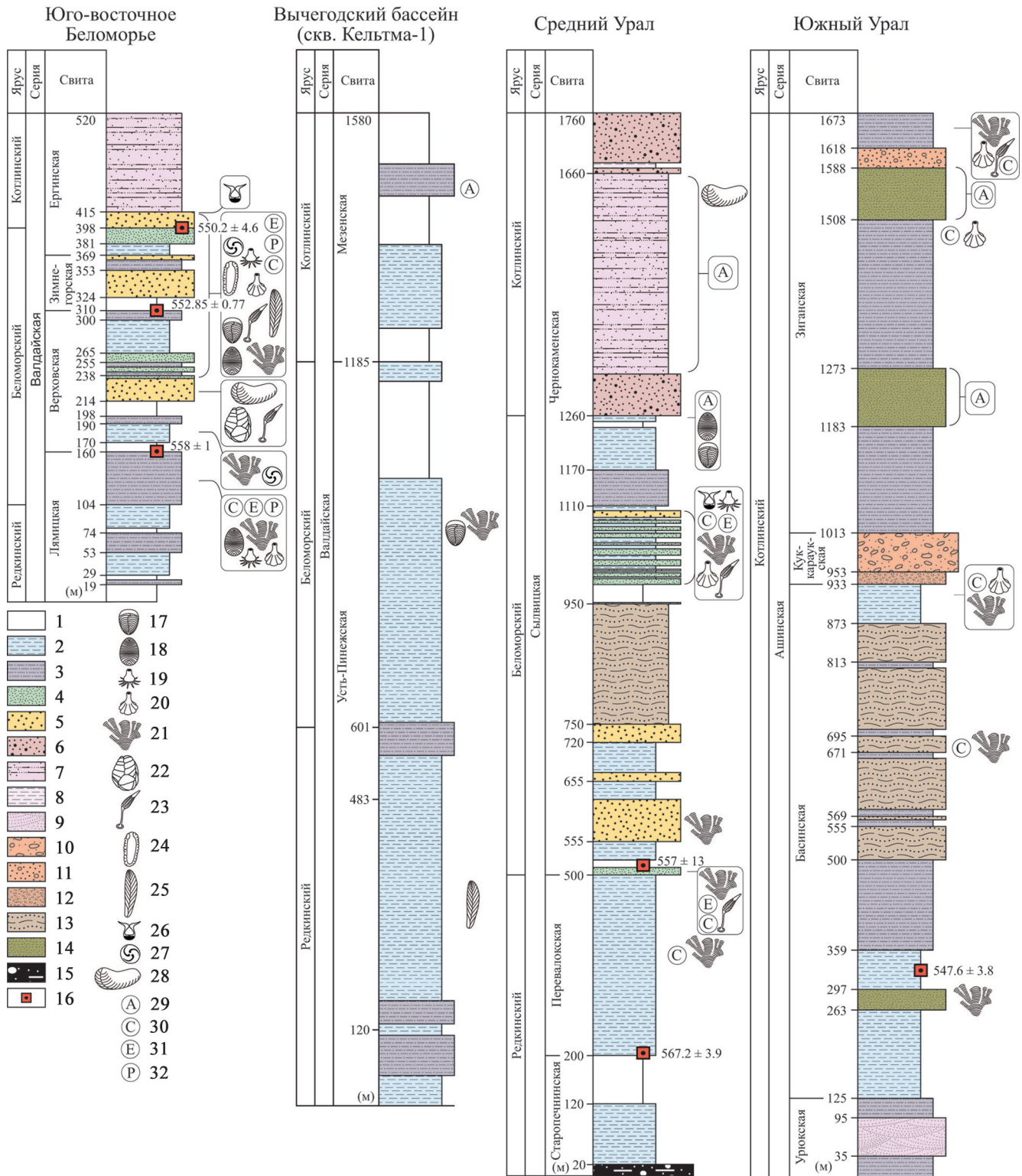


Рис. 2. Распространение макроскопических остатков эдиакарской биоты в верхнем венде востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы и обстановки осадконакопления.

1 – тонкослоистые аргиллиты (внутренние шельфы с низкой гидродинамической активностью, лагуны(?)); 2 – чередующиеся аргиллиты и алевролиты (внутренние шельфы с низкой гидродинамической активностью, лагуны(?)); 3 – чередующиеся аргиллиты, алевролиты и песчаники (продельты с волновой и потоковой активностью); 4 – переслаивающиеся песчаники и аргиллиты (продельты с волновой и потоковой активностью); 5 – переслаивающиеся песчаники (активные дельтовые системы каналов, рукавов(?)); 6 – косослоистые песчаники (проксимальные дельтовые косы, валы(?)); 7 – чередующиеся аргиллиты, алевролиты и песчаники (дистальные дельтовые косы, валы(?) и приливно-отливные равнины); 8 –

чередующиеся аргиллиты и алевролиты (дистальные дельтовые косы, валы(?) и приливо-отливные равнины); 9 – косо-слоистые песчаники и алевролиты (дистальные дельтовые косы, валы(?)); 10 – конгломераты (близбереговые обстановки с волноприбойной активностью, верхняя часть береговой зоны); 11 – гравелиты (близбереговые обстановки с волноприбойной активностью, верхняя часть береговой зоны); 12 – грубозернистые песчаники (близбереговые обстановки с волноприбойной активностью, верхняя часть береговой зоны); 13 – ровно- и волнистослоистые алевролиты и песчаники (обстановки средней части береговой зоны); 14 – биоламинитовые алевролиты и песчаники (перитайдиальные обстановки); 15 – диамиктиты (подводные равнины с гляциальным характером седиментации); 16 – стратиграфическое положение вулканических пеплов и их U–Pb возраст (млн лет); 17 – сприггиноморфы; 18 – дикинсониеморфы; 19 – мавзонитоморфы; 20 – аспиделломорфы; 21 – палеопасихниды; 22 – онегиаморфы; 23 – арбореоморфы; 24 – билатераломорфы; 25 – рангеоморфы; 26 – псаммокораллы; 27 – трибрахиоморфы; 28 – птеридиниоморфы; 29 – арумбериеморфные микробийные колонии; 30 – микробийные колонии типа Cyclomedusa; 31 – микробийные колонии типа Ediacaria; 32 – микробийные колонии типа Paliella.

Положение сводных разрезов (1 – Южный Урал, 2 – Средний Урал, 3 – Вычегодский прогиб, 4 – Юго-восточное Беломорье) – см. рис. 1.

Fig. 2. Distribution of Ediacaran macrofossils in the Upper Vendian sequences of East, Northeast and North of the East European Platform and depositional environments.

1 – laminated shale (low-energy inner shelf); 2 – alternating shale and siltstone (low-energy inner shelf); 3 – alternating shale, siltstone and sandstone (wave- and current agitated shoreface and prodelta); 4 – interstratified sandstone and shale (wave- and current agitated shoreface and prodelta); 5 – interstratified sandstone (high-energy distributary channel systems); 6 – cross-bedded sandstone (proximal braid delta plane); 7 – alternating shale, siltstone and sandstone (distal braid delta plane and tidal flats); 8 – alternating shale and siltstone (distal braid delta plane and tidal flats); 9 – cross-bedded sandstone and siltstone (distal braid plane); 10 – conglomerate (upper shoreface); 11 – gravelstone (upper shoreface); 12 – coarse-grained sandstone (upper shoreface); 13 – laminar- and wave-bedded siltstone and sandstone (middle shoreface); 14 – biolaminated siltstone and sandstone (peritidal flat); 15 – diamictite (distal flat with glacial sedimentation); 16 – U–Pb age (Ma) of volcanic ash and its stratigraphic occurrence; 17 – Sprigginomorpha; 18 – Dickinsoniomorpha; 19 – Mawsonitomorpha; 20 – Aspidellomorpha; 21 – Palaeopascichnida; 22 – Onegiamorpha; 23 – Arboreomorpha; 24 – Bilateralomorpha; 25 – Rangeomorpha; 26 – Psammocoralia; 27 – Tribrachiomorpha; 28 – Pteridinomorpha; 29 – Arumberiamorph microbial colony; 30 – Cyclomedusa-type microbial colony; 31 – Ediacaria-type microbial colony; 32 – Paliella-type microbial colony.

The position of the composite sections (1 – South Urals, 2 – Central Urals, 3 – Vycheгда Trough, 4 – Southeast White Sea area), see on the Fig. 1.

вмещающий слепки каналов. Выше присутствует пачка тонкого переслаивания алевролитов и аргиллитов с прослоями песчаников. Разрез наращается зеленовато-серыми аргиллитами с редкими пакетами песчаников и слепками промоин. Далее следует тонкое переслаивание аргиллитов и песчаников. Остальная часть подсвиты (≈ 120 м) имеет регрессивное строение [Гражданкин и др., 2010]. В основании коноваловской подсвиты (≈ 150 м) залегает приблизительно 60-метровая толща тонкослоистых алевролитов, вмещающая пласты песчаников. Выше следует примерно такой же мощности толща переслаивания алевролитов и аргиллитов с пластами песчаников. Завершает разрез пачка тонкого чередования алевролитов и аргиллитов.

На юго-востоке Мезенской впадины к беломорскому региоярису нами относится интервал 2309–1725 м скв. Кельтменская-1, объединяющий тонко- и грубопереслаивающиеся светло-серые мелкозернистые песчаники, алевролиты и темно-серые аргиллиты [Подковыров и др., 2011].

В Юго-восточном Беломорье беломорский региоярус включает в себя верхнюю часть лямичской свиты, верховскую и зимнегорскую свиты, а также нижняя подсвиту ергинской свиты [Гражданкин, Маслов, 2011]. Верхняя часть лямичской свиты сложена в основном песчаниками, чередующимися с пятнисто-окрашенными интервалами переслаивания алевролитов и глин [Гражданкин, 2003]. Верховская свита (до 170 м) представлена пачка-

ми тонкослоистых глин, интервалами переслаивания алевролитов и глин, песчаниками, алевролитами. Зимнегорская свита (до 125 м) включает в себя пачки тонкослоистых пестроцветных глин с прослоями вулканических пеплов, линзы гравелитов и конгломератов, а также пачки переслаивания кварцевых песчаников, алевролитов и глин. В верхней части свиты присутствуют темно-серые глины с сапропелеподобными пленками, постепенно сменяющиеся тонким переслаиванием алевролитов и зеленовато-серых глин с линзовидными пакетами песчаников. Нижняя подсвита (≈ 70 м) ергинской свиты объединяет пачки переслаивания песчаников, алевролитов и глин пестрой окраски [Гражданкин, 2003].

Котлинский региоярус

Южный Урал. В западной зоне Башкирского мегантиклинория к котлинскому региоярису, по представлениям [Grazhdankin, 2014; Гражданкин, Маслов, 2015; Kolesnikov et al., 2017], относятся урюкская, басинская, куккараукская и зиганская свиты ашинской серии. Урюкская свита (200–300 м) объединяет светло- и розовато-серые песчаники, алевролиты, гравелиты и конгломераты. Басинская свита (до 1000 м) представлена серыми и зеленовато-серыми песчаниками, переслаивающимися с пестроцветными алевролитами и глинистыми сланцами. Куккараукская свита (200–250 м) сложена

на конгломератами, песчаниками и алевролитами. U-Pb LA-ICP-MS-изотопный возраст обломочного циркона, присутствующего в песчаниках башкинской свиты, варьирует от 2900 до 700 млн лет, а для детритового циркона из куккараукской свиты изменяется от 3200 до 620 млн лет [Kuznetsov et al., 2014]. Зиганская свита (500–600 м) объединяет серо- и зеленоцветные песчаники, алевролиты, аргиллиты и гравелиты. U-Pb LA-ICP-MS-изотопный возраст циркона из присутствующих в ее нижней части на северной окраине г. Усть-Катав вулканических туфов – 547.6 ± 3.8 млн лет [Levashova et al., 2013].

На Среднем Урале к котлинскому региоярису принадлежат крутихинская и кобылоостровская подсвиты чернокаменской свиты [Гражданкин, Маслов, 2015]. Крутихинская подсвита (до 400 м) сложена пачками песчаников и аргиллитов зеленовато-серого цвета и пачками аргиллитов голубовато-серого и красно-коричневого цвета. В верхней части подсвиты наблюдается чередование пестроцветных алевролитов и аргиллитов, темно- и зеленовато-серых алевролитов, а также коричнево-серых песчаников. Кобылоостровская подсвита (≈ 100 м) объединяет серые и темно-серые песчаники различной зернистости, чередующиеся с пачками зеленовато-серых алевролитов и аргиллитов [Гражданкин и др., 2010].

В Вычегодском прогибе к котлинскому региоярису в скв. Кельтменская-1 относится, по всей видимости, интервал 1725–1330 м, сложенный светло-серыми среднезернистыми песчаниками, зеленовато-серыми алевролитами и голубовато- и коричневатосерыми аргиллитами [Подковыров и др., 2011].

В Юго-восточном Беломорье котлинскому региоярису принадлежит верхняя подсвита ергинской свиты (≈ 80 –90 м), сложенная переслаиванием песчаников, алевролитов и пестрых глин [Гражданкин, Маслов, 2015].

На территории Лужско-Ладужской моноклинали котлинский региоярус включает отложения василеостровской и воронковской свит [Гражданкин, Маслов, 2015]. Василеостровская свита (150–170 м) объединяет нижнюю песчано-глинистую и верхнюю, существенно глинистую, подсвиты. В разрезах нижней подсвиты чередуются буровато- и зеленовато-серые алевроаргиллиты и разнозернистые слюдистые песчаники, а верхняя подсвита сложена зеленовато- и голубовато-серыми ламинаритовыми глинами с пропластками сидерита и прослоями песчаников. Воронковская свита (0–20 м) представлена пестроцветными тонкослоистыми глинами и алевролитами. В верхней ее части среди них присутствуют светлые кварцевые пески и алевриты. На размытой поверхности вендских образований залегает ломоносовская свита нижнего кембрия, в состав которой входят

светлые кварцевые песчаники, алевролиты и глины с примесью песчаного и алевритового материала [Геология..., 1971].

РЕЗУЛЬТАТЫ РАННЕЕ ПРОВЕДЕННЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты ранее выполненных литогеохимических исследований, в основном посвященные верхневендским осадочным последовательностям Башкирского и Кваркушко-Каменногорского мегантиклинориев, а также Мезенской впадины приведены в [Маслов и др., 2003а, 2005, 2006а, б, 2007, 2008, 2009, 2013б, 2016б; Гражданкин и др., 2005, 2010; Маслов, 2014; и др.]. В рамках настоящей работы мы не можем остановиться на них подробно, однако отметим, что поднимаемые в данной статье вопросы ранее никем не рассматривались.

МАТЕРИАЛ И ПОДХОДЫ К ЕГО ИНТЕРПРЕТАЦИИ

Для настоящего исследования нами использованы данные о содержаниях основных породообразующих оксидов, а также редких и рассеянных элементов в тонкозернистых алюмосиликлатических породах (глинистых сланцах, аргиллитах и алевроаргиллитах), образцы которых отобраны из естественных разрезов ашинской серии Южного Урала, сыльвицкой серии Среднего Урала, керны скважин Кельтминская-1 (Вычегодский прогиб) и Тучкино-1000 (Юго-восточное Беломорье). Ряд образцов алевроаргиллитов из керны скв. Кельтминская-1 был передан в распоряжение авторов Н.Г. Воробьевой (ГИН РАН, г. Москва). Привлечены также сведения о химическом составе глин старорусской и василеостровской свит южного склона Балтийского щита.

Содержания основных петрогенных оксидов определены в 400 образцах методом РФА на VRA-30 в ИГТ УрО РАН (аналитики – Н.П. Горбунова, Л.А. Татаринова, В.П. Власов, Г.С. Неупокоева и Г.М. Ятлук). Содержания элементов-примесей установлены там же в более чем 360 образцах методом ICP-MS под руководством Ю.Л. Ронкина (аналитики – О.П. Лепихина, О.Ю. Попова, Г.С. Лепихина).

Указанные данные позволили с той или иной степенью достоверности судить об особенностях рециклинга поступающего в различные районы Мезенского бассейна осадочного материала, составе пород в областях размыва и, соответственно, составе субстрата в разных сегментах бассейна, на котором формировались микробальные маты и обитали многоклеточные организмы, а также о палеогеодинамических обстановках и ряде других факторов внешней среды (среды осадконакопления), на фоне которых происходило формирование и развитие различных групп мягкотелых организмов. При

этом важно подчеркнуть, что использованные нами методы и подходы не имели целью непосредственно (и правильно) расшифровать различные факторы формирования осадочных последовательностей венда разных районов. Нам было важно в любой системе литогеохимических индикаторов/координат установить соответствие этапов изменения ассоциаций мягкотелых организмов вариациям тех или иных параметров среды осадконакопления. Парадоксально, но, по всей видимости, это можно было сделать и используя “заведомо неприемлемые” для интракратонных и форландовых осадочных последовательностей “литогеохимические инструменты”, например различные диаграммы М. Бхатиа.

Рециклинг осадочного материала. Кластические осадки формируются за счет смешения рециклированного “second cycle” (переотложенного, литогенного) и “first cycle” (петрогенного) материала. Это ведет к образованию соответственно литогенных и петрогенных обломочных пород. Концептуальные вопросы разграничения указанных осадочных образований рассмотрены Р. Коксом с соавторами [Cox et al., 1995], а также Я.Э. Юдовичем и М.П. Кетрис [2000]².

Состав пород в областях размыва/состав субстрата в областях седиментации. Достаточно эффективным методом реконструкции состава пород на палеоводосборах является анализ присутствующих тонкозернистым терригенным образованиям значений индикаторных отношений редких и рассеянных элементов (Th/Sc, La/Sc, La/Co, Th/Co, Th/Cr и V/Ni и др.). Считается, что они заметно не меняются в процессах литогенеза и метаморфизма и отражают значения указанных параметров в магматических породах разного состава [Wronkiewicz, Condie, 1987; McLennan, 1989; Condie, 1993; Taylor, McLennan, 1995; Cox et al., 1995; Cullers, 1995; Интерпретация..., 2001; Geochemistry..., 2003; Маслов, 2005; и др.]. Состав пород в источниках сноса и тип размывавшейся верхней коры контролируют также разнообразие нормированных по хондриту спектров распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) в постархейских тонкозернистых обломочных породах [McLennan et al., 1990; Taylor, McLennan, 1995].

Для расшифровки *палеогеодинамических обстановок* формирования терригенных толщ в 1980-х гг. разработан ряд дискриминантных диаграмм. Так, в публикации [Maunard et al., 1982] для разграничения отложений активных и пассивных континентальных окраин предложена диа-

грамма $K_2O/Na_2O-SiO_2/Al_2O_3$. В целях идентификации обстановок накопления граувакк созданы диаграммы $(Fe_2O_3^* + MgO)-K_2O/Na_2O$, $(Fe_2O_3^* + MgO)-Al_2O_3/SiO_2$ и др. [Bhatia, 1983], а несколько позднее – диаграмма SiO_2-K_2O/Na_2O^3 [Roser, Korsch, 1986]. Наряду с данными по распределению в песчаниках и глинистых породах редких и рассеянных элементов указанные диаграммы в настоящее время широко применяются для реконструкции палеогеодинамических обстановок формирования осадочных и осадочно-метаморфических образований различного возраста [Hossain et al., 2010; Descourvieres et al., 2011; Tang et al., 2012; Shia et al., 2013; Chen et al., 2014; Imchen et al., 2014; и др.]. Достоинства и недостатки каждой из них в последние годы активно обсуждаются [Armstrong-Altrin, Verma, 2005; Ryan, Williams, 2007; Маслов и др., 2012б, в; Caracciolo et al., 2012; Verma, Armstrong-Altrin, 2013; и др.]. С. Верма и Дж. Армстронг-Алтрин [Verma, Armstrong-Altrin, 2013] предложили недавно две новые факторные диаграммы для разграничения рифтогенных, островодужных и коллизионных осадочных ассоциаций, однако проведенное нами [Маслов и др., 2016а] сопоставление дискриминантных диаграмм разных поколений показало, что они позволяют разграничить терригенные ассоциации только с определенной долей условности.

Реконструкция *палеоклимата* по литохимическим данным основана на определении степени зрелости тонкой алюмосиликокластики, поступающей с палеоводосборов в области осадконакопления. Показателями зрелости являются гидролизатный $(Al_2O_3 + TiO_2 + Fe_2O_3 + FeO + MnO)/SiO_2$ и алюмокремниевый Al_2O_3/SiO_2 модули, а также химический индекс изменения (CIA) – $100 \times Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO^{*4} + Na_2O + K_2O)$, химический индекс выветривания (CIW) – $100 \times Al_2O_3/(Al_2O_3 + CaO + Na_2O)$, индекс вариаций состава

³ Как подчеркнуто рецензентом, “содержание щелочей, безусловно, несет важную информацию, но оно может быть изменено под воздействием калиевого метасоматоза, довольно широко распространенного в осадочных бассейнах, особенно докембрийского возраста. Проводилось ли исследование наличия/отсутствия метасоматических преобразований в изучаемых осадочных породах? Этот вопрос следует рассмотреть в тексте”. С этим замечанием трудно не согласиться, однако диаграммы с K_2O/Na_2O широко используются разными авторами для реконструкции палеогеодинамических обстановок формирования отложений весьма широкого возрастного диапазона (от позднего архея [Budi-hal, Puja, 2012] до голоцена [Das et al., 2006]) и обозначенная проблема не играет при этом существенной роли. Мы постараемся рассмотреть ее специально в будущем, так как сильно стеснены правилами в отношении объема публикации (см. также раздел “Результаты ранее проведенных исследований”).

⁴ Здесь CaO^* – содержание оксида кальция в алюмосиликокластической матрице.

² Здесь и далее вследствие ограниченного объема статьи мы не приводим какие-либо конкретные значения тех или иных модулей, индексов, отношений и т. п., отсылая заинтересованного читателя к соответствующим публикациям и работе [Маслов, 2005].

(IVC) – $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{TiO}_2) / \text{Al}_2\text{O}_3$, плагиоклазовый индекс (PIA) – $100 \times \text{Al}_2\text{O}_3 - \text{K}_2\text{O} / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{CaO}^* + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ и др. [Юдович, 1981; Nesbitt, Young, 1982; Harnois, 1988; Visser, Young, 1990; Cox et al., 1995; Fedo et al., 1995; Юдович, Кетрис, 2000]. Расчет модулей ведется непосредственно по данным валовых химических анализов, тогда как значения индексов определяются по молекулярным количествам оксидов. Ранее для этой же цели была предложена диаграмма $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2) - (\text{Na}_2\text{O} + \text{CaO} + \text{MgO} + \text{MnO} + \text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{п.п.}) - (\text{SiO}_2 + \text{K}_2\text{O})$ [Ронов, Хлебникова, 1961]. Действенным инструментом при анализе процессов выветривания на палеоводосборах являются также диаграммы A–CN–K и (A–K)–C–N [Nesbitt, Young, 1982; Fedo et al., 1995].

В качестве показателя окислительно-восстановительных особенностей придонных вод бассейнов седиментации в отечественной литературе используется преимущественно отношение Mo/Mn – так называемый “коэффициент стагнации” [Холодов, Недумов, 1991, 2005; Гаврилов и др., 2002; Бяков, Ведерников, 2007]. В зарубежных публикациях приводится более широкий спектр такого рода индикаторов – Ni/Co, V/Cr, V/(V + Ni), Re/Mo, Mo/Co, V/Co и др. [Hatch, Leventhal, 1992; Jones, Manning, 1994; Rachold, Brumsack, 2001; Rimmer, 2004; Turgeon, Brumsack, 2006; и др.], однако применение их не всегда дает согласующиеся результаты [Маслов и др., 2003а].

Индикатором наличия в осадках продуктов подводных эксгальций является титановый модуль (модуль Страхова) – $(\text{Fe} + \text{Mn})/\text{Ti}$ [Страхов, 1976]. Другим индикатором подобного рода служит алюминиевый модуль (модуль Бострёма) – $\text{Al}/(\text{Al} + \text{Fe} + \text{Mn})$ [Bostrom, 1973]. Предложен и ряд иных индикаторов [Стрекопытов и др., 1995; Geochemistry..., 2003; и др.].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Состав глинистых пород. На диаграмме K/Al–Mg/Al [Turgeon, Brumsack, 2006] точки глинистых пород редкинского и беломорского региоярус Среднего Урала в основном сосредоточены в области состава, в существенной степени близкой к составу иллита (рис. 3а, б). При этом не наблюдается какого-либо различия между составом глинистых пород различных регионов. Подавляющая часть исследованных нами образцов глинистых пород котлинского региояруса Среднего Урала, Вычегодского прогиба, Юго-восточного Беломорья и Лужско-Ладожской моноклинали также имеют состав близкий к составу гидрослюдистых глин. Существенная же часть глинистых пород этого региояруса, развитых на западном склоне Южного Урала содержит, по всей видимости, некоторую долю хлорита (рис. 3в).

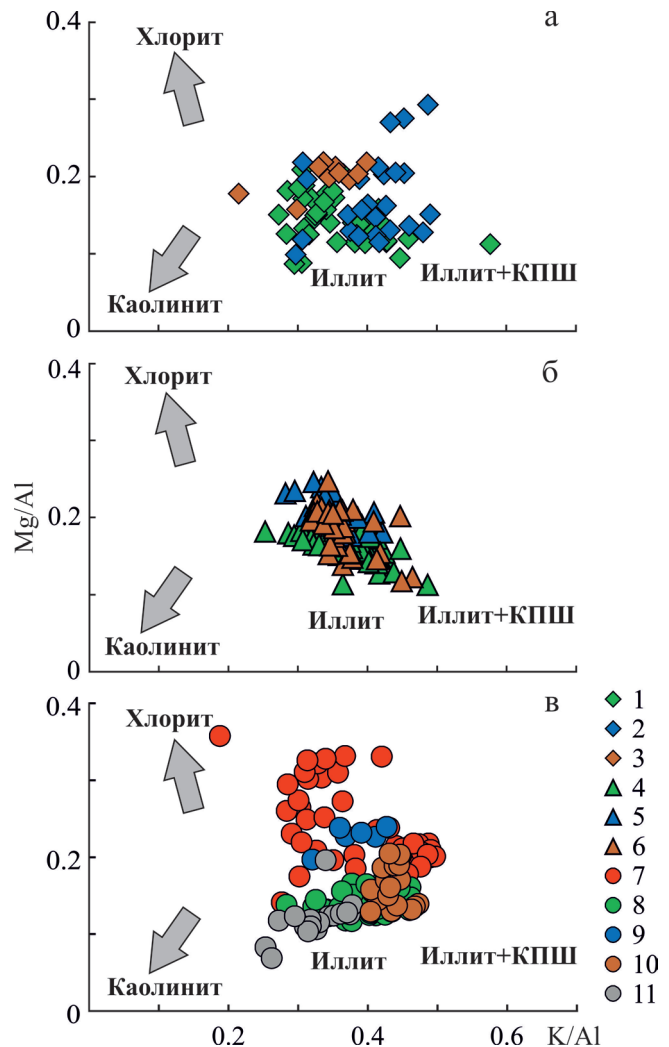


Рис. 3. Положение точек состава глинистых пород верхнего венда разных регионов востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы на диаграмме K/Al–Mg/Al.

а – редкинский региоярус, б – беломорский региоярус, в – котлинский региоярус; 1–3 – редкинский региоярус: 1 – Средний Урал, 2 – Вычегодский прогиб, 3 – Юго-восточное Беломорье; 4–6 – беломорский региоярус: 4 – Средний Урал, 5 – Вычегодский прогиб, 6 – Юго-восточное Беломорье; 7–11 – котлинский региоярус: 7 – Южный Урал, 8 – Средний Урал, 9 – Вычегодский прогиб, 10 – Юго-восточное Беломорье, 11 – Лужско-Ладожская моноклинали.

Fig. 3. Location of the Upper Vendian clay rock data points of different regions of the East European Platform on the diagram K/Al–Mg/Al.

а – Redkinian Regional Stage, б – Belomorian Regional Stage, в – Kotlinian Regional Stage; 1–3 – Redkinian Regional Stage: 1 – Central Urals, 2 – Vycheгда Trough, 3 – Southeast White Sea area; 4–6 – Belomorian Regional Stage: 4 – Central Urals, 5 – Vycheгда Trough, 6 – Southeast White Sea area; 7–11 – Kotlinian Regional Stage: 7 – South Urals, 8 – Central Urals, 9 – Vycheгда Trough, 10 – Southeast White Sea area, 11 – Luga-Ladoga monocline.

На диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (диаграмма НКМ–ФМ) [Юдович, Кетрис, 2000] точки глинистых пород редкинского региояруса в основном сконцентрированы в поле V (хлорит-сметтит-гидрослюдистые глины) (рис. 4а). Весьма однородным распределением на данном графике характеризуются породы беломорского региояруса, точки состава которых расположены как в поле IV (хлорит-гидрослюдистые глины), так и в поле V (рис. 4б). В этих же преимущественно полях присутствуют точки тонкозернистых обломочных образований котлинского региояруса, представляющие западный склон Среднего Урала, юго-восточную часть Мезенской впадины и юго-восточный склон Балтийского щита (рис. 4в). Состав существенной части глинистых пород данного уровня верхнего венда Южного Урала отвечает полям III (преимущественно хлоритовые с примесью Fe-гидрослюд глины) и IV, а точки глинистых пород василеостровской свиты локализованы в основном в поле II (преимущественно смектитовые с примесью каолинита и гидрослюды глины). Исходя из сказанного, можно сделать вывод о том, что составы исследуемых нами образований являются в значительной степени сопоставимыми.

Рециклинг. Средняя величина $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в тонкозернистых обломочных образованиях редкинского региояруса Среднего Урала составляет 0.23 ± 0.04 . В скважинах Кельтминская-1 (Вычегодский прогиб) и Тучкино-1000 (Юго-восточное Беломорье) средние значения рассматриваемого параметра в глинистых породах данного уровня примерно такие же (0.24 ± 0.03 и 0.23 ± 0.02). Единственное отличие среднеуральского района – большая максимальная величина $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (0.37 против 0.28 и 0.25). Глинистые породы беломорского региояруса во всех трех перечисленных районах также имеют сходные средние значения $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (0.24 ± 0.02 , 0.22 ± 0.02 и 0.23 ± 0.02), принципиально указанные величины не отличаются от тех, что характерны для пород редкинского уровня. Для тонкозернистых обломочных пород котлинского региояруса в разрезах Южного и Среднего Урала, а также Вычегодского прогиба и Юго-восточного Беломорья свойственны немного большие средние величины $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ (от 0.24 ± 0.02 до 0.28 ± 0.01), тогда как глинистые породы котлинского региояруса Лужско-Ладожской моноклинали имеют минимальное среди всех проанализированных нами объектов среднее значение данного параметра (0.21 ± 0.02 , минимум – 0.16, максимум – 0.24). Показательно, что максимальные величины $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в тонкозернистых обломочных породах котлинского региояруса различных районов достигают 0.30–0.32 (соответственно, Средний Урал и Юго-восточное Беломорье, и Южный Урал). Приведенные данные показывают, что глинистые породы верхнего венда сложены, по всей видимости,

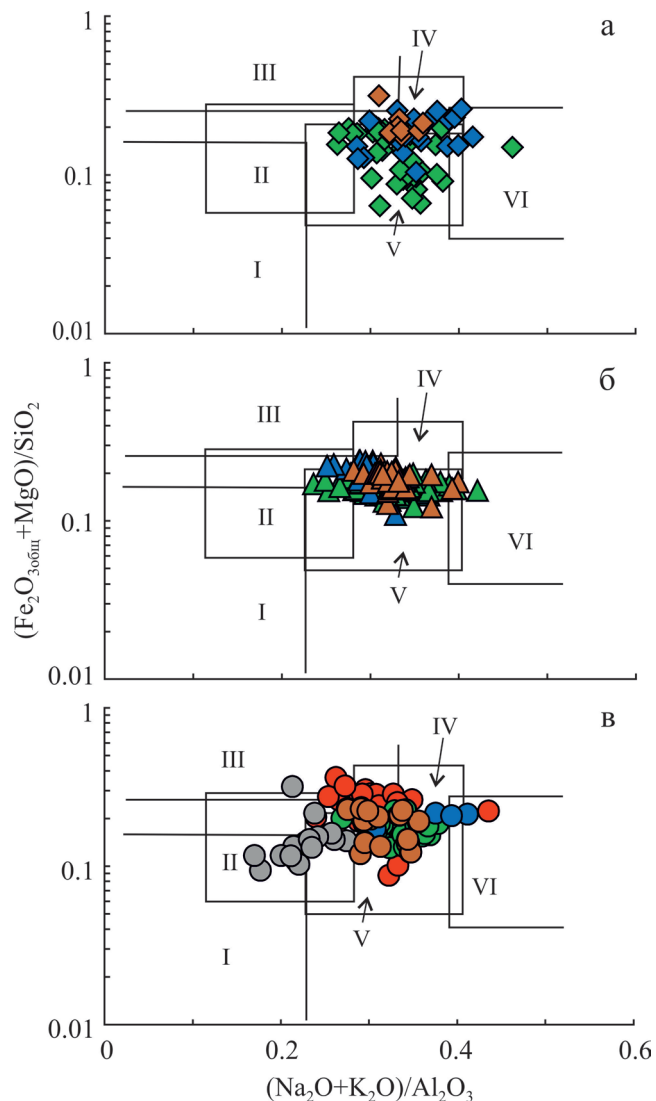


Рис. 4. Положение точек состава глинистых пород верхнего венда разных регионов Восточно-Европейской платформы на диаграмме $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$ (диаграмма НКМ–ФМ).

Поля состава глин: I – преимущественно каолинитовых, II – преимущественно смектитовых с примесью каолинита и гидрослюды, III – преимущественно хлоритовых с примесью Fe-гидрослюды, IV – хлорит-гидрослюдистых, V – хлорит-сметтит-гидрослюдистых, VI – гидрослюдистых со значительной примесью дисперсных полевых шпатов. Остальные условные обозначения – см. рис. 3.

Fig. 4. Location of the Upper Vendian clay rock data points of different regions of the East European Platform on the diagram $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})/\text{Al}_2\text{O}_3 - (\text{Fe}_2\text{O}_{3\text{общ}} + \text{MgO})/\text{SiO}_2$.

Fields of clay composition: I – predominantly kaolinite, II – predominantly smectite with an admixture of kaolinite and hydromica, III – mainly chlorite with an admixture of Fe-hydromica, IV – chlorite-hydromica, V – chlorite-smectite-hydromica, VI – hydromica with a significant admixture of dispersed feldspars. For the others symbols see Fig. 3.

обломочным материалом, в той или иной степени литогенным.

Индикатором степени рециклирования тонкой алюмосиликокластики является также отношение Zr/Sc [McLennan et al., 1993; Condie et al., 2001]. Как показано С. МакЛеннаном с соавторами [McLennan et al., 1993], значения данного параметра, составляющие более 20, указывают на рециклирование обломочного материала в процессе седиментации. В исследованных нами примерах средние величины Zr/Sc в основном составляют менее 20, т. е. состав глинистых сланцев в основном контролируется составом пород в областях размыва. Этот вывод несколько контрастирует с данными, полученными по отношению K_2O/Al_2O_3 , однако нам важно другое, а именно то, что глинистые породы разных региоярусов в различных частях Восточно-Европейской платформы и ее периферии практически сопоставимы друг с другом по данному параметру. Например, Zr/Sc_{cp} для глинистых пород беломорского яруса Среднего Урала составляет 13 ± 5 , Вычегодского прогиба – 12 ± 5 , Юго-восточного Беломорья – 14 ± 6 . Для глинистых пород котлинского региояруса Среднего Урала величина Zr/Sc_{cp} равна 12 ± 3 , Вычегодского прогиба – 12 ± 5 , Юго-восточного Беломорья – 17 ± 8 и Южного Урала – 18 ± 7 .

Источники сноса. Исходя из соотношений La/Yb и Th/Ta в тонкозернистых обломочных породах верхнего венда всех регионов (рис. 5) можно сделать вывод о том, что состав пород в источниках сноса был в целом близок к составу архейских и протерозойских гранитов, а также PAAS. Роль основных

магматических образований в формировании глинистых пород была второстепенной. Это подтверждается и распределением точек глинистых пород на диаграмме $La/Sc-Th/Co$ (рис. 6).

Палеогеодинамика. В соответствии с представлениями [Аксенов, 1985; Вендская..., 1985; Гражданкин, 2003; Grazhdankin, 2004; Гражданкин и др., 2010; и др.], рассматриваемые нами образования как формировались в достаточно спокойных внутрикратонных обстановках, так и участвовали в выполнении различных типов форландовых прогибов. На диаграмме SiO_2-K_2O/Na_2O [Roser, Korsch, 1986] приблизительно 70% точек состава тонкозернистых обломочных образований редкинского и беломорского региоярусов сосредоточено в поле активных континентальных окраин (рис. 7а, б). Распределение точек тонкозернистых обломочных образований котлинского региояруса здесь несколько иное (рис. 7в). Породы южноуральского региона образуют два кластера, один из которых тяготеет к границе полей океанических островных дуг и активных континентальных окраин, а второй локализован в поле пассивных континентальных окраин; причина этого пока не вполне понятна. Все точки глинистых образований котлинского региояруса Юго-восточного Беломорья сосредоточены в поле пассивных континентальных окраин. К этому же полю приурочены точки глинистых пород василеостровской свиты Лужско-Ладожской моноклинали.

На диаграмме $Th-La-Sc$ глинистые породы редкинского региояруса Юго-восточного Беломорья и Вычегодского прогиба в основном сосредоточены в поле континентальных островных дуг, тогда как

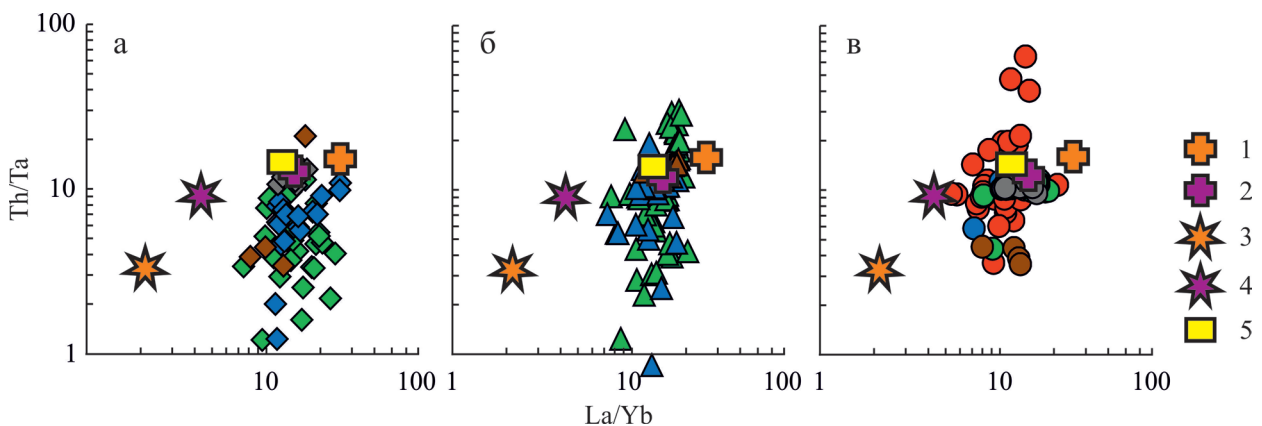


Рис. 5. Положение фигуративных точек состава тонкозернистых обломочных пород верхнего венда разных регионов Восточно-Европейской платформы на диаграмме $La/Yb-Th/Ta$.

1 – архейские гранитоиды, 2 – протерозойские гранитоиды, 3 – позднеархейские базальты, 4 – раннепротерозойские базальты, 5 – PAAS, все по [Condie, 1993]. Остальные условные обозначения – см. рис. 3.

Fig. 5. Location of the Upper Vendian clay rock data points of different regions of the East European Platform on the $La/Yb-Th/Ta$ diagram.

1 – Archean granitoids, 2 – Proterozoic granitoids, 3 – Late Archaean basalts, 4 – Early Proterozoic basalts, 5 – PAAS, all by [Condie, 1993]. For the remaining symbols see Fig. 3.

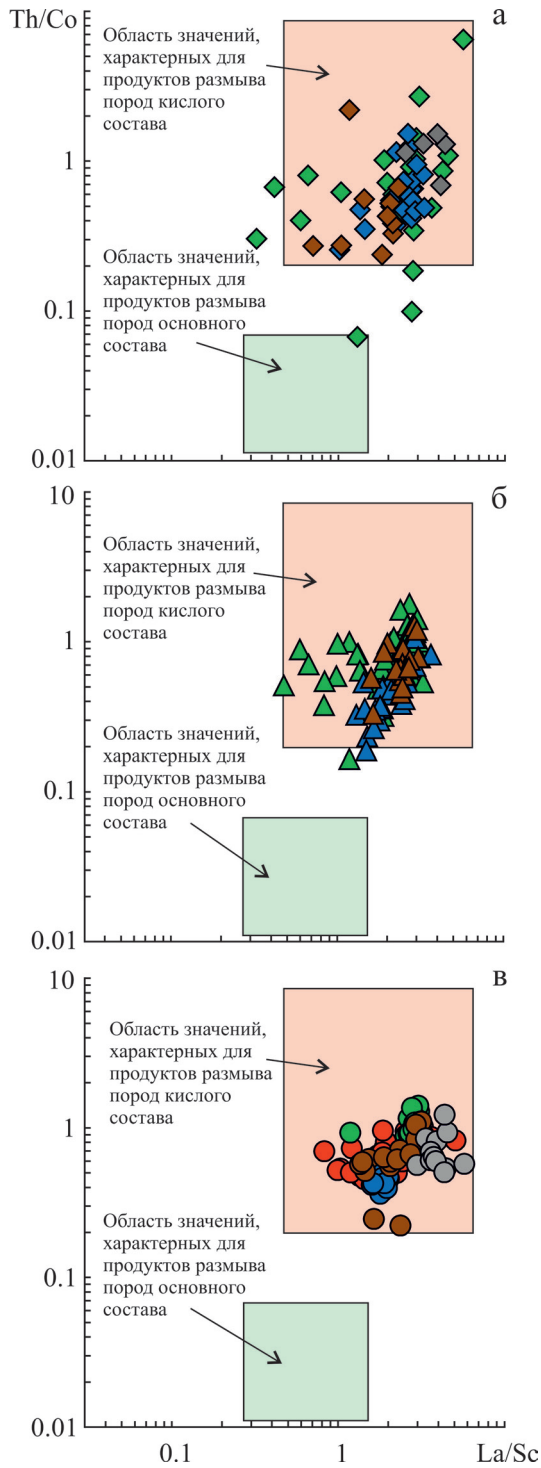


Рис. 6. Положение фигуративных точек состава глинистых пород верхнего венда разных регионов Восточно-Европейской платформы на диаграмме La/Sc–Th/Co.

Условные обозначения – см. рис. 3.

Fig. 6. Location of the Upper Vendian clay rock data points of different regions of the East European Platform on the diagram La/Sc–Th/Co.

Legend see Fig. 3.

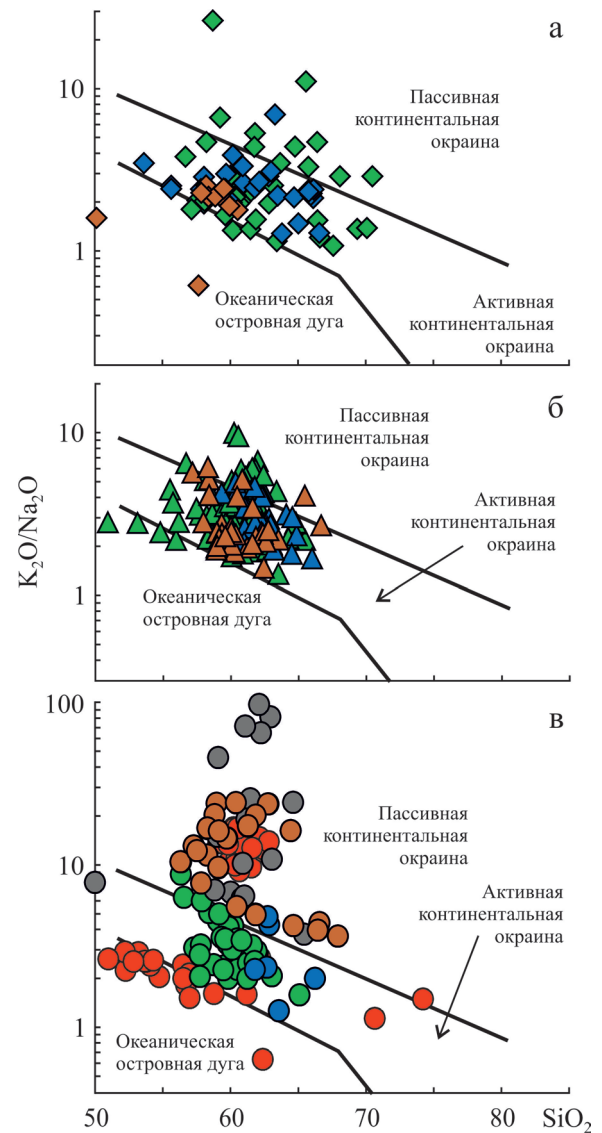


Рис. 7. Положение фигуративных точек состава глинистых пород верхнего венда разных регионов Восточно-Европейской платформы на диаграмме SiO₂–(K₂O/Na₂O).

Условные обозначения – см. рис. 3.

Fig. 7. Location of the Upper Vendian clay rock data points of different regions of the East European Platform on the diagram SiO₂–(K₂O/Na₂O).

Legend see Fig. 3.

тонкозернистые обломочные породы Кваркушко-Каменногорского мегантиклинория распределены во всех трех классификационных полях (рис. 8а). Почти также локализованы на данной диаграмме точки состава глинистых сланцев и аргиллитов беломорского региояруса (рис. 8б), а распределение точек глинистых пород котлинского региояруса более компактно: области пород Южного и Среднего Урала, а также Вычегодского прогиба, юго-

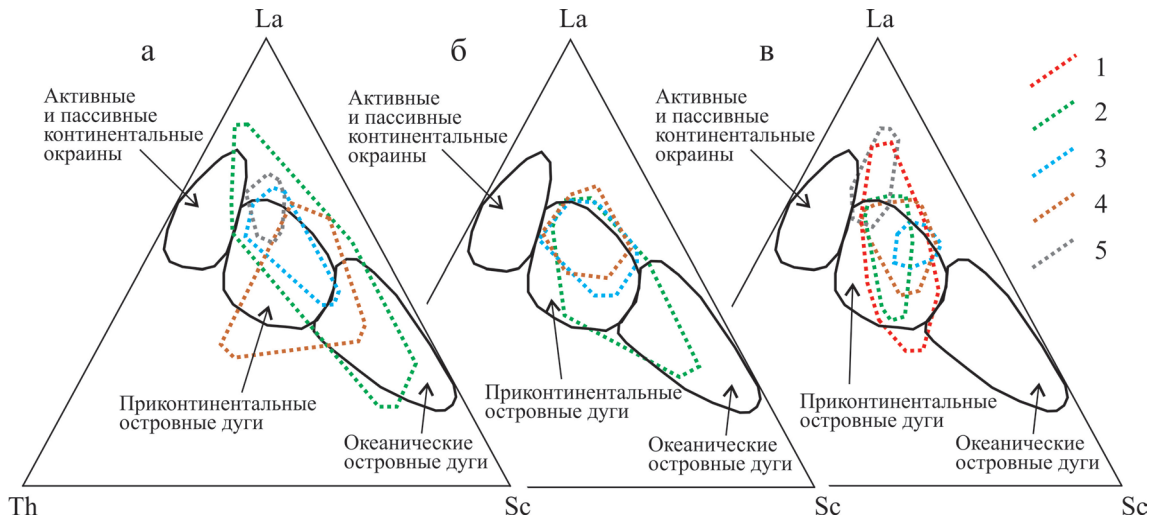


Рис. 8. Положение полей глинистых пород верхнего венда разных регионов востока, северо-востока и севера Восточно-Европейской платформы на диаграмме Th–La–Sc.

а – редкинский региоярус, б – беломорский региоярус, в – котлинский региоярус; 1 – Южный Урал, 2 – Средний Урал, 3 – Вычегодский прогиб, 4 – Юго-восточное Беломорье, 5 – Лужско-Ладожская моноклираль.

Fig. 8. Location of the Upper Vendian clay rock fields of the different regions of the east, northeast and north of the East European Platform in the Th–La–Sc diagram.

а – Redkinian Regional Stage, б – Belomorian Regional Stage, в – Kotlianian Regional Stage; 1 – South Urals, 2 – Central Urals, 3 – Vychehda Trough, 4 – Southeast White Sea area, 5 – Luga-Ladoga monocline.

восточного и южного склонов Балтийского щита почти в точности отвечают полю континентальных островных дуг (рис. 8в).

Палеоклимат. Величина гидролизатного модуля (ГМ) в глинистых породах венда в разрезе Кваркушско-Каменногорского мегантиклинория незначительно растет снизу вверх – в породах редкинского региояруса она составляет 0.40 ± 0.07 , а в породах котлинского региояруса увеличивается до 0.44 ± 0.04 . Для тонкозернистых обломочных пород редкинского региояруса от Среднего Урала до Юго-восточного Беломорья наблюдается рост ГМ от 0.40 ± 0.07 до 0.47 ± 0.08 . Примерно такая же тенденция свойственна глинистым породам беломорского региояруса. Распределение величины ГМ в породах котлинского уровня более сложное. Минимальное среднее значение ГМ (0.41 ± 0.02) характерно здесь для пород Вычегодского прогиба. На юг данный параметр постепенно растет и в глинистых породах Башкирского мегантиклинория достигает 0.46 ± 0.08 . В разрезах котлинского региояруса Юго-восточного Беломорья и Лужско-Ладожской моноклинали он также выше (0.44 ± 0.06), чем в Вычегодском прогибе. В целом же можно сделать вывод о том, что на рассматриваемой нами территории заметных различий по величине ГМ между отложениями различных региоярусов не наблюдается. Континентальные глины холодного и умеренно холодного климата и те же глины жаркого и влажного тропического клима-

та имеют значения ГМ, соответственно 0.31 и 0.63 [Ронов, Хлебникова, 1961].

Средние значения CIA в глинистых породах верхнего венда Среднего Урала практически идентичны (редкинский региоярус – 68 ± 3 , беломорский – 69 ± 3 , котлинский – 69 ± 2). Нет каких-либо выраженных вариаций CIA_{cp} и в породах редкинского и беломорского региоярусов других регионов. Для котлинского региояруса картина иная. Минимальная средняя величина CIA составляет здесь 65 ± 3 и характерна для пород юго-восточной части Мезенской впадины. На северо-восток от данного района она растет до 72 ± 2 (Юго-восточное Беломорье) и 78 ± 3 (Лужско-Ладожская моноклираль). Южнее также можно видеть некоторый рост CIA_{cp} : Средний Урал – 69 ± 2 , Южный Урал – 68 ± 4 . Таким образом, приведенные данные показывают, что в условиях, близких к гумидным, формировались, по всей видимости, только глинистые породы котлинского региояруса Юго-восточного Беломорья и Лужско-Ладожской моноклинали.

Критериев для установления того, что величина CIA^5 действительно отражает климатические

⁵ При анализе палеоклиматических трендов, зафиксированных в составе глинистых пород рифея Башкирского мегантиклинория, нами уже было показано, что графическая корректировка величин CIA на диаграмме A–CN–K не является эффективной мерой для «снятия» влияния K-метасоматоза на состав осадков, которого к

обстановки осадконакопления, а не влияние состава пород в источниках сноса, предложено несколько [Taylor, McLennan, 1985; Li, Yang, 2010; Shao, Yang, 2012; Meunier et al., 2013; и др.]. Одним из них является наличие или отсутствие корреляции между CIA и рядом индикаторных отношений элементов-примесей, например Th/Sc, La/Sc или Th/Cr, отражающих состав пород в областях размытия. Мы провели такого рода исследование применительно к тонкозернистым обломочным породам ряда литостратиграфических подразделений (свит) венда Кваркушско-Каменногорского мегантиклинория. В результате выяснилось, что для глинистых пород чернокаменной свиты характерна незначительная положительная корреляция между Th/Sc и CIA ($r = 0.18$). Тонкозернистые обломочные породы перевалокской свиты обладают выраженной отрицательной корреляцией между указанными параметрами. Сходные соотношения характерны для La/Sc и CIA, а также Th/Cr и CIA. Таким образом, на примере глинистых пород верхнего венда Среднего Урала можно сделать вывод о том, что в ряде случаев значения CIA, по всей видимости, действительно отражают палеоклимат времени осадконакопления, в других же ситуациях величина CIA зависит в существенной степени от состава размывавшихся на палеоводосборах пород. Такая же картина характерна и для выборок, представляющих глинистые породы разных региоярусов верхнего венда на северо-востоке и севере ВЕП. Следовательно, и к информации, полученной при использовании различных палеоклиматических индикаторов и индексов, отношение должно быть достаточно осторожным. В то же время, по данным палеомагнитных исследований [Федорова и др., 2014], в конце венда ВЕП находилась в приэкваториальных широтах.

Окислительно-восстановительные характеристики придонных слоев воды. Минимальная средняя величина коэффициента стагнации (Mo/Mn) для всех исследованных аналитических выборок составляет 0.0006 ± 0.0002 (котлинский региоярус, скв. Кельтминская-1) и 0.0006 ± 0.0005 (котлинский региоярус, Южный Урал). Максимальное среднее значение Mo/Mn примерно в 3 раза выше – 0.0016 ± 0.0011 (котлинский региоярус, Средний Урал), тогда как в индивидуальных образцах максимальная величина данного параметра достигает 0.0051 (беломорский региоярус, Средний Урал). В целом все сказанное не позволяет считать, что накопление осадочных толщ верхнего венда на рассматриваемой территории

происходило при заметных восстановительных обстановках.

Ранее на примере современных донных осадков Дербентской и Южно-Каспийской впадин, накапливающихся в восстановительных обстановках в придонном слое воды, установлено [Маслов и др., 2015e], что величины коэффициентов обогащения (EF, enrichment factor⁶) для Mo и U в подобных условиях достигают 14–22 и 6–7 соответственно, тогда как значения EF для ряда других, чувствительных к вариациям окислительно-восстановительных параметров среды элементов (Cr, Ni, V, Th и др.), не превышают 1.3–1.6. Для тонкозернистых обломочных пород венда востока, северо-востока и севера ВЕП максимальная средняя величина EF_{Mo} составляет 0.21, а EF_U – 0.80. В индивидуальных образцах параметр EF_{Mo} достигает максимальной величины 1.12 в глинистых породах редкинского региояруса Среднего Урала, наибольшее значение EF_U (3.30) характерно для глинистых пород котлинского региояруса Юго-восточного Беломорья. Приведенные данные подтверждают вывод о формировании отложений венда на рассматриваемой нами территории преимущественно или почти исключительно в хорошо аэрируемых обстановках.

Эксталяционные компоненты. Максимальная средняя величина модуля Страхова в тонкозернистых обломочных породах венда всех проанализированных нами осадочных последовательностей составляет 14, минимальная – 9. Такие значения (Fe + Mn)/Ti отвечают, по представлениям Н.М. Страхова [1976], осадочным образованиям, не содержащим в своем составе каких-либо эксталятивных компонентов. Средние значения модуля Бострёма, варьирующие от 0.52 до 0.68, также позволяют считать, что глинистые породы венда востока, северо-востока и севера ВЕП лишены продуктов вулканических эманаций.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследование литогеохимических характеристик, присущих глинистым породам венда, показано следующее:

1) химический и вещественный состав глинистых пород в существенной степени сходен; некоторым исключением является только часть образцов аргиллитов котлинского региояруса Южного Урала, имеющих, вероятно, несколько большее количество хлорита;

тому же в большинстве случаев реально не было. Соответственно, для заметно менее преобразованных постседиментационными процессами, чем рифейские, глинистых пород венда ВЕП обязательный учет влияния К-метасоматоза нам представляется чрезмерным.

⁶ Коэффициент обогащения осадочной породы тем или иным элементом (Э) рассчитывается путем нормирования к Al ($\text{Э}_{\text{обр}}/\text{Al}_{\text{обр}}$) и сопоставлением [Calvert, Pedersen, 1993; Tribouillard et al., 2006] полученных значений с величинами соответствующих отношений в среднем сланце [Wedepohl, 1991].

2) средние значения K_2O/Al_2O_3 для глинистых пород редкинско-беломорского региона варьируют от 0.22 до 0.24; для глинистых пород котлинского региона границы изменения значений данного параметра несколько шире (0.21–0.28), это позволяет считать, что доля рециклированной тонкой алюмосиликокластики в осадочных образованиях верхнего венда достаточно существенна;

3) снизу вверх по разрезу верхнего венда, как и вкрест палеосклона Мезенского бассейна, не наблюдается каких-либо отчетливых признаков изменения состава пород в областях размыва; единственное исключение здесь – несколько более основной состав пород на палеоводосборах, являвшихся источниками обломочного материала для отложенных беломорского региона Вычегодско-го прогиба;

4) можно предполагать заметное сходство палеогеодинамических обстановок накопления осадочных последовательностей венда на рассматриваемой территории (в терминологии Б. Розера и Р. Корша по соотношению SiO_2 и K_2O/Na_2O это в основном образования активных континентальных окраин); исключение составляют только глинистые породы котлинского региона Юго-восточного Беломорья и Лужско-Ладожской моноклинали, которые формировались, по всей видимости, в тектонически несколько более спокойных обстановках или сложены материалом, поступавшим из таких обстановок;

5) снизу вверх по разрезу верхнего венда, а также вкрест палеосклона Мезенского бассейна не наблюдается каких-либо тенденций в изменении значений ГМ и CIA в глинистых породах; если абстрагироваться от присутствия в их составе той или иной доли рециклированной алюмосиликокластики, можно считать, что большинство исследованных осадочных последовательностей являются образованиями умеренного или семиаридно-сезонного климата;

6) накопление глинистых пород венда на востоке, северо-востоке и севере ВЕП происходило в окислительных водных обстановках;

7) на протяжении позднего венда влияния процессов вулканизма на осадконакопление не наблюдается;

8) в редкинско-беломорское время формирование глинистых пород происходило в достаточно сходных обстановках. В котлинское время наблюдается некоторый разброс значений ряда параметров, но в целом он не превышает статистических погрешностей.

Таким образом, очевидно отсутствие каких-либо принципиальных вариаций основных параметров осадконакопления на востоке, северо-востоке и севере ВЕП на протяжении всего позднего венда. Не было их, вероятно, и между отдельными районами указанной территории на том или ином этапе.

Вместе с тем в целом в позднем венде можно увидеть ряд крупных этапов макроэволюционных и макроэкологических преобразований [Grazhdankin, 2014]. Так, на редкинском этапе в низкоэнергетических обстановках внутреннего шельфа формируется авалонская экологическая ассоциация макроорганизмов, представленная фрондоморфами и вендобиионтами. Предполагается, что возникновение сообществ этого типа могло быть следствием роста содержания O_2 в Мировом океане [Canfield et al., 2007] или появления новых механизмов функционирования экосистем [Lenton et al., 2014]. Кроме того, на данном этапе стали появляться и организмы из группы палеопасцихид. Беломорский этап характеризовался диверсификацией фрондоморфных организмов и миграцией вендобиионтов в обстановки с относительно более высокой энергией среды, широкой экспансией и богатым видовым разнообразием палеопасцихид, а также появлением трибрахиоморф и билатераломорф. Именно в это время бентосные мягкотелые организмы формируют три различающиеся между собой экологические ассоциации – сообщества авалонского, эдиакарского и намского типа [Grazhdankin, 2014]. Одновременно у билатерий сформировалась способность к перемешиванию осадка [Rogov et al., 2012], что должно было сказаться на структуре и функционировании морских экосистем. В котлинское время произошло резкое сокращение таксономического разнообразия в сообществах эдиакарского типа в зоне волнения и течений, что рассматривается как результат вытеснения вендобиионтов, трибрахиоморф и билатераломорф животными (котлинский кризис). В это же время в обстановках каналов распределительной системы продолжала эволюционировать намская ассоциация [Grazhdankin, 2014], демонстрирующая относительно широкое распространение палеопасцихид и микробных сообществ арумбериоморфного типа [Kolesnikov et al., 2015, 2017].

Указанные преобразования, как представляется, на проанализированном нами материале, не были, по всей видимости, связаны с эволюцией основных факторов осадконакопления, а являлись, скорее всего, внутрисистемными кризисными экологическими перестройками, демонстрирующими начало широкого распространения мягкотелых организмов, последующее исчезновение основных групп и постепенное угасание всего биоразнообразия к началу кембрийского времени, когда мягкотелые организмы исчезли из ископаемой летописи. Таким образом, главная причина котлинского кризиса, на наш взгляд, скорее собственно биологическая эволюция, понимаемая в широком смысле как естественный процесс развития живых организмов, сопровождающийся изменением генетического состава популяций, возникновением адаптаций, появлением новых и угасанием ранее существовавших.

ших видов, а также преобразованием экосистем и биосферы в целом.

Авторы искренне признательны анонимному рецензенту, немногочисленные, но предельно четкие замечания и советы которого в немалой степени содействовали улучшению текста рукописи. Иллюстрации к статье выполнены Н.С. Глушковой и А.В. Колесниковым.

Исследования проведены при финансовой поддержке РФФИ (гранты 15-05-01512, 14-05-00415, 16-35-00320).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Аксенов Е.М. (1985) Венд Восточно-Европейской платформы. *Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы.* М.: Наука, 3-34.
- Бяков А.С., Ведерников И.Л. (2007) Свидетельства аноксии на рубеже перми и триаса в глубоководных фациях на Северо-Востоке Азии. *Докл. АН*, **417**(5), 654-656.
- Вендская система. Историко-геологическое и палеонтологическое обоснование. Т. 2. Стратиграфия и геологические процессы. (1985) (Б.С. Соколов, М.А. Федонкин (отв. ред.)). М.: Наука, 222 с.
- Гаврилов Ю.О., Щепетова Е.В., Барабошкин Е.Ю., Щербинина Е.А. (2002) Аноксический раннемеловой бассейн Русской плиты: седиментология и геохимия. *Литология и полез. ископаемые*, (4), 359-380.
- Геология СССР. (1971) Т. 1. Геологическое описание. Ленинградская, Псковская и Новгородская области. (В.С. Кофман, В.А. Селиванова (отв. ред.)). М.: Недра, 504 с.
- Государственная геологическая карта Российской Федерации м-ба 1:200 000. (2010) Серия Пермская. Лист О-40-ХVII (Горнозаводск). Объяснительная записка. СПб.: Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 262 с.
- Гражданкин Д.В. (2003) Строение и условия осадконакопления вендского комплекса в Юго-восточном Беломорье. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **11**(4), 3-34.
- Гражданкин Д.В., Марусин В.В., Меерт Дж., Крупенин М.Т., Маслов А.В. (2011) Котлинский горизонт на Южном Урале. *Докл. АН*, **440**(2), 201-206.
- Гражданкин Д.В., Маслов А.В. (2015) Место венда в Международной стратиграфической шкале. *Геология и геофизика*, **56**(4), 703-717.
- Гражданкин Д.В., Маслов А.В., Крупенин М.Т., Ронкин Ю.Л. (2010) Осадочные системы сыльвицкой серии (верхний венд Среднего Урала). Екатеринбург: УрО РАН, 280 с.
- Гражданкин Д.В., Наговицин К.Е., Маслов А.В. (2007) Миаохенская экологическая ассоциация позднего венда Восточно-Европейской платформы. *Докл. АН*, **417**(1), 73-78.
- Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н., Маслов А.В. (2005) Палеоклиматические обстановки формирования верхневендских отложений Беломорско-Кулойского плато (Юго-восточное Беломорье). *Литология и полез. ископаемые*, (3), 267-280.
- Интерпретация геохимических данных. (2001) (Отв. ред. Е.В. Скляр) М.: Интермет Инжиниринг, 288 с.
- Карпухина Е.В., Первов В.А., Журавлев Д.З. (2001) Петрология субщелочного вулканизма – индикатора поздневендского рифтогенеза, западный склон Урала. *Петрология*, **9**(5), 480-503.
- Маслов А.В. (2005) Осадочные породы: методы изучения и интерпретации полученных данных. Екатеринбург: Изд-во УГГУ, 289 с.
- Маслов А.В. (2014) Литогеохимический облик отложений ашинской серии венда западного склона Южного Урала. *Литосфера*, (1), 13-32.
- Маслов А.В., Вовна Г.М., Киселёв В.И., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т. (2012а) U-Pb-систематика обломочных цирконов из отложений серебрянской серии Среднего Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (2), 180-196.
- Маслов А.В., Гареев Э.З., Ишерская М.В. (2012б) “Стандартные” дискриминантные палеогеодинамические диаграммы и платформенные песчаниковые ассоциации. *Отч. геология*, (3), 55-65.
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н., Крупенин М.Т. (2013б) Особенности изменения ряда литогеохимических характеристик тонкозернистых обломочных пород позднего венда Мезенского палеобассейна. *Литосфера*, (3), 25-42.
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П. (2008) Состав питающих провинций и особенности геологической истории поздневендского Мезенского бассейна. *Литология и полез. ископаемые*, (3), 290-312.
- Маслов А.В., Гражданкин Д.В., Подковыров В.Н., Ишерская М.В., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Гареев Э.З., Лепихина О.П. (2009) Состав питающих провинций и особенности геологической истории поздневендского форландового бассейна Тиманского орогена. *Геохимия*, (12), 1294-1318.
- Маслов А.В., Козина Н.В., Клювиткин А.А., Новигатский А.Н., Филиппов А.С., Шевченко В.П. (2015е) Распределение редокс-чувствительных элементов в современных донных осадках Каспия. “*Геология морей и океанов*”. Мат-лы XXI Междунар. науч. конф. (школы) по морской геологии. Т. IV. М.: ГЕОС, 337-341.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Петров Г.А. (2003а) К оценке редокс-обстановок рифейских и вендских бассейнов осадконакопления западного склона Урала. *Литосфера*, (2), 75-93.
- Маслов А.В., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Ронкин Ю.Л., Лепихина О.П., Корнилова А.Ю. (2007) Некоторые геохимические особенности и условия образования тонкозернистых терригенных пород серебрянской и сыльвицкой серий Среднего Урала. *Литосфера*, (2), 3-28.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Гареев Э.З. (2012в) К оценке палеогеодинамических обстановок формирования осадочных последовательностей нижнего и среднего рифея Учуро-Майского региона и Башкирского мегантиклинория. *Тихоокеан. геология*, **31**(5), 55-68.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Мизенс Г.А., Ножкин А.Д., Фазлиахметов А.М., Малиновский А.И., Худoley А.К., Котова Л.Н., Купцова А.В., Гареев Э.З., Зайнуллин Р.И. (2016а) Дискриминантные палеогеодинамические диаграммы для терригенных пород: опыт сопоставления. *Геохимия*, (7), 579-595.

- Маслов А.В., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Корнилова А.Ю., Лепихина О.П., Попова О.Ю. (2005) Систематика редкоземельных элементов и модельный возраст Nd в аргиллитах венда западного склона Среднего Урала. *Докл. АН*, **401**(5), 668-672.
- Маслов А.В., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Корнилова А.Ю., Лепихина О.П. (2006а) Некоторые геохимические особенности тонкозернистых терригенных пород венда западного склона Среднего Урала и палеогеодинамические реконструкции. *Отчет геология*, (1), 34-40.
- Маслов А.В., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Корнилова А.Ю., Лепихина О.П., Попова О.Ю. (2006б) Систематика редкоземельных элементов, Th, Hf, Sc, Co, Cr и Ni в глинистых породах серебрянской и сыльвицкой серий венда западного склона Среднего Урала – инструмент мониторинга состава источников сноса. *Геохимия*, (6), 610-632.
- Маслов А.В., Ялышева А.И., Подковыров В.Н., Главатских С.П., Граунов О.В., Сергеева Н.Д. (2016) Литохимический состав песчаников ашинской серии венда Южного Урала. *Литология и полез. ископаемые*, (5), 347-374.
- Петров Г.А., Маслов А.В., Ронкин Ю.Л. (2005) Допаалеозойские магматические комплексы Кваркушско-Каменногорского антиклинория (Средний Урал): новые данные по геохимии и геодинамике. *Литосфера*, (4), 42-69.
- Подковыров В.Н., Гражданкин Д.В., Маслов А.В. (2011) Литогеохимия тонкозернистых обломочных пород венда южной части Вычегодского прогиба. *Литология и полез. ископаемые*, (5), 484-504.
- Ронкин Ю.Л., Гражданкин Д.В., Маслов А.В., Мизенс Г.А., Матуков Д.И., Крупенин М.Т., Петров Г.А., Лепихина О.П., Корнилова А.Ю. (2006) U–Pb (SHRIMP-II)-возраст цирконов из пепловых туфов чернокаменной свиты сыльвицкой серии венда (Средний Урал). *Докл. АН*, **411**(3), 354-359.
- Ронов А.Б., Хлебникова З.В. (1961) Химический состав важнейших генетических типов глин. *Геохимия*, (6), 449-469.
- Соколов Б.С. (1980) Вендская система: предкембрийская геобиологическая среда. *Палеонтология. Стратиграфия. Международный геологический конгресс. XXVI сессия*. Доклады советских геологов. М.: Наука, 9-21.
- Соколов Б.С. (1995) Вендская система и “неопротерозой-III”. *Стратиграфия. Геол. корреляция*, **3**(6), 51-67.
- Соколов Б.С. (2011) Хроностратиграфическое пространство литосферы и венд как геоисторическое подразделение неопротерозоя. *Геология и геофизика*, **52**(10), 1334-1348.
- Страхов Н.М. (1976) Проблемы геохимии современного океанского литогенеза. М.: Наука, 299 с.
- Стрекопытов С.В., Дубинин А.В., Волков И.И. (1995) Поведение РЗЭ, циркония и гафния в осадках и конкрециях Транстихоокеанского профиля. *Геохимия*, (7), 985-997.
- Федорова Н.М., Левашова Н.М., Меерт Дж.Дж., Маслов А.В., Крупенин М.Т. (2014) Новые палеомагнитные данные для Восточно-Европейской платформы по верхневендским отложениям западного склона Среднего Урала. *Докл. АН*, **456**(1), 77-81.
- Холодов В.Н., Недумов Р.И. (1991) О геохимических критериях появления сероводородного заражения в водах древних водоемов. *Изв. АН СССР. Сер. геол.*, (12), 74-82.
- Холодов В.Н., Недумов Р.И. (2005) О применении молибденового модуля к реконструкции газового состава вод меловой Атлантики. *Докл. АН*, **400**(2), 250-253.
- Юдович Я.Э. (1981) Региональная геохимия осадочных толщ. Л.: Наука, 276 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П. (2000) Основы литохимии. СПб.: Наука, 479 с.
- Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P. (2005) Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. *Sed. Geol.*, **177**, 115-129.
- Bhatia M.R. (1983) Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *J. Geol.*, **91**, 611-627.
- Bostrom K. (1973) The origin and fate of ferromanganous active ridge sediments. *Stockholm Contrib. Geol.*, **27**(2), 148-243.
- Brasier M.D. (1992a) Background to the Cambrian Explosion. *J. Geol. Soc. London*, **149**, 585-587.
- Brasier M.D. (1992b) Nutrient-enriched waters and the early skeletal fossil record. *J. Geol. Soc. London*, **149**, 621-629.
- Brasier M.D., Lindsay J.F. (2001) Did Supercontinental Amalgamation Trigger the “Cambrian Explosion”? *The Ecology of the Cambrian Radiation*. (Eds A.Yu. Zhuravlev, R. Riding). N.Y.: Columbia University Press, 69-89.
- Budihal R.Y., Pujar G.S. (2012) Provenance and tectonic setting of Late Archaean greywackes from Dharwar craton: Karnataka, India. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, **2**(11). <http://www.ijsrp.org/research-paper-1112/ijsrp-p1182.pdf>
- Butterfield N.J. (2007) Macroevolution and macroecology through deep time. *Palaeontol.*, **50**(1), 41-55.
- Butterfield N.J. (2011) Animals and the invention of the Phanerozoic Earth system. *Trends Ecol. Evol.*, **26**(2), 81-87.
- Calvert S.E., Pedersen T.F. (1993) Geochemistry of recent oxic and anoxic sediments: implications for the geological record. *Mar. Geol.*, **113**, 67-88.
- Canfield D.E., Poulton S.W., Narbonne G.M. (2007) Late Neoproterozoic deep-ocean oxygenation and the rise of animal life. *Science*, **315**, 92-95.
- Caracciolo L., von Eynatten H., Tolosana-Delgado R., Critelli S., Manetti P., Marchev P. (2012) Petrological, geochemical, and statistical analysis of Eocene–Oligocene sandstones of the Western Thrace basin, Greece and Bulgaria. *J. Sed. Res.*, **82**, 482-498.
- Chen M., Sun M., Cai K., Buslov M.M., Zhao G., Rubanova E.S. (2014) Geochemical study of the Cambrian–Ordovician meta-sedimentary rocks from the northern Altai–Mongolian terrane, northwestern Central Asian Orogenic Belt: Implications on the provenance and tectonic setting. *J. Asian Earth Sci.*, **96**, 69-83.
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1-37.
- Condie K.C., Lee D., Lang Farmer G. (2001) Tectonic setting and provenance of the Neoproterozoic Uinta mountain and Big Cottonwood groups, northern Utah: constraints from geochemistry, Nd isotopes, and detrital modes. *Sed. Geol.*, **141-142**, 443-464.
- Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. (1995) The influence

- of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in southwestern United States. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 2919-2940.
- Cullers R.L. (1995) The control on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U.S.A. *Chem. Geol.*, **123**, 107-131.
- Cullers R.L. (2002) Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem. Geol.*, **191**, 305-327.
- Darroch S.A.F., Sperling E.A., Boag T.H., Racicot R.A., Mason S.J., Morgan A.S., Tweedt S., Myrow P., Johnston D.T., Erwin D.H. (2015) Biotic replacement and mass extinction of the Ediacara biota. *Proc. Royal Soc. B (Biol. Sci.)*, **282**, 1814, doi: 10.1098/rspb.2015.1003.
- Das B.K., Al-Mikhlafl A.S., Kaur P. (2006) Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *J. Asian Earth Sci.*, **26**, 649-668.
- Descourvieres C., Douglas G., Leyland L., Hartog N., Prommer H. (2011) Geochemical reconstruction of the provenance, weathering and deposition of detrital-dominated sediments in the Perth Basin: The Cretaceous Leederville Formation, south-west Australia. *Sed. Geol.*, **236**, 62-76.
- Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M. (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, **23**, 921-924.
- Fedonkin M.A., Gehling J.G., Grey K., Narbonne G.M., Vickers-Rich P. (2007) *The Rise of Animals: Evolution and Diversification of the Kingdom Animalia*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 326 p.
- Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments*. (2003) D.R. Lentz (Ed.). Geol. Ass. Canada. GeoText 4, 184 p.
- Grazhdankin D. (2004) Late Neoproterozoic sedimentation in the Timan foreland. *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. (Eds. D.G. Gee, V.L. Pease). L.: The Geological Society, 37-46.
- Grazhdankin D.V. (2014) Patterns of evolution of the Ediacaran soft-bodied biota. *J. Paleontol.*, **88**(2), 269-283.
- Guan C., Zhou C., Wang W., Wan B., Yuan X., Chen Z. (2014) Fluctuation of shelf basin redox conditions in the early Ediacaran: Evidence from Lantian Formation black shales in South China. *Prec. Res.*, **245**, 1-12.
- Hatch J.R., Leventhal J.S. (1992) Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. *Chem. Geol.*, **99**, 65-82.
- Harnois L. (1988) The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sed. Geol.*, **55**(3-4), 319-322.
- Hossain H.M.Z., Roser B.P., Kimura J.-I. (2010) Petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary Sylhet succession, northeastern Bengal Basin, Bangladesh: Provenance and source area weathering. *Sed. Geol.*, **228**, 171-183.
- Imchen W., Thong G.T., Ponggen T. (2014) Provenance, tectonic setting and age of the sediments of the Upper Disang Formation in the Phek District, Nagaland. *J. Asian Earth Sci.*, **88**, 11-27.
- Johnston D.T., Poulton S.W., Goldberg T., Sergeev V.N., Podkovyrov V., Vorob'eva N.G., Bekker A., Knoll A.H. (2012) Late Ediacaran redox stability and metazoan evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **335-336**, 25-35.
- Jones B., Manning D.A.C. (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.*, **111**, 111-129.
- Kolesnikov A.V., Marusin V.V., Nagovitsin K.E., Maslov A.V., Grazhdankin D.V. (2015) Ediacaran biota in the aftermath of the Kotlinian Crisis: Asha Group of the South Urals. *Prec. Res.*, **263**, 59-78.
- Kolesnikov A.V., Danelian T., Gommeaux M., Maslov A.V., Grazhdankin D.V. (2017) Arumberiamorph structure in modern microbial mats: implications for Ediacaran palaeobiology. *Bull. Soc. Géol. France*, **188**(1-2), 57-66.
- Kuznetsov N.B., Meert J.G., Romanyuk T.V. (2014) Ages of detrital zircons (U/Pb, LA-ICP-MS) from the Latest Neoproterozoic–Middle Cambrian (?) Asha Group and Early Devonian Takaty Formation, the Southwestern Urals: A test of an Australia-Baltica connection within Rodinia. *Prec. Res.*, **244**, 288-305.
- Lenton T.M., Boyle R.A., Poulton S.W., Shields-Zhou G.A., Butterfield N.J. (2014) Co-evolution of eukaryotes and ocean oxygenation in the Neoproterozoic era. *Nature Geosci.*, **7**, 257-265.
- Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. (2013) Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals. *Prec. Res.*, **236**, 16-30.
- Li C., Love G.D., Lyons T.W., Fike D.A., Sessions A.L., Chu X. (2010) A stratified redox model for the Ediacaran Ocean. *Science*, **328**, 80-83.
- Li C., Yang S. (2010) Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? *Am. J. Sci.*, **310**(2), 111-127.
- Maynard J.B., Valloni R., Ho Shing Ju (1982) Composition of modern deep-sea sands from arc-related basin. *J. Geol. Soc. Am. Spec. Publs.*, (10), 551-561.
- McLennan S.M. (1989) Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*. (Eds B.R. Lipin, G.A. McKay). *Rev. Mineral.*, **21**, 169-200.
- McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. (Eds M.J. Johnson, A. Basu). *Geol. Soc. Am. Spec. Paper*, **284**, 21-40.
- McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B. (1990) Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 2015-2050.
- Meunier A., Caner L., Hubert F., El Albani A., Pret D. (2013) The weathering intensity scale (WIS): an alternative approach of the chemical index of alteration (CIA). *Am. J. Sci.*, **313**(2), 113-143.
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry

- of lutites. *Nature*, **299**, 715-717.
- Rachold V., Brumsack H.-J. (2001) Inorganic geochemistry of Albian sediments from the Lower Saxony Basin NW Germany: palaeoenvironmental constraints and orbital cycles. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **174**, 121-143.
- Rimmer S.M. (2004) Geochemical paleoredox indicators in Devonian–Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA). *Chem. Geol.*, **206**, 373-391.
- Rogov V., Marusin V., Bykova N., Goy Yu., Nagovitsin K., Kochnev B., Karlova G., Grazhdankin D. (2012) The oldest evidence of bioturbation on Earth. *Geology*, **40**(5), 395-398.
- Rollinson H.R. (1994) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex: London Group UK Ltd., 352 p.
- Roser B.D., Korsch R.J. (1986) Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *J. Geol.*, **94**(5), 635-650.
- Roser B.D., Korsch R.J. (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.*, **67**, 119-139.
- Ryan K.M., Williams D.M. (2007) Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins. *Chem. Geol.*, **242**, 103-125.
- Sahoo S.K., Planavsky N.J., Kendall B., Wang X., Shi X., Scott C., Anbar A.D., Lyons T.W., Jiang G. (2012) Ocean oxygenation in the wake of the Marinoan glaciations. *Nature*, **489**, 546-549.
- Schroder S., Grotzinger J.P. (2007) Evidence for anoxia at the Ediacaran–Cambrian boundary: the record of redox-sensitive trace elements and rare earth elements in Oman. *J. Geol. Soc. London*, **164**, 175-187.
- Shao J.-Q., Yang S.-Y. (2012) Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin? *Chinese Sci. Bull.*, **57**(10), 1178-1187.
- Shia Y., Yua J.-H., Santosh M. (2013) Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: New evidence from geochemical, zircon U–Pb geochronology and Hf isotopes. *Prec. Res.*, **231**, 19-60.
- Tang Y., Sang L., Yuan Y., Zhang Y., Yang Y. (2012) Geochemistry of Late Triassic pelitic rocks in the NE part of Songpan-Ganzi Basin, western China: Implications for source weathering, provenance and tectonic setting. *Geosci. Front.*, **3**(5), 647-660.
- Taylor S.T., McLennan S.M. (1995) The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, **33**(2), 241-265.
- Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A. (2006) Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chem. Geol.*, **232**, 12-32.
- Turgeon S., Brumsack H.-J. (2006) Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian–Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria–Marche basin of central Italy. *Chem. Geol.*, **234**, 321-339.
- Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. (2013) New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chem. Geol.*, **355**, 117-133.
- Visser J.N.J., Young G.M. (1990) Major element geochemistry and paleoclimatology of the Permian–Carboniferous glaciogenic Dwyka Formation and post-glacial mudrocks in Southern Africa. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **81**, 49-57.
- Wedepohl K.H. (1991) The composition of the upper Earth's crust and the natural cycles of selected metals. *Metals and Their Compounds in the Environment*. (Ed. E. Merian). Weinheim: VCH-Verlagsgesellschaft, 3-17.
- Wronkiewicz D.J., Condie K.C. (1987) Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 2401-2416.

REFERENCES

- Aksenov E.M. (1985) Vend East-European platform. *Vendskaya sistema. Istoriko-geologicheskoe i paleontologicheskoe obosnovanie. T. 2. Stratigrafiya i geologicheskije processy* [The Vendian system. Historical-geological and paleontological grounding. T. 2. Stratigraphy and geological processes]. Moscow, Nauka Publ., 3-34. (In Russian)
- Armstrong-Altrin J.S., Verma S.P. (2005) Critical evaluation of six tectonic setting discrimination diagrams using geochemical data of Neogene sediments from known tectonic settings. *Sed. Geol.*, **177**, 115-129.
- Bhatia M.R. (1983) Plate tectonics and geochemical composition of sandstones. *J. Geol.*, **91**, 611-627.
- Bostrom K. (1973) The origin and fate of ferromagnesian active ridge sediments. *Stockholm Contrib. Geol.*, **27**(2), 148-243.
- Brasier M.D. (1992a) Background to the Cambrian Explosion. *J. Geol. Soc. London*, **149**, 585-587.
- Brasier M.D. (1992b) Nutrient-enriched waters and the early skeletal fossil record. *J. Geol. Soc. London*, **149**, 621-629.
- Brasier M.D., Lindsay J.F. (2001) Did Supercontinental Amalgamation Trigger the “Cambrian Explosion”? *The Ecology of the Cambrian Radiation*. (Eds A.Yu. Zhuravlev, R. Riding). N. Y.: Columbia University Press, 69-89.
- Budihal R.Y., Pujar G.S. (2012) Provenance and tectonic setting of Late Archaean greywackes from Dharwar craton: Karnataka, India. *Int. J. Sci. Res. Publ.*, **2**(11). <http://www.ijsrp.org/research-paper-1112/ijsrp-p1182.pdf>
- Butterfield N.J. (2007) Macroevolution and macroecology through deep time. *Palaeontol.*, **50**(1), 41-55.
- Butterfield N.J. (2011) Animals and the invention of the Phanerozoic Earth system. *Trends Ecol. Evol.*, **26**(2), 81-87.
- Byakov A.S., Vedernikov I.L. (2007) Evidence of anoxia at the turn of the Permian and Triassic in deep-sea facies in Northeast Asia. *Dokl. Akad. Nauk*, **417**(5), 654-656. (In Russian)
- Calvert S.E., Pedersen T.F. (1993) Geochemistry of recent oxic and anoxic sediments: implications for the geological record. *Mar. Geol.*, **113**, 67-88.
- Canfield D.E., Poulton S.W., Narbonne G.M. (2007) Late Neoproterozoic deep-ocean oxygenation and the rise of animal life. *Science*, **315**, 92-95.
- Caracciolo L., von Eynatten H., Tolosana-Delgado R., Critelli S., Manetti P., Marchev P. (2012) Petrological, geochemical, and statistical analysis of Eocene-

- Oligocene sandstones of the Western Thrace basin, Greece and Bulgaria. *J. Sed. Res.*, **82**, 482-498.
- Chen M., Sun M., Cai K., Buslov M.M., Zhao G., Rubanova E.S. (2014) Geochemical study of the Cambrian-Ordovician meta-sedimentary rocks from the northern Altai-Mongolian terrane, northwestern Central Asian Orogenic Belt: Implications on the provenance and tectonic setting. *J. Asian Earth Sci.*, **96**, 69-83.
- Condie K.C. (1993) Chemical composition and evolution of the upper continental crust: contrasting results from surface samples and shales. *Chem. Geol.*, **104**, 1-37.
- Condie K.C., Lee D., Lang Farmer G. (2001) Tectonic setting and provenance of the Neoproterozoic Uinta mountain and Big Cottonwood groups, northern Utah: constraints from geochemistry, Nd isotopes, and detrital modes. *Sed. Geol.*, **141-142**, 443-464.
- Cox R., Lowe D.R., Cullers R.L. (1995) The influence of sediment recycling and basement composition on evolution of mudrock chemistry in southwestern United States. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **59**, 2919-2940.
- Cullers R.L. (1995) The control on the major- and trace-element evolution of shales, siltstones and sandstones of Ordovician to Tertiary age in the Wet Mountains region, Colorado, U.S.A. *Chem. Geol.*, **123**, 107-131.
- Cullers R.L. (2002) Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA. *Chem. Geol.*, **191**, 305-327.
- Darroch S.A.F., Sperling E.A., Boag T.H., Racicot R.A., Mason S.J., Morgan A.S., Tweedt S., Myrow P., Johnston D.T., Erwin D.H. (2015) Biotic replacement and mass extinction of the Ediacara biota. *Proc. Royal Soc. B (Biol. Sci.)*, **282**, 1814, doi: 10.1098/rspb.2015.1003.
- Das B.K., Al-Mikhlaifi A.S., Kaur P. (2006) Geochemistry of Mansar Lake sediments, Jammu, India: Implication for source-area weathering, provenance, and tectonic setting. *J. Asian Earth Sci.*, **26**, 649-668.
- Descourvieres C., Douglas G., Leyland L., Hartog N., Prommer H. (2011) Geochemical reconstruction of the provenance, weathering and deposition of detrital-dominated sediments in the Perth Basin: The Cretaceous Leederville Formation, south-west Australia. *Sed. Geol.*, **236**, 62-76.
- Fedo C.M., Nesbitt H.W., Young G.M. (1995) Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for paleoweathering conditions and provenance. *Geology*, **23**, 921-924.
- Fedonkin M.A., Gehling J.G., Grey K., Narbonne G.M., Vickers-Rich P. (2007) *The Rise of Animals: Evolution and Diversification of the Kingdom Animalia*. Baltimore: The Johns Hopkins University Press, 326 p.
- Fedorova N.M., Levashova N.M., Meert Dzh., Maslov A.V., Krupenin M.T. (2014) New paleomagnetic data for the East European Platform for the Upper Vendian sediments of the western slope of the Middle Urals. *Dokl. Akad. Nauk*, **456**(1), 77-81. (In Russian)
- Gavrilov Yu.O., Shchepetova E.V., Baraboshkin E.Yu., Shcherbinina E.A. (2002) An anoxic Early Cretaceous basin of the Russian plate: sedimentology and geochemistry. *Litol. Polezn. Iskop.*, (4), 359-380. (In Russian)
- Geochemistry of Sediments and Sedimentary Rocks: Evolutionary Considerations to Mineral Deposit-Forming Environments. (2003) D.R. Lentz (Ed.). Geol. Ass. Canada. GeoText 4, 184 p.
- Geologiya SSSR. T. 1. Geologicheskoe opisaniye. Leningradskaya, Pskovskaya i Novgorodskaya oblasti.* (1971) V.S. Kofman, V.A. Selivanova (Otv. red.) [Geology of the USSR. V. 1. Geological description. Leningrad, Pskov and Novgorod regions. V.S. Kofman, V.A. Selivanova (Ed.-in-chief)]. Moscow, Nedra Publ., 504 p. (In Russian)
- Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossiiskoi Federatsii m-ba 1:200 000. Seriya Permskaya. List O-40-XVII (Gornozavodsk). Ob'yasnitel'naya zapiska.* (2010) [The state geological map of the Russian Federation Scale 1:200 000. Permskaya series. Sheet O-40-XVII (Gornozavodsk). Explanatory letter]. St.Petersburg, Kartograficheskaya fabrika VSEGEI Publ., 262 p. (In Russian)
- Grazhdankin D.V. (2003) Structure and depositional environment of the Vendian complex in the Southeastern White Sea area. *Stratigr. Geol. Correl.*, **11**(4), 313-331.
- Grazhdankin D. (2004) Late Neoproterozoic sedimentation in the Timan foreland. *The Neoproterozoic Timanide Orogen of Eastern Baltica*. D.G. Gee, V.L. Pease (Eds). L.: The Geological Society, 37-46.
- Grazhdankin D.V. (2014) Patterns of evolution of the Ediacaran soft-bodied biota. *J. Paleontol.*, **88**(2), 269-283.
- Grazhdankin D.V., Marusin V.V., Meert Dzh., Krupenin M.T., Maslov A.V. (2011) Kotlin regional stage in the South Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **440**(1), 1222-1226.
- Grazhdankin D.V., Maslov A.V. (2015) The room for the Vendian in the International Chronostratigraphic Chart. *Russ. Geol. Geophys.*, **56**, 549-559.
- Grazhdankin D.V., Maslov A.V., Krupenin M.T., Ronkin Yu.L. (2010) *Osadochnye sistemy sylvitskoi serii (verkhniy vend Srednego Urala)* [Sedimentary systems of the Sylvitsa Group (Upper Vendian of the Middle Urals)]. Ekaterinburg, UrO RAN Publ., 280 p. (In Russian)
- Grazhdankin D.V., Nagovitsin K.E., Maslov A.V. (2007) Late Vendian Miaohe-tupe ecological assemblage of the East European Platform. *Dokl. Earth Sci.*, **417**(1), 1183-1187.
- Grazhdankin D.V., Podkovyrov V.N., Maslov A.V. (2005) Paleoclimatic of formation of Upper Vendian rocks environments on the Belomorian-Kuloi Plateau, Southeastern White Sea Region. *Lithol. Miner. Resour.*, **40**(3), 232-244.
- Guan C., Zhou C., Wang W., Wan B., Yuan X., Chen Z. (2014) Fluctuation of shelf basin redox conditions in the early Ediacaran: Evidence from Lantian Formation black shales in South China. *Prec. Res.*, **245**, 1-12.
- Harnois L. (1988) The CIW index: a new chemical index of weathering. *Sed. Geol.*, **55**(3-4), 319-322.
- Hatch J.R., Leventhal J.S. (1992) Relationship between inferred redox potential of the depositional environment and geochemistry of the Upper Pennsylvanian (Missourian) Stark Shale Member of the Dennis Limestone, Wabaunsee County, Kansas, U.S.A. *Chem. Geol.*, **99**, 65-82.
- Hossain H.M.Z., Roser B.P., Kimura J.-I. (2010) Petrography and whole-rock geochemistry of the Tertiary Sylhet succession, northeastern Bengal Basin, Bangladesh: Provenance and source area weathering. *Sed. Geol.*, **228**, 171-183.
- Imchen W., Thong G.T., Pongen T. (2014) Provenance,

- tectonic setting and age of the sediments of the Upper Disang Formation in the Phek District, Nagaland. *J. Asian Earth Sci.*, **88**, 11-27.
- Interpretatsiya geokhimicheskikh dannyykh.* (2001) (Otv. red. E.V. Sklyarov.) [Interpretation of geochemical data. (Ed.-in-chief E.V. Sklyarov)]. Moscow, Internet Inzhiniring Publ., 288 p. (In Russian)
- Johnston D.T., Poulton S.W., Goldberg T., Sergeev V.N., Podkovyrov V., Vorob'eva N.G., Bekker A., Knoll A.H. (2012) Late Ediacaran redox stability and metazoan evolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **335-336**, 25-35.
- Jones B., Manning D.A.C. (1994) Comparison of geochemical indices used for the interpretation of palaeoredox conditions in ancient mudstones. *Chem. Geol.*, **111**, 111-129.
- Karpukhina E.V., Pervov V.A., Zhuravlev D.Z. (2001) Petrology of subalkaline volcanism – an indicator of Late Vendian rifting, the western slope of the Urals. *Petrologiya*, **9**(5), 480-503. (In Russian)
- Kholodov V.N., Nedumov R.I. (1991) On the geochemical criteria for the occurrence of hydrogen sulfide contamination in the waters of ancient reservoirs. *Izv. Akad. Nauk SSSR. Ser. geol.*, (12), 74-82. (In Russian)
- Kholodov V.N., Nedumov R.I. (2005) On the application of the molybdenum module to the reconstruction of the gas composition of the waters of the Cretaceous of the Atlantic. *Dokl. Akad. Nauk*, **400**(2), 250-253. (In Russian)
- Kolesnikov A.V., Marusin V.V., Nagovitsin K.E., Maslov A.V., Grazhdankin D.V. (2015) Ediacaran biota in the aftermath of the Kotlinian Crisis: Asha Group of the South Urals. *Prec. Res.*, **263**, 59-78.
- Kolesnikov A.V., Danelian T., Gommeaux M., Maslov A.V., Grazhdankin D.V. (2017) Arumberiamorph structure in modern microbial mats: implications for Ediacaran palaeobiology. *Bull. Soc. Geol. France*, **188**(1-2), 57-66.
- Kuznetsov N.B., Meert J.G., Romanyuk T.V. (2014) Ages of detrital zircons (U/Pb, LA-ICP-MS) from the Latest Neoproterozoic-Middle Cambrian (?) Asha Group and Early Devonian Takaty Formation, the Southwestern Urals: A test of an Australia-Baltica connection within Rodinia. *Prec. Res.*, **244**, 288-305.
- Lenton T.M., Boyle R.A., Poulton S.W., Shields-Zhou G.A., Butterfield N.J. (2014) Co-evolution of eukaryotes and ocean oxygenation in the Neoproterozoic era. *Nature Geosci.*, **7**, 257-265.
- Levashova N.M., Bazhenov M.L., Meert J.G., Kuznetsov N.B., Golovanova I.V., Danukalov K.N., Fedorova N.M. (2013) Paleogeography of Baltica in the Ediacaran: paleomagnetic and geochronological data from the clastic Zigan Formation, South Urals. *Prec. Res.*, **236**, 16-30.
- Li C., Love G.D., Lyons T.W., Fike D.A., Sessions A.L., Chu X. (2010) A stratified redox model for the Ediacaran Ocean. *Science*, **328**, 80-83.
- Li C., Yang S. (2010) Is chemical index of alteration (CIA) a reliable proxy for chemical weathering in global drainage basins? *Am. J. Sci.*, **310**(2), 111-127.
- Maslov A.V. (2005) *Osadochnyye porody: metody izucheniya i interpretatsii poluchennykh dannyykh* [Sedimentary rocks: methods for studying and interpreting the data obtained]. Ekaterinburg, UGGU Publ., 289 p. (In Russian)
- Maslov A.V. (2014) Litho-geochemical image of the Vendian Asha Group deposits of the South Urals. *Litosfera*, (1), 13-32. (In Russian)
- Maslov A.V., Gareev E.Z., Isherskaya M.V. (2012b) “Standard” discriminant paleogeodynamic diagrams and platform sandstone associations. *Otech. geologiya*, (3), 55-65. (In Russian)
- Maslov A.V., Grazhdankin D.V., Podkovyrov V.N., Krupenin M.T. (2013b) Unique features of changes of several litho-geochemical characteristics of the Upper Vendian fine-grained clastic rocks in the Mezen paleobasin. *Litosfera*, (3), 25-42. (In Russian)
- Maslov A.V., Grazhdankin D.V., Podkovyrov V.N., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P. (2008) Composition of sediment provenances and patterns in geological history of the Late Vendian Mezen basin. *Lithol. Miner. Resour.*, **43**(3), 260-280.
- Maslov A.V., Grazhdankin D.V., Podkovyrov V.N., Isherskaya M.V., Krupenin M.T., Petrov G.A., Ronkin Yu.L., Gareev E.Z., Lepikhina O.P. (2009) Provenance composition and features of geological evolution of the Late Vendian foreland basin of the Timan orogen. *Geochem. Int.*, **47**(12), 1212-1233.
- Maslov A.V., Kozina N.V., Klyuvitkin A.A., Novigatskii A.N., Filippov A.S., Shevchenko V.P. (2015e) Distribution of redox-sensitive elements in the present bottom sediments of the Caspian Sea. “*Geologiya morei i okeanov*”. Mat-ly XXI Mezhdunar. nauch. konf. (shkoly) po morskoi geologii. T. IV [Geology of the seas and oceans. Materials of XXI International. sci. Conf. (School) on Marine Geology. V. IV]. Moscow, GEOS Publ., 337-341. (In Russian)
- Maslov A.V., Krupenin M.T., Gareev E.Z., Petrov G.A. (2003a) On evaluation of redox conditions in Riphean and Vendian sedimentary basins on the western slope of the Urals. *Litosfera*, (2), 75-93. (In Russian)
- Maslov A.V., Krupenin M.T., Petrov G.A., Ronkin Yu.L., Lepikhina O.P., Kornilova A.Yu. (2007) Certain geochemical features and conditions of sedimentation of fine-grained terrigenous rocks of Serebryanka and Sylvitsa groups (Middle Urals). *Litosfera*, (2), 3-28. (In Russian)
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Gareev E.Z. (2012b) Evolution of the paleogeodynamic settings of the formation of the Lower and Middle Riphean sedimentary sequences of the Uchur-Maya region and the Bashkir meganticlinorium. *Russ. J. Pacif. Geol.*, **6**(5), 382-394.
- Maslov A.V., Podkovyrov V.N., Mizens G.A., Nozhkin A.D., Fazliyahmetov A.M., Malinovskii A.I., Hudolei A.K., Kotova L.N., Kuptsova A.V., Gareev E.Z., Zainullin R.I. (2016a) Tectonic setting discrimination diagrams for terrigenous rocks: a comparison. *Geochem. Int.*, **54**(7), 569-583.
- Maslov A.V., Ronkin Yu.L., Krupenin M.T., Petrov G.A., Kornilova A.Yu., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. (2005) Systematics of rare earth elements and model Nd age of Vendian mudstones on the western slope of the Central Urals. *Dokl. Earth Sci.*, **401**(3), 456-459.
- Maslov A.V., Ronkin Yu.L., Krupenin M.T., Petrov G.A., Kornilova A.Yu., Lepikhina O.P. (2006a) Some geochemical features of fine-grained terrigenous Vendian rocks of the western slope of the Middle Urals and paleogeodynamic reconstructions. *Otech. geologiya*, (1), 34-40. (In Russian)
- Maslov A.V., Ronkin Yu.L., Krupenin M.T., Petrov G.A., Kornilova A.Yu., Lepikhina O.P., Popova O.Yu. (2006b) Systematics of rare earth elements, Th, Hf, Sc, Co, Cr,

- and Ni in the Vendian pelitic rocks of the Serebryanka and Sylvitsa groups from the western slope of the Central Urals: a tool for monitoring provenance composition. *Geochem. Int.*, **44**(6), 559-580.
- Maslov A.V., Vovna G.M., Kiselev V.I., Ronkin Yu.L., Krupenin M.T. (2012a) U-Pb systematics of detrital zircons from the Serebryanka Group of the Central Urals. *Lithol. Miner. Resour.*, **47**(2), 160-176.
- Maslov A.V., Yalysheva A.I., Podkovyrov V.N., Glavatskikh S.P., Graunov O.V., Sergeeva N.D. (2016b) Lithochemical composition of sandstones of the Vendian Asha Group, South Urals. *Lithol. Miner. Resour.*, **51**(5), 347-374. (In Russian)
- Maynard J.B., Valloni R., Ho Shing Ju (1982) Composition of modern deep-sea sands from arc-related basin. *J. Geol. Soc. Am. Spec. Publ.*, (10), 551-561.
- McLennan S.M. (1989) Rare earth elements in sedimentary rocks: influence of provenance and sedimentary processes. *Geochemistry and mineralogy of rare earth elements*. Lipin B.R., McKay G.A. (Eds). *Rev. Miner.*, **21**, 169-200.
- McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. (1993) Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics. *Processes Controlling the Composition of Clastic Sediments*. M.J. Johnsson, A. Basu (Eds). *Geol. Soc. Amer. Spec. Paper*, **284**, 21-40.
- McLennan S.M., Taylor S.R., McCulloch M.T., Maynard J.B. (1990) Geochemical and Nd-Sr isotopic composition of deep-sea turbidites: crustal evolution and plate tectonic associations. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **54**, 2015-2050.
- Meunier A., Caner L., Hubert F., El Albani A., Pret D. (2013) The weathering intensity scale (WIS): an alternative approach of the chemical index of alteration (CIA). *Am. J. Sci.*, **313**(2), 113-143.
- Nesbitt H.W., Young G.M. (1982) Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites. *Nature*, **299**, 715-717.
- Petrov G.A., Maslov A.V., Ronkin Yu.L. (2005) Pre-paleozoic magmatic complexes of Kvarqush-Kamennogorsky anticlinorium (Middle Urals): new data on geochemistry and geodynamics. *Litosfera*, (4), 42-69. (In Russian)
- Podkovyrov V.N., Grazhdankin D.V., Maslov A.V. (2011) Lithochemistry of the Vendian fine-grained clastic rocks in the southern Vychegda trough. *Lithol. Miner. Resour.*, **46**(5), 427-446.
- Rachold V., Brumsack H.-J. (2001) Inorganic geochemistry of Albian sediments from the Lower Saxony Basin NW Germany: palaeoenvironmental constraints and orbital cycles. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **174**, 121-143.
- Rimmer S.M. (2004) Geochemical paleoredox indicators in Devonian–Mississippian black shales, Central Appalachian Basin (USA). *Chem. Geol.*, **206**, 373-391.
- Rogov V., Marusin V., Bykova N., Goy Yu., Nagovitsin K., Kochnev B., Karlova G., Grazhdankin D. (2012) The oldest evidence of bioturbation on Earth. *Geology*, **40**(5), 395-398.
- Rollinson H.R. (1994) Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Essex: London Group UK Ltd., 352 p.
- Ronkin Yu.L., Grazhdankin D.V., Maslov A.V., Mizens G.A., Matukov D.I., Krupenin M.T., Petrov G.A., Lepikhina O.P., Kornilova A.Yu. (2006) U-Pb (SHRIMP) age of zircons from ash tuffs of the Upper Vendian Chernyi Kamen formation (Sylvitsa Group, Middle Urals). *Dokl. Earth Sci.*, **411A**(9), 1341-1345.
- Ronov A.B., Khlebnikova Z.V. (1961) The chemical composition of the most important genetic types of clays. *Geokhimiya*, (6), 449-469. (In Russian)
- Roser B.D., Korsch R.J. (1986) Determination of tectonic setting of sandstone-mudstone suites using SiO₂ content and K₂O/Na₂O ratio. *J. Geol.*, **94**(5), 635-650.
- Roser B.D., Korsch R.J. (1988) Provenance signatures of sandstone-mudstone suites determined using discriminant function analysis of major-element data. *Chem. Geol.*, **67**, 119-139.
- Ryan K.M., Williams D.M. (2007) Testing the reliability of discrimination diagrams for determining the tectonic depositional environment of ancient sedimentary basins. *Chem. Geol.*, **242**, 103-125.
- Sahoo S.K., Planavsky N.J., Kendall B., Wang X., Shi X., Scott C., Anbar A.D., Lyons T.W., Jiang G. (2012) Ocean oxygenation in the wake of the Marinoan glaciations. *Nature*, **489**, 546-549.
- Schroder S., Grotzinger J.P. (2007) Evidence for anoxia at the Ediacaran–Cambrian boundary: the record of redox-sensitive trace elements and rare earth elements in Oman. *J. Geol. Soc. London*, **164**, 175-187.
- Shao J.-Q., Yang S.-Y. (2012) Does chemical index of alteration (CIA) reflect silicate weathering and monsoonal climate in the Changjiang River basin? *Chin. Sci. Bull.*, **57**(10), 1178-1187.
- Shia Y., Yua J.-H., Santosh M. (2013) Tectonic evolution of the Qinling orogenic belt, Central China: New evidence from geochemical, zircon U–Pb geochronology and Hf isotopes. *Prec. Res.*, **231**, 19-60.
- Sokolov B.S. (1980) The Vendian system: the Precambrian geobiological environment. *Paleontologiya. Stratigrafiya. Mezhdunarodnyi geologicheskii kongress. XXVI sessiya. Doklady sovetskikh geologov* [Paleontology. Stratigraphy. International Geological Congress. XXVI Session. Reports of Soviet geologists]. Moscow, Nauka Publ., 9-21. (In Russian)
- Sokolov B.S. (1995) The Vendian system and the “Neoproterozoic III”. *Stratigr. Geol. Korrel.*, **3**(6), 51-67. (In Russian)
- Sokolov B.S. (2011) Chronostratigraphic space of the lithosphere and the Vendian as a geohistorical subdivision of the Neoproterozoic. *Geol. Geofiz.*, **52**(10), 1334-1348. (In Russian)
- Strakhov N.M. (1976) *Problemy geokhimii sovremennogo okeanskogo litogeneza* [Problems of geochemistry of modern oceanic lithogenesis]. Moscow, Nauka Publ., 299 p. (In Russian)
- Strekopytov S.V., Dubinin A.V., Volkov I.I. (1995) Behavior of REE, zirconium and hafnium in sediments and concretions of the Trans-Pacific profile. *Geokhimiya*, (7), 985-997. (In Russian)
- Tang Y., Sang L., Yuan Y., Zhang Y., Yang Y. (2012) Geochemistry of Late Triassic pelitic rocks in the NE part of Songpan-Ganzi Basin, western China: Implications for source weathering, provenance and tectonic setting. *Geosci. Front.*, **3**(5), 647-660.
- Taylor S.T., McLennan S.M. (1995) The geochemical evolution of the continental crust. *Rev. Geophys.*, **33**(2), 241-265.
- Tribouillard N., Algeo T.J., Lyons T., Riboulleau A. (2006)

- Trace metals as paleoredox and paleoproductivity proxies: an update. *Chem. Geol.*, **232**, 12-32.
- Turgeon S., Brumsack H.-J. (2006) Anoxic vs dysoxic events reflected in sediment geochemistry during the Cenomanian–Turonian Boundary Event (Cretaceous) in the Umbria–Marche basin of central Italy. *Chem. Geol.*, **234**, 321-339.
- Vendskaya sistema. Istoriko-geologicheskoe i paleontologicheskoe obosnovanie. T. 2. Stratigrafiya i geologicheskie process.* (1985) (Otv. red. B.S. Sokolov, M.A. Fedonkin) [The Vendian system. Historical-geological and paleontological grounding. V. 2. Stratigraphy and geological processes. B.S. Sokolov, M.A. Fedonkin (Eds)]. Moscow, Nauka Publ., 222 p. (In Russian)
- Verma S.P., Armstrong-Altrin J.S. (2013) New multi-dimensional diagrams for tectonic discrimination of siliciclastic sediments and their application to Precambrian basins. *Chem. Geol.*, **355**, 117-133.
- Visser J.N.J., Young G.M. (1990) Major element geochemistry and paleoclimatology of the Permian–Carboniferous glaciogenic Dwyka Formation and post-glacial mudrocks in Southern Africa. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*, **81**, 49-57.
- Wedepohl K.H. (1991) The composition of the upper Earth's crust and the natural cycles of selected metals. *Metals and Their Compounds in the Environment*. E. Merian (Ed.). Weinheim: VCH-Verlagsgesellschaft, 3-17.
- Wronkiewicz D.J., Condie K.C. (1987) Geochemistry of Archean shales from the Witwatersrand Supergroup, South Africa: source-area weathering and provenance. *Geochim. Cosmochim. Acta*, **51**, 2401-2416.
- Yudovich Ya.E. (1981) *Regional'naya geokhimiya osadochnyh tolshch* [Regional geochemistry of sedimentary strata]. Leningrad, Nauka Publ., 276 p. (In Russian)
- Yudovich Ya.E., Ketris M.P. (2000) *Osnovy litokhimii* [Fundamentals of lithochemistry]. St.Petersburg, Nauka Publ., 479 p. (In Russian)