

МОНОМИНЕРАЛЬНЫЕ КВАРЦЕВЫЕ ПЕСЧАНИКИ В РАЗРЕЗАХ ДОКЕМБРИЯ И НИЖНЕГО ПАЛЕОЗОЯ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОБЛЕМЫ

© 2015 г. А. В. Маслов

По поводу вынесенной в название заметки проблемы формирования мономинеральных кварцевых песчаников/кварцаренитов/экстракварцевых песчаников (содержание кварца > 95%) достаточно давно сложились представления о том, что указанные, структурно и минералогически зрелые, образования накапливались преимущественно в мелководно-морских обстановках, где подвергались длительному переотложению, приводившему к почти полному уничтожению нестойких компонентов. Предполагалось также, что мономинеральные кварцевые песчаники присущи преимущественно стабильным тектоническим обстановкам, т.е. являются одними из наиболее ярких индикаторов последних [27, 28]. Примерно такие же представления можно найти и в современных отечественных учебниках литологии¹.

Однако со временем выяснилось, что кварцарениты являются едва ли не непременным атрибутом архейских зеленокаменных поясов, формирование которых, как полагало и полагает большинство отечественных и зарубежных специалистов, происходило в условиях тектонически активного режима и интенсивного вулканизма. Современные аналоги кварцаренитов, которые могли бы в той или иной мере пролить свет на их формирование, встречаются достаточно редко. В основном они присущи тропическим областям. Одним из наиболее исследованных зарубежных примеров являются отложения бассейна р. Ориноко [21, 37].

Интересно отметить, что еще в середине прошлого века большинство докембрийских кварцаренитов считались протерозойскими [18, 37], так как априори полагалось, что среди комплексов пород архейских зеленокаменных поясов присутствие их невозможно. С появлением достоверной геохронологической информации выяснилось, что это далеко не так. В результате среди исследователей возникла даже дискуссия относительно источника/источников столь многочисленных зерен кварца, поскольку мощность архейских квар-

царенитов достигает в ряде случаев 300–400 м и более. По мнению [18], значительная часть зерен кварца песчаной размерности в архее должна была иметь петрогенную природу и являться продуктом разрушения гранитоидов или быть переотложенной за счет разрушения более древних осадочных пород. Возможно, что некоторые архейские кварцарениты, например мономиктовые кварцевые песчаники серии Moodis зеленокаменного пояса Барбертон, – преимущественно золотые образования [32].

Как недавно было подчеркнута Г. Янгом [37], феномен присутствия рассматриваемых нами зрелых осадочных образований в разрезах архея во многом еще остается загадкой, так как к числу ассоциирующихся с ними образований относятся вулканические и магматические основные и ультраосновные породы, некоторые из которых формировались в океанических обстановках [26]. В то же время в ряде публикаций (см., например, [14]) предполагается, что кварцарениты являются отложениями тектонически активных обстановок типа рифтогенных.

Еще одним возможным объяснением достаточно широкого присутствия кварцаренитов среди архейских разрезов может быть весьма агрессивное выветривание, обусловленное высоким содержанием в ранней атмосфере CO₂ и, соответственно, кислотными дождями [15, 22, 35]. Считается также, что указанное обстоятельство в какой-то мере компенсировало и “парадокс слабой светимости молодого Солнца”.

Широкое распространение кварцарениты имеют в разрезах палеопротерозоя. Среди зарубежных примеров подобных образований можно назвать формации Lorrain и Bar River надсерии Гурон. Отложения нижней части Гурона накапливались в изолированном рифтовом бассейне и на его плечах. Верхний Гурон, начинающийся с формации Gowganda, формировался непосредственно на породах архейского фундамента во время распада суперконтинента Кенорланд [38]. Мощность белых/экстракварцевых песчаников в верхней части формации Lorrain достигает 800 м. Они перекрывают флювиальные аркозовые песчаники, постгляциальные дельтовые образования и гляциальные отложения формации Gowganda. Формация Bar River отделена от пород формации Lorrain

¹ Так, В.Г. Кузнецовым [2] отмечено, что кварцевые песчаники могут образоваться как в результате многократного переыва более древних осадочных пород, так и в условиях, когда область питания располагалась в зоне гумидного климата, что способствовало интенсивному химическому выветриванию с разрушением неустойчивых и малоустойчивых минералов.

приливно-отливными карбонатными образованиями и сульфатсодержащими алевролитами формации Gordon Lake. Накопление кварцаренитов Bar River происходило, по всей видимости, в мелководных морских обстановках, хотя ряд авторов полагает, что они могут быть и аллювиальными образованиями. По мнению [38], ассоциация гляциогенных и экстракварцевых песчаных отложений формаций Gowganda и Lorrain весьма необычна, так как накопление их происходило в различных климатических обстановках.

Среди осадочных последовательностей мезо- и неопротерозоя кварцарениты также играют существенную роль. Например, рассматриваемые как преимущественно эоловые, экстракварцевые песчаники описаны в разрезах серии Hornby Bay (~1.66 млрд лет) на северо-западе Канады [30]. Серия Ortega на севере Нью-Мексико также включает мощную (~850 м) толщу кварцаренитов, интерпретируемых как мелководно-морские шельфовые отложения первого цикла седиментации [34, 37]. К этому же типу относятся высокозрелые флювиальные отложения (~1.7 млрд лет), широко распространившиеся на юге Северной Америки (т.н. равнины Thelon и Athabasca) вслед за орогенными Mazatzal и Trans-Hudsonian [29, 36]. Эти кварцарениты накапливались в различных обстановках (флювиальных, эоловых, мелководно-морских), что дает основания предполагать влияние на них различных процессов. Кварциты Mazatzal (мощность варьирует от 400 до почти 1500 м (?)) представлены тонко- и мелкозернистыми очень крепкими (стекловидными) песчаниками с косою слоистостью и разнообразными знаками ряби. Локально в подошве данного литостратиграфического подразделения присутствуют конгломераты, мощность которых достигает 100–120 м [1].

В центральной части Северо-Американского кратона к рассматриваемым нами образованиям принадлежат кварциты Sioux (~1.47 млрд лет), несогласно и полого залегающие на подстилающих их магматических и метаморфических комплексах Южной Дакоты, Миннесоты, Айовы и Небраски. Они представлены в основном кварцитовидными кварцевыми песчаниками с подчиненными им прослоями красноцветных глинистых сланцев и аргиллитов [17]. В Висконсине аналогами кварцитов Sioux являются кварциты Baraboo (1.64–1.44 млрд лет), характеризующиеся удивительным однообразием текстурных особенностей – преобладанием однонаправленной средне- и крупномасштабной, преимущественно прямолинейной, косою слоистости, наблюдаемой без каких-либо значительных изменений пространственной ориентировки в разрезах мощностью до 1000–1200 м, а также разнообразными в основном асимметричными знаками ряби [13].

На северо-западе Мексики, в области Каборка, среди позднедокембрийских осадочных образова-

ний также присутствуют экстракварцевые песчаники [24]. Это светло-серые средне- и грубоплитчатые исключительно зрелые в минералогическом отношении псаммиты с косою слоистостью. Мощность их достигает 220 м.

В Арктической Канаде на о-ве Элсмир кристаллический фундамент с угловым несогласием перекрыт отложениями серии Thule [20]. В нижней части ее разреза преобладают силлы и потоки толеитовых базальтов (~1100–1200 млн лет), чередующиеся с красноцветными песчаниками и глинистыми сланцами. Выше лежащие образования объединяют красно- и зеленоцветные алевролиты и глинистые сланцы, а также белые и желтовато-серые экстракварцевые песчаники (т.н. четвертая толща). Мощность последних составляет 100–200 м. В них присутствует крупномасштабная (до 2 м) косою слоистость и знаки ряби. Накопление исходных осадков происходило, предположительно, в высокоэнергетических прибрежных и мелководно-морских обстановках, под влиянием вдольбереговых и приливных течений.

Формация Athabaska (площадь распространения ~40 тыс. км², север Саскачевана и Альберты, Канада) объединяет пестроокрашенные экстракварцевые песчаники и в подчиненном количестве алевролиты, глинистые сланцы, конгломераты и гравелиты. Базальные ее уровни представлены светлоокрашенными песчаниками и красноцветными конгломератами [16]. Характерные текстурные особенности песчаников – косою слоистость в виде узких “трогов”, приуроченность линз грубозернистого песчаного и галечникового материала к многочисленным промоинам и частая встречаемость пластинчатых сланцевых брекчий – указывают на то, что накопление исходных осадков происходило в чрезвычайно мелководных обстановках в условиях частого осушения, предположительно, на разветвленной аллювиальной равнине [19].

Присутствуют экстракварцевые песчаники и в разрезах т.н. системы Vindhyan (Индия). Они рассматриваются как отложения, сформированные в стабильных тектонических обстановках за счет интенсивной переработки поступающих в прибрежные зоны бассейна осадков, претерпевших к тому же влияние процессов глубокого химического выветривания на континенте [33]. В ряде районов указанные образования перекрывают граниты, которые и считаются источниками значительных объемов обломочного кварца.

В типовом разрезе рифея Южного Урала (Башкирский мегантиклинорий) экстракварцевые песчаники слагают среднерифейскую зигальгинскую свиту (~1.33 млрд лет, [6]) и лемезинскую подсвиту верхнерифейской зильмердакской свиты [3, 5]. Мощность отложений зигальгинской свиты в большинстве районов Башкирского мегантиклинория составляет первые сотни метров и только на северо-

востоке указанной структуры она не превышает 60–100 м. Здесь, так же как и в случае с Кварцитами Mazatzal, в основании разреза кварцаренитов можно видеть линзы конгломератов, преобладающая часть обломков в которых – это кварцарениты. Тектурные особенности экстракварцевых песчаников зигальгинской свиты (горизонтальная и мелкая косая одно- и разнонаправленная слоистость, знаки ряби волнения и течения, интерференционная рябь (рис. 1), волнистая слоистость, первичная линейность течения, трещины усыхания, прослои плоскогалечных брекчий, сложенных уплощенными обломками глинистых сланцев и т.п.) свидетельствуют о том, что формирование исходных осадков происходило выше базиса обычного волнения, в гидродинамически активных обстановках бассейна, отдельные участки которого временами, возможно, пересыхали.

С учетом материалов по условиям образования отложений, синхронных зигальгинским отложениям тукаевской свиты Волго-Уральской области [4], бассейн седиментации этого интервала времени в целом на территории Волго-Уральской области (*s. lato*, от Самары до Златоуста) может рассматриваться как обширный, относительно плоский водоем (на востоке), сопрягавшийся на западе с пологой прибрежно-континентальной аллювиально-дельтовой равниной. В целом зигальгинско-тукаевский уровень характеризуется относительно равномерным распределением мощностей отложений; максимальные значения характерны для районов несколько юго-юго-восточнее г. Уфы и ориентированы примерно в меридиональном направлении. По данным [7], климат первой половины среднего рифея (машакское–начало зигазино-комаровского времени) может быть оценен как семиаридный (гидрослюдистые и гидрослюдисто-хлоритовые сланцы с преобладанием К и Fe, умеренными и пониженными содержаниями Na и Mg; пределы колебаний Sr/Ba от ~0.08 до 0.17, $6 < V/Ga < 7.5$).

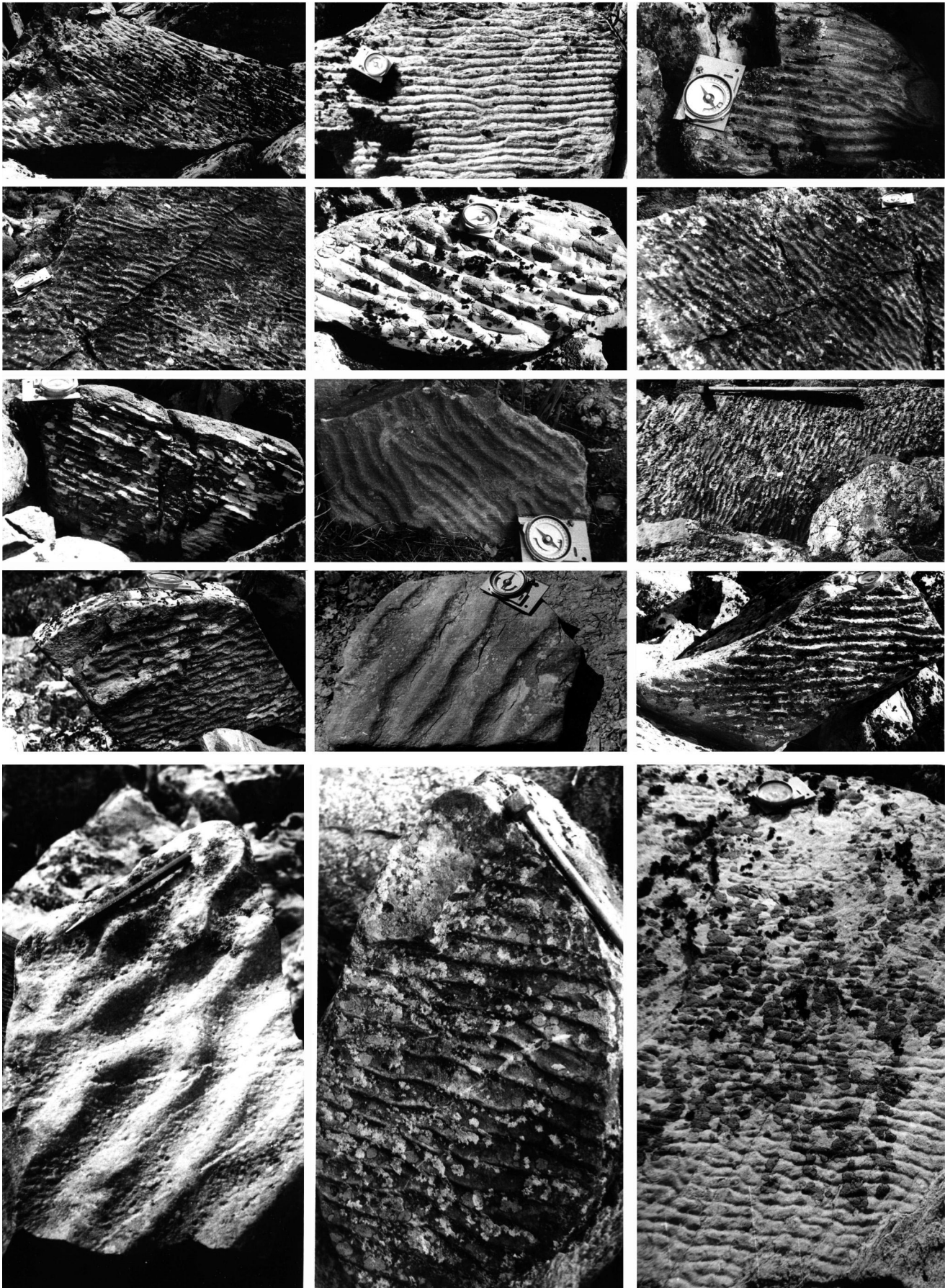
Мощность отложений лемезинской подсвиты зильмердакской свиты варьирует от 200 до 300 м. Время накопления песчаников лемезинской подсвиты характеризовалось господством мелководных и “сверхмелководных” обстановок и накоплением преимущественно песчаных и алеврито-песчаных осадков [3]. Некоторые текстурные особенности поверхностей напластования песчаников лемезинской подсвиты показаны на рис. 1. Весьма зрелый минеральный состав, умеренная и хорошая окатанность и сортировка обломочных зерен, незначительные содержания калиевых полевых шпатов при почти полном отсутствии плагиоклазов, наличие среди обломков зерен кварца с реликтами камер регенерации (часто даже двух-трех) и хорошая их окатанность, а также высокая зрелость минералов тяжелой фракции позволяют сделать предположение о том, что формирование псаммитов лемезинской подсвиты происходило в условиях интензивного химического выветривания на континенте и (дополнительно) многократного переотложения кластики в бассейне седиментации.

В песчаниках лемезинской подсвиты преобладают цирконы с неоархейскими датировками (52%). На долю палеопротерозойских цирконов приходится порядка 41%, а на долю мезоархейских – 7% [8]. Среди архейских обломочных цирконов в песчаниках лемезинской подсвиты обособляется кластер, в котором параметры детритовых цирконов совпадают с параметрами кварцевых диоритов Бакалинского блока, что позволяет рассматривать диорит-гранодиоритовый бакалинский комплекс, располагающийся фактически вплотную к ареалу распространения лемезинских песчаников и слагающий один из бортов Камско-Бельского авлакогена, как локальный источник для указанных цирконов [8, 9].

Статистически обломочные цирконы из песчаников лемезинской подсвиты древнее, чем цирконы из песчаников айской свиты. Это можно объяснить тем, что в айское время обломочный материал в область седиментации поступал из региона, простиравшегося на запад от Башкирского мегантиклинория до Волго-Сарматского орогена или даже далее. В лемезинское время на бортах Камско-Бельского авлакогена на уровень размыва были выведены комплексы пород с более древними модельными возрастными субстрата, а часть Волго-Уралии (возможно, и реликты Волго-Сарматского орогена) была перекрыта комплексами мезопротерозоя. В лемезинских песчаниках мезопротерозойских обломочных цирконов не обнаружено, это свидетельствует о том, что в осадочный бассейн этого времени силикокластика поступала из очень ограниченной области, а локальным источником были бакалинские диориты [9]. Источниками палеопротерозойских обломочных цирконов в песчаниках лемезинской подсвиты, вероятно, могли быть южновожжский и терсинский комплексы нижнего протерозоя, располагающиеся в южной части Волго-Уралии.

Широкое распространение кварцарениты имели также в кембрии и ордовике². Так, по данным [11], мощные толщи экстракварцевых песчаников этого возраста протягиваются от атлантического побережья Северной Африки до Персидского залива. Площадь их распространения приближается к 9 млн км². Присутствующие в составе псаммитов обломочные цирконы характеризуются весьма близкими к седиментационным возрастными (550–600 млн лет), что указывает, на первый взгляд, на формирование рассматриваемых образований за счет эрозии магматических пород, субсинхронных

² В.Г. Кузнецов [2] отмечает, что кварцевые песчаники достигли максимального развития именно в фанерозое, хотя Г. Янг [37] считает иначе.



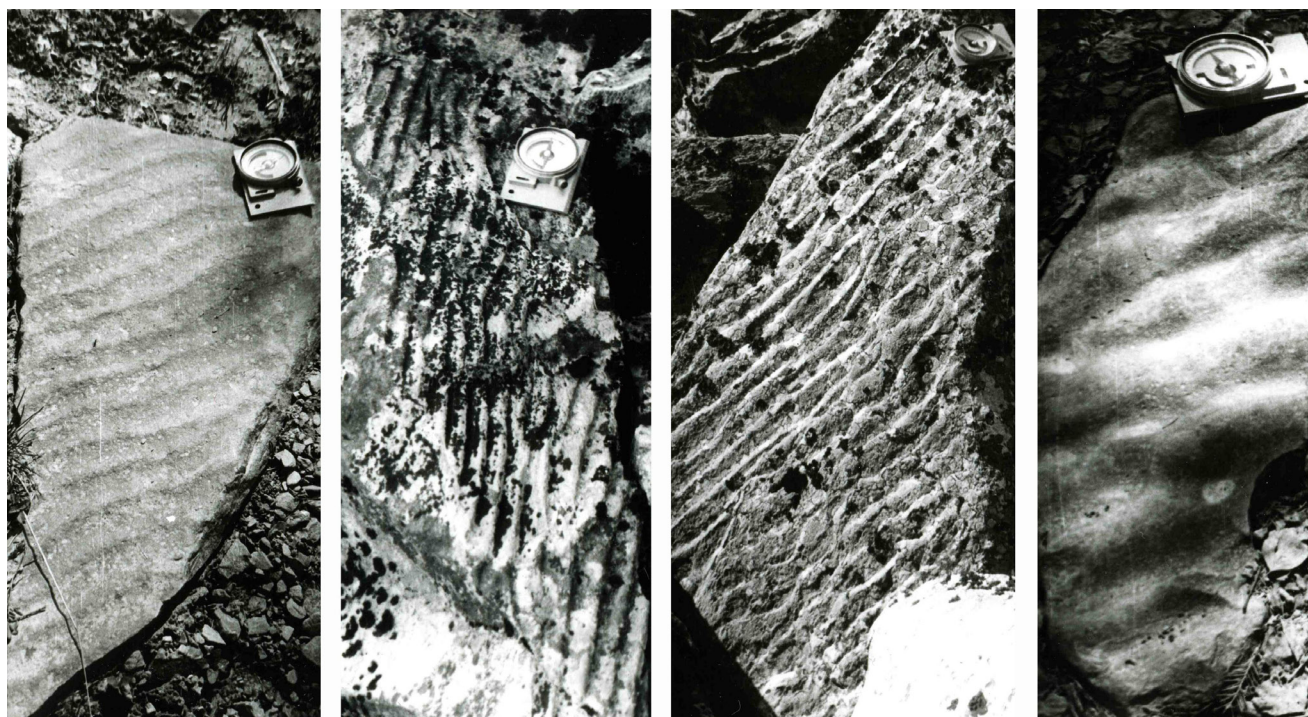


Рис. 1. Текстуры особенностей поверхностей напластования экстракварцевых песчаников зигальгинской свиты и лемезинской подсвиты зильмердакской свиты.

Пан-Африканской орогении [11]. Однако позднейшие исследования [25] позволили установить, что большинство обломочных цирконов имеют отрицательные значения $Hf(t)$. Тем самым были поставлены под сомнение представления о преимущественно локальных/ювенильных источниках громадного объема песчаных зерен кварца; скорее всего, последние поступали в область седиментации за счет эрозии древней коры, переработанной во время Пан-Африканской амальгамации Гондваны. Однако и в той, и в другой моделях формирование экстракварцевых песчаников связано с интенсивным/быстрым разрушением незначительно более древних магматических/орогенных поднятий, что можно объяснить, только привлекая представления о кратковременных периодах резкого (до 20 раз и более) роста содержания CO_2 в атмосфере [12]. Сходные с описанными выше мощные толщи кварцаренитов известны в Cape Fold Belt на юго-западном окончании Африки [31], где они перекрывают неопротерозойско-кембрийские границы, выступавшие источниками обломочного кварца. Таким образом, внеширотное распространение кембро-ордовикских кварцитов позволяет предполагать, что формирование их было в существенной степени обусловлено агрессивным выветриванием в условиях богатой CO_2 атмосферы.

Примером подобного рода образований на Южном Урале и в Предуралье является такагинская свита девона, также сложенная преимущественно экстракварцевыми песчаниками. Обломочные цир-

коны из песчаников такагинской свиты характеризуются спектром U–Pb-изотопных возрастов от 3050 до 1860 млн лет [23]. Примерно 18% цирконов этой популяции имеют мезоархейские возраста, около 30% – неорхейские, а 52% – это палеопротерозойские.

Таким образом, кварцарениты/экстракварцевые песчаники распространены на протяжении существенной части геологической летописи. Основными факторами их формирования являются: 1) наличие пород – источников значительных объемов кварцевых частиц песчаной размерности (породы – источники “гранитного” типа); 2) накопление в пределах крупных в той или иной мере погружающихся областей; 3) интенсивное химическое и длительное физическое выветривание, ведущее к уничтожению нестойких компонентов осадков; 4) определенная, но до сих пор не вполне понятная взаимосвязь ряда мощных толщ кварцаренитов с гляциальными отложениями. Возможно, это как-то отражает интенсификацию процессов выветривания, вызванную увеличением концентрации CO_2 в атмосфере, происходящей субсинхронно с некоторыми гляциальными фазами. Следовательно, от архея к концу палеозоя или мезозоя (?) наблюдается определенная эволюция обстановок формирования экстракварцевых псаммитов, в той или иной мере отражающая эволюцию состава экзосферы нашей планеты.

Исследования проведены при финансовой поддержке проекта УрО РАН 12-П-5-1004.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Докембрий Тихоокеанского подвижного пояса. М.: Наука, 1973. 179 с.
2. Кузнецов В.Г. Литология. Основы общей (теоретической) литологии. М.: Науч. мир, 2011. 544 с.
3. Маслов А.В. Литология верхнерифейских отложений Башкирского мегантиклинория. М.: Наука, 1988. 133 с.
4. Маслов А.В., Ишерская М.В. Осадочные ассоциации рифея Волго-Уральской области (условия формирования и литофациальная зональность). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 1998. 286 с.
5. Маслов А.В., Крупенин М.Т., Гареев Э.З., Анфилов Л.В. Рифей западного склона Южного Урала (классические разрезы, седименто- и литогенез, минералогия, геологические памятники природы). Екатеринбург: ИГГ УрО РАН, 2001. Т. I. 351 с.
6. Овчинникова Г.В., Кузнецов А.Б., Васильева И.М., Горохов И.М., Крупенин М.Т., Гороховский Б.М., Маслов А.В. Pb-Pb возраст и Sr-изотопная характеристика среднерифейских фосфоритовых конкреций: зигазино-комаровская свита Южного Урала // Докл. АН. 2013. Т. 451, № 4. С. 430–434.
7. Подковыров В.Н., Гареев Э.З. Эволюция составов терригенных пород юрматинской серии рифея Южного Урала // Геологическое изучение и использование недр. Науч.-техн. информ. сб. М.: Геоинформмарк, 1995. Вып. 1. С. 25–36.
8. Романюк Т.В., Маслов А.В., Кузнецов Н.Б., Белоусова Е.А., Ронкин Ю.Л., Крупенин М.Т., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н., Серегина Е.С. Первые результаты U-Pb LA-ICP-MS датирования детритных цирконов из верхнерифейских песчаников Башкирского антиклинория (Южный Урал) // Докл. АН. 2013. Т. 452, № 6. С. 642–645.
9. Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Ронкин М.Т., Ронкин Ю.Л., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н. Геохимическая и Lu/Hf-изотопная (LA-ICP-MS) систематика детритных цирконов из песчаников базальных уровней стратотипа рифея // Докл. АН. 2014. Т. 459, № 3. С. 340–344.
10. Романюк Т.В., Кузнецов Н.Б., Маслов А.В., Белоусова Е.А., Ронкин Ю.Л., Горожанин В.М., Горожанина Е.Н. Геохимическая и (LA-ICP-MS) Lu-Hf-систематика детритных цирконов из лемезинских песчаников верхнего рифея Южного Урала // Докл. АН. 2013. Т. 453, № 6. С. 657–661.
11. Avigad D., Sandler A., Kolodner K., Stern R.J., McWilliams M., Miller N., Beyth M. Mass-production of Cambro-Ordovician quartz-rich sandstone as a consequence of chemical weathering of Pan-African terranes. Environmental implications // Earth Planet. Sci. Lett. 2005. V. 240. P. 818–826.
12. Berner R.A., Kothavala Z. GEOCARB III, a revised model of atmospheric CO₂ over Phanerozoic time // Am. J. Sci. 2001. V. 301. P. 182–204.
13. Brett G.W. Cross-bedding in the Baraboo Quartzite of Wisconsin // J. Geol. 1955. V. 63, No. 2. P. 143–148.
14. Chakraborty T., Sensarma S. Shallow marine and coastal eolian quartzarenites in the Neoproterozoic-Palaeoproterozoic Karutola Formation, Dongargarh volcano-sedimentary succession, central India // Prec. Res. 2008. V. 162. P. 284–301.
15. Chandler F.W. Quartz arenites, a review and interpretation // Sed. Geol. 1988. V. 58. P. 105–126.
16. Currie K.L. Geological notes on the Carswell circular structure, Saskatchewan (74K) // Geol. Surv. Canada. Paper 67-32. 1969. 60 p.
17. Denison R.E., Lidiak E.G., Bickford M.E., Kisvarsanyi E.B. Geology and Geochronology of Precambrian Rocks in the Central Interior Region of the United States // U.S. Geol. Surv. Prof. Paper, 1241-C. 1984. 20 p.
18. Donaldson J.A., de Kemp E.A. Archean quartz arenite of the Canadian Shield, examples from Superior and Churchill Province // Sed. Geol. 1998. V. 120. P. 153–176.
19. Fahrig W.H. Basin analysis of the Athabasca sedimentary basin // Geol. Surv. Canada. Paper 71-1A. 1971. P. 128.
20. Frisch T., Christie R.L. Stratigraphy of the Proterozoic Thule Group, southeastern Ellesmere island, Arctic Archipelago / Geol. Surv. Canada. 1982. Paper 81-19. 13 p.
21. Johnsson M.J., Stallard R.F., Meade R.H. First-cycle quartz arenites in the Orinoco River Basin, Venezuela and Columbia // J. Geol. 1988. V. 96. P. 263–277.
22. Kasting J.F., Ackerman T.P. Climatic consequences of very high carbon dioxide levels in the Earth's early atmosphere // Science. 1986. V. 234. P. 1383–1385.
23. Kuznetsov N.B., Meert J.G., Romanyuk T.V. 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. 2014. V. 244. P. 288–305.
24. Merriam R., Eells J.L. Reconnaissance geological map of the Caborca Quadrangle, Sonora, Mexico // Bol. Dpto. Geol. Uni-Son. V. 1, No. 2. P. 87–94.
25. Morag N., Avigad D., Gerdes A., Belousova E., Harlavan Y. Detrital zircon Hf isotopic composition indicates long distance transportation of North Gondwana Cambrian–Ordovician sandstones // Geology. 2011. V. 39. P. 955–958.
26. Nesbitt H.W., Young G.M., Bosman S.A. Major and trace element geochemistry and genesis of supracrustal rocks of the North Spirit Lake greenstone belt, NW Ontario, Canada // Prec. Res. 2009. V. 174. P. 18–34.
27. Ojakangas R.W. Petrography and sedimentation of the Precambrian Jatulian quartzites of Finland / Bulletin de la Commission Géologique de Finland. 1965. No. 214. 74 p.
28. Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. Sand and Sandstone. Springer-Verlag. 1987. 553 p.
29. Rainbird R.H., Young G.M. Colossal rivers, massive mountains and supercontinents, was everything bigger in the past // Earth. 2009. V. 54. P. 52–61.
30. Ross G.M. Proterozoic aeolian quartz arenites from the Hornby Bay Group, Northwest Territories, Canada, implications for Precambrian aeolian processes // Prec. Res. 1983. V. 20. P. 149–160.
31. Rust I.C. Lower Paleozoic rocks of southern Africa // Lower Palaeozoic of the Middle East, Southern Africa, and Antarctica. Holland C.H. (Ed.). John Wiley & Sons Ltd. 1981. P. 165–187.
32. Simpson E.L., Eriksson K.A., Mueller W. 3.2 Ga eolian deposits from the Moodies Group, Barberton Greenstone Belt, South Africa; Implications for the origin of first-cycle quartz sandstones // Prec. Res. 2012. V. 214–

215. P. 185–191.
33. *Singh I.B.* Precambrian sedimentary sequences of India: their peculiarities and comparison with modern sediments // *Prec. Res.* 1980. V. 12. P. 411–436.
 34. *Soegaard A., Eriksson K.A.* Origin of thick, first-cycle quartz arenite successions, evidence from the 1.7 Ga Ortega Group, northern New Mexico // *Prec. Res.* 1989. V. 43. P. 129–141.
 35. *Walker J.C.G.* Carbon dioxide on the early Earth // *Orig. Life.* 1986. V. 16. P. 117–127.
 36. *Young G.M.* Proterozoic (b1.7 B.y.) stratigraphy, paleocurrents and orogeny in North America // *Egypt. J. Geol.* 1978. V. 22. P. 45–64.
 37. *Young G.M.* Secular changes at the Earth's surface; evidence from palaeosols, some sedimentary rocks, and palaeoclimatic perturbations of the Proterozoic Eon // *Gondwana Res.* 2013. V. 24. P. 453–467.
 38. *Young G.M., Nesbitt H.W.* The lower Gowganda Formation in the southern part of the Huronian outcrop belt, Ontario, Canada, stratigraphy, depositional environments and regional tectonic significance // *Prec. Res.* 1985. V. 29. P. 265–301.
 39. *Young G.M., Nesbitt H.W.* Paleoclimatology and provenance of the glaciogenic Gowganda Formation (Paleoproterozoic), Ontario, Canada. A chemostratigraphic approach // *GSA Bull.* 1999. V. 111. P. 264–274.