

УДК 550.42:551.72(571.56)

ОБЛАСТИ СНОСА И ИСТОЧНИКИ РИФЕЙСКИХ ПЕСЧАНИКОВ УЧУРО-МАЙСКОГО РЕГИОНА (ВОСТОЧНАЯ СИБИРЬ): РЕЗУЛЬТАТЫ ГЕОХИМИЧЕСКИХ И Sm-Nd ИЗОТОПНО-ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

© 2007 г. В. Н. Подковыров, Л. Н. Котова, А. Б. Котов, В. П. Ковач,
О. В. Граунов, Н. Ю. Загорная

Институт геологии и геохронологии докембрия РАН, Санкт-Петербург

Поступила в редакцию 02.06.2005 г., получена после доработки 25.04.2006 г.

На основе геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований показано, что накопление песчаных отложений протоплатформенного чехла юго-восточной части Сибирской платформы на протяжении рифея было обусловлено, главным образом, поступлением первичного и рециклированного осадочного материала, образовавшегося за счет разрушения пород магматических и метаморфических комплексов восточной части Алданского щита в ходе денудации раннепротерозойского аккреционного орогена, формирование которого завершилось к 1.9 млрд. лет. Первые признаки поступления в бассейны седиментации рифейского эндогенного материала устанавливаются начиная с тотгинского времени среднего рифея. Это отражает вовлечение в осадконакопление продуктов выветривания и размыва внешних по отношению к платформе рециклированных орогенов и синхронных осадконакоплению вулканитов, маркирующих начало развития рифтогенного бассейна краевой части платформы. Наиболее вероятно, что области сноса этого материала располагались к востоку и юго-востоку от Юдомо-Майского прогиба.

Ключевые слова. Рифей, песчаники, геохимический состав, Sm-Nd систематика, области сноса, Учуро-Майский регион, Восточная Сибирь.

В пределах Учуро-Майского региона (рис. 1) выделены наиболее полные осадочные последовательности протоплатформенного чехла Сибирской платформы, которые рассматриваются как сибирский гипостратотип рифея (Семихатов, Серебряков, 1983) и тип венда (юдомия) (Семихатов и др., 1970, 2004). В результате выполненных на сегодняшний день геохимических и изотопно-геохимических исследований показано (Котова, Подковыров, 1998, 2000, 2001; Подковыров и др., 2002; Подковыров и др., 2003; Rainberd et al., 1998; Cullers, Podkovurov, 2000, 2002; Khudoley et al., 2001), что главным источником силикокластического материала рифейских терригенных пород этого региона послужили породы раннедокембрийских магматических и метаморфических комплексов Алданского щита. В то же время остается не до конца ясным, где располагались области сноса осадочного материала на разных этапах эволюции позднедокембрийских бассейнов седиментации и каков был относительный вклад процессов рециклирования осадков и поступления петрогенного материала первых циклов, включая и возможный размыв магматических пород рифея. В настоящей статье эти проблемы рассматриваются на основании результатов геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований рифейских песчаных пород.

ОСАДОЧНЫЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТИ РИФЕЯ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ОКРАИНЫ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Осадочные последовательности рифея юго-восточной окраины Сибирской платформы наиболее хорошо изучены в пределах платформенной впадины Учуро-Майской плиты и Юдомо-Майского окраинно-платформенного прогиба (Нужнов, 1967; Рифейские отложения..., 1973; Семихатов, Серебряков, 1983; Подковыров, 1997; Khudoley et al., 2001). В современных стратиграфических схемах (Семихатов, Серебряков, 1983; Semikhatov, 1991) в разрезе сибирского гипостратотипа рифея выделяют (снизу вверх): учурскую (нижний рифей), аимчанскую и керпыльскую (средний рифей) и, наконец, лахандинскую и уйскую (верхний рифей) осадочные серии (табл. 1). При этом разрез рифейских отложений Учуро-Майской плиты начинается с тотгинской свиты среднего рифея. Степень эпигенетических изменений рифейских осадочных пород юго-восточной окраины Сибирской платформы, как правило, не превышает стадии позднего катагенеза. Только в основании разреза рифея Юдомо-Майского прогиба (Горностахский антиклинорий) эпигенетические изменения достигают стадии метагенеза (Волкодав и др., 1978).

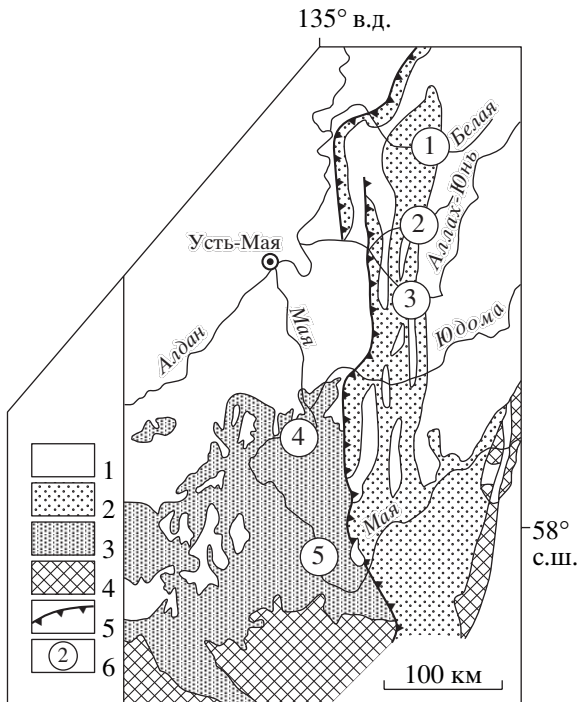


Рис. 1. Схема геологического строения Учуро-Майского региона Восточной Сибири (Семихатов, Серебряков, 1983) и расположения основных изученных разрезов.

1 – фанерозой; 2–3 – рифей и венд нерасчлененные: 2 – Юдомо-Майский прогиб, 3 – Майская плита; 4 – дорифейский фундамент; 5 – краевой шов Сибирской платформы; 6 – изученные разрезы и их номера (1 – восточное крыло Горностахского антиклинория (р. Белая), 2 – среднее течение р. Сахары, 3 – хребет Улахан-Бам, 4 – район р. Мая между р. Неруен и р. Большой Кандык, 5 – район р. Мая ниже устья р. Маймакан).

Нижний рифей. Учурская серия на северо-востоке региона в пределах Юдомо-Майского прогиба (Горностахский антиклинорий, р. Белая) сложена пестроцветными преимущественно ритмично-слоистыми терригенными (трехгорная свита) и терригенно-карбонатными (димская свита) отложениями. Косо- и волнисто-слоистые аркозовые и олигомиктовые песчаники слагают нижние части трансгрессивных, а в кровле серии и верхние слои регрессивных терригенно-карбонатных циклитов (Семихатов, Серебряков, 1983). Анализ осадочных текстур и палеотечений показал, что накопление отложений учурской серии происходило в отдельных мелководных морских бассейнах, куда поступал материал платформенных кор выветривания, формировавшихся в условиях заметной аридизации климата (Котова, Подковыров, 2001; Подковыров и др., 2002; Khudoley et al., 2001).

Средний рифей. В трансгрессивно налегающих на нижнерифейские терригенно-карбонатные отложения среднего рифея песчаные породы распространены в тальинской свите аймчанской

серии развитой, главным образом, в Юдомо-Майском прогибе и в широко распространенной в регионе тотгинской свите, маркирующей начало следующего, керпыльского цикла осадконакопления. Другие свиты среднего рифея (светлинская, малгинская и ципандинская) сложены преимущественно карбонатными породами (табл. 1).

В тальинской свите преобладают горизонтально- и косослоистые кварцевые песчаники с хорошей сортировкой и окатанностью обломочных зерен. Трещины усыхания и знаки волновой ряби свидетельствуют о преобладании супралиторальных и литоральных обстановок подвижного морского мелководья, сменяющихся к концу тальинского времени более глубоководными и спокойными обстановками нижней литорали (тонкозернистые, горизонтально слоистые песчаники в переслаивании с алевролитами и аргиллитами). В разрезе тотгинской свиты крупнозернистые плохо сортированные кварцевые и субаркозовые песчаники сменяются мелкозернистыми аркозо-граувакковыми песчаниками, которые ассоциируют с глинистыми сланцами, что указывает на трансгрессивную направленность осадконакопления, сопровождавшегося постепенной сменой мелководных сублиторальных обстановок более глубоководными.

Верхний рифей. В разрезах верхнего рифея песчаные породы широко распространены только в верхней, уйской серии. Лахандинская серия сложена мощными глинисто-карбонатными толщами, почти не содержащими прослоев песчаников.

Для нижней, кандыкской свиты уйской серии Майской плиты характерно тонкое переслаивание кварцевых, реже субаркозовых песчаников и алевроаргиллитов. Накопление этих пород происходило в динамически активных обстановках сублиторали и верхней литорали в условиях медленной трансгрессии моря. В пределах Юдомо-Майского прогиба в нижней части уйской серии наблюдается чередование косо- и волнисто-слоистых кварцевых, реже аркозовых песчаников с алевролитами и аргиллитами. Тонкая цикличность, широкое распространение трещин усыхания и знаков волновой ряби указывает на формирование трансгрессивного цикла осадков в проксимальных аллювиально-дельтовых и сублиторальных морских обстановках (Сухоруков, 1986; Котова, Подковыров, 2001; Rainbird et al., 1998; Khudoley et al., 2001).

Для верхней части уйской серии характерна резкая фациальная изменчивость. В разрезах устькирбинской свиты Учуро-Майской плиты преобладают тонкослоистые алевролиты и аргиллиты в ассоциации с кварцевыми и субаркозовыми песчаниками, формировавшимися в дистальных обстановках спокойного морского мелководья. В Юдомо-Майском прогибе верхнеуйская трансгрессивная последовательность включает аллювиально-дельтовые и склоновые турбидитовые отложения (Сухоруков, 1986), которые содержат

Таблица 1. Положение изученных образцов песчаных пород в сводном стратиграфическом разрезе рифея Учуро-Майского региона

Отдел	Серия	Свита	Район (рис. 1)	№ образца (№ п/п в табл. 2, 3)	Учуро-Майская плита	Юдомо-Майский прогиб	
Верхний рифей	Уйская	Устькирбинская	2	85-12 (18)		Алевролит, $T_{Nd}(DM) = 2.0$ млрд. лет	
			2	85-5 (17)		Алевролит	
			3	104-9 (16)		Граувакковый песчаник	
			3	104-45 (15)		Граувакковый песчаник	
		Кандыкская	5	71-10 (14)	Граувакковый песчаник, $T_{Nd}(DM) = 1.7$ млрд. лет		
			5	71-20 (13)	Кварцевый песчаник		
			4	78-37 (12)	Кварцевый песчаник, $T_{Nd}(DM) = 2.3$ млрд. лет		
		Лахандинская	Игниканская				
	Неруенская						
	Средний рифей	Керпыльская	Ципандинская				
Малгинская							
				Тотгинская	5	74-6	Граувакковый песчаник, $T_{Nd}(DM) = 1.8$ млрд. лет
			5		74-13 (11)	Граувакковый песчаник	
5			74-21 (10)		Граувакковый песчаник (Na), $T_{Nd}(DM) = 2.3$ млрд. лет		
1			55-73 (9)			Граувакковый песчаник, $T_{Nd}(DM) = 2.3$ млрд. лет	
Аимчанская		Светлинская					
		Талынская	1	55-32 (8)		Кварцевый песчаник, $T_{Nd}(DM) = 2.8$ млрд. лет	
	1		55-2 (7)		Кварцевый песчаник, $T_{Nd}(DM) = 2.2$ млрд. лет		
Нижний рифей	Учурская	Димская	1	58-28 (6)		Алевролитовый песчаник (К-Са)	
			1	58-15 (5)		Аркозовый песчаник (Na), $T_{Nd}(DM) = 2.4$ млрд. лет	
			1	57-25 (4)		Аркозовый песчаник (К), $T_{Nd}(DM) = 2.4$ млрд. лет	
			1	57-10 (3)		Аркозовый песчаник (К-Са)	
		Трехгорная	1	54-14 (2)		Аркозовый песчаник (К-Са)	
			1	54-17 (1)		Аркозовый песчаник (К), $T_{Nd}(DM) = 2.4$ млрд. лет	

Примечание. Серым цветом выделены свиты, сложенные преимущественно карбонатными породами.

многочисленные силлы и покровы габбро-диабазов, а на юго-востоке прогиба нарастаются вулканогенно-терригенными отложениями, выделяемыми в местную майамканскую толщу (Rainbird et al., 1998; Khudoley et al., 2001). В горизонтах турбидитов песчаники представлены граувакковыми и лититовыми разностями, которые формировались преимущественно за счет размыта местных поднятий фундамента, тогда как основным источником вещества субаркозов и кварцитов являлся рециклированный материал пород фундамента Сибирской платформы и подстилающие осадки рифея (Котова, Подковыров, 2001; Khudoley et al., 2001; Cullers, Podkovyrov, 2002).

Анализ осадочных текстур и индикаторов палеотечений показал, что области сноса терригенных отложений раннего и среднего рифея были расположены в пределах Сибирской платформы, несколько западнее и северо-западнее Юдомо-Майского прогиба (Семихатов, Серебряков, 1983; Khudoley et al., 2001). Кроме того, для талынского и тоттинского времени среднего рифея нельзя исключать привноса осадочного материала из областей сноса, располагавшихся к югу и востоку от Учуро-Майского бассейна (Батомгское поднятие фундамента) (Семихатов, Серебряков, 1983; Котова, Подковыров, 2001; Khudoley et al., 2001). Для терригенных отложений лахандинской серии верхнего рифея, судя по анализу фаций и индикаторов палеотечений, области сноса располагались на западе – в пределах Алданского щита и прилегающих территорий (Давыдов, 1975; Cullers, Podkovyrov, 2000). Песчаники уйской серии формировались не только за счет расположенных к западу структур Сибирской платформы, но и за счет восточных источников сноса, располагавшихся в пределах современного Охотского массива или гипотетического рециклированного орогена Лаврентии (Гаврильев, 1975; Котова, Подковыров, 2001; Khudoley et al., 2001; Cullers, Podkovyrov, 2002).

АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ

Для геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований использованы представительные образцы песчаников различных стратиграфических подразделений рифея Учуро-Майской плиты и Юдомо-Майского прогиба (табл. 1). Определение содержаний главных элементов в породах выполнено рентгенофлуоресцентным методом (ВСЕГЕИ, г. Санкт-Петербург), а содержаний элементов-примесей (PЗЭ, Li, Be, Sc, Cu, Zn, Ga, Y, Nb, Cs, Hf, Ta, Th, U) – методом ICP MS (ИАНП РАН, Санкт-Петербург) с относительной погрешностью 5–10%.

Методика Sm-Nd изотопных исследований описана в работе (Котов и др., 1995). Уровень холостого опыта за время измерений составил 0.03–0.2 нг для Sm и 0.1–0.5 нг для Nd. Измеренные от-

ношения $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ нормализованы к отношению $^{146}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.7219$ и приведены к отношению $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511860$ в Nd стандарте La Jolla. Точность определения концентраций Sm и Nd составила $\pm 0.5\%$ (2σ), изотопных отношений $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} - \pm 0.5\%$, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} - 0.005\%$. Средневзвешенное значение $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ в Nd стандарте La Jolla по результатам 11 измерений составляет 0.511894 ± 8 (2σ). При расчете величин $\epsilon_{\text{Nd}}(0)$ и модельных возрастов $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ использованы современные значения CHUR по (Jacobsen, Wasserburg, 1984) ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$) и DM по (Goldstein, Jacobsen, 1988) ($^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.513151$, $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.2136$).

ПЕТРОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕСЧАНИКОВ

Ранее на основе петрохимической типизации песчаных пород было показано (Котова, Подковыров, 2001), что в раннем рифее в пределах Юдомо-Майского прогиба (трехгорная и димская свиты) формировались преимущественно высококальциевые аркозовые песчаники, а в среднем рифее (талынская свита) – кварцевые песчаники. Для тоттинской свиты среднего рифея повсеместно характерны граувакковые песчаники. Силикокластические породы уйской серии позднего рифея (кандыкская и устькирбинская свиты) изменяются по составу от кварцевых песчаников до граувакковых алевролитов. При этом для устькирбинской свиты Юдомо-Майского прогиба более характерны граувакковые песчаники и алевролиты с глинистым матриксом, тогда как в разрезах уйской серии Учуро-Майской плиты повсеместно доминируют кварцевые песчаники.

Рифейские песчаники Учуро-Майского региона характеризуются значительными вариациями величин петрохимических модулей (Котова, Подковыров, 2001), что свидетельствует о разнообразии состава и расположения источников сноса, также о вариациях палеогеографических, климатических и геодинамических условий их формирования.

Химический состав и петрохимические классификационные параметры представительных образцов песчаных пород различных стратиграфических подразделений рифея Учуро-Майского региона приведены в табл. 2. В данной работе использована классификационная диаграмма FRQ (Розен, 1993), основанная на нормативном минеральном составе осадочных пород, которая позволяет выделить среди рассматриваемых силикокластических пород три основные группы: кварцевые песчаники, аркозо-граувакковые песчаники и граувакковые пелиты (рис. 2).

Как видно на рис. 2, большая часть фигуративных точек составов песчаников различных свит нижнего, среднего и верхнего рифея как Учуро-Майской плиты, так и Юдомо-Майского прогиба

располагается в поле аркозов и граувакк. В поле кварцевых песчаников попадают анализы песчаных пород талынской свиты Юдомо-Майского прогиба и кандыкской свиты Учуро-Майской плиты, в поле граувакк – точки составов песчаников устькирбинской свиты верхнего рифея Юдомо-Майского прогиба и отдельные составы песчаников нижнего рифея, а часть фигуративных точек составов песчаников нижнего рифея Юдомо-Майского прогиба располагается в поле граувакковых пелитов.

Песчаники нижнего рифея (трехгорная и димская свиты), по классификации Ф. Петтиджона (Петтиджон и др., 1976), относятся, главным образом, к аркозам, тогда как на диаграмме FPQ (рис. 2, обр. 1–6, табл. 2) точки их составов попадают в разные поля, и в том числе в поле граувакковых пелитов, что по петрографическим данным обусловлено высоким содержанием в этих образцах глинисто-карбонатного матрикса, отражающегося в повышенных содержаниях нормативных иллита и доломита. Подобным же образом точки составов алевролитов устькирбинской свиты верхнего рифея Юдомо-Майского прогиба располагаются на границе полей граувакк и граувакковых пелитов, отражая повышенное содержание в них слюдисто-хлоритового матрикса (рис. 2, табл. 2, обр. 17 и 18).

Граувакковые песчаники различных стратиграфических уровней среднего (тоггинская свита, рис. 2, обр. 9–11) и верхнего рифея (уйская серия, рис. 2, обр. 14–16) близки по составу и образуют компактную группу на границе полей аркозовых, кварцевых и граувакковых песчаников. В эту же область попадают точки составов некоторых аркозовых (суущественно калишпатовых, обр. 1, 4, табл. 2, рис. 2) песчаников нижнего рифея, которые отличаются от граувакковых песчаников по содержанию и соотношению щелочей.

Обращает на себя внимание, что кварцевые и граувакковые песчаники среднего и верхнего рифея характеризуются наиболее высокой железистостью ($F = 65–90\%$) по сравнению с другими песчаниками региона, в которых железистость варьирует от 15 до 58%. Величина CIA для большинства рассматриваемых песчаников варьирует от 51 до 67 (табл. 2) и закономерно увеличивается с увеличением доли глинистой составляющей.

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕСЧАНИКОВ

Данные о распределении малых и редкоземельных элементов в рифейских песчаниках Учуро-Майского региона приведены в табл. 3 и на рис. 3.

Песчаники учурской серии Юдомо-Майского прогиба (рис. 3а) характеризуются сходными спектрами распределения редкоземельных элементов (РЗЭ) при варьирующем суммарном их

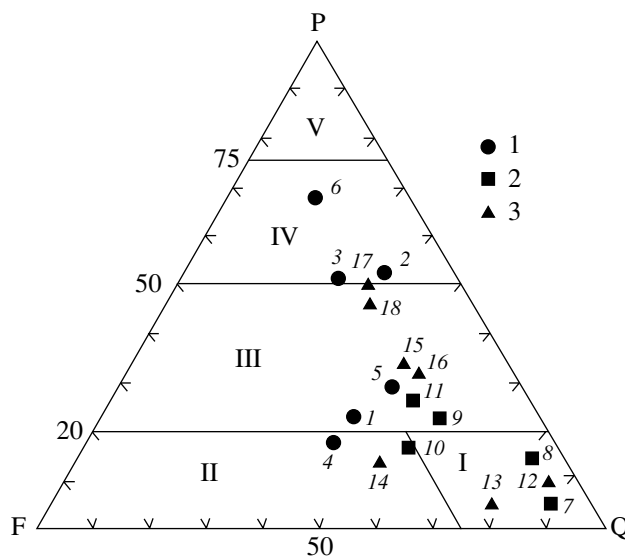


Рис. 2. Классификационная диаграмма FPQ (Розен, 1993) для песчаных пород рифея Учуро-Майского региона.

Поля осадочных пород: I – кварцевые песчаники, II – аркозы, III – граувакки, IV – граувакковые пелиты, V – пелиты. Песчаники: 1 – нижнего, 2 – среднего, 3 – верхнего рифея. Номера точек соответствуют порядковым номерам образцов в табл. 1, 2, 3.

содержанию ($\Sigma\text{PЗЭ} = 52.8–132.4$ мкг/г), отрицательной европиевой аномалией ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.64–0.91$) и относительно слабой степенью фракционирования РЗЭ ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 6.2–11.7$). Исключение составляет образец 4 микроклинового аркозового песчаника, характеризующийся повышенной величиной отношения $(\text{La}/\text{Yb})_N = 22.9$ (табл. 3), что в целом характерно для архейских субстратов имеющих, как правило, высокие отношения $(\text{La}/\text{Yb})_N$ и незначительные величины Eu/Eu^* (Тейлор, Мак-Леннан, 1988). Однако другой образец калиевого аркозового песчаника (ан. 1, табл. 3, рис. 3а) из основания разреза трехгорной свиты, для которого отмечается также низкая величина индекса химического выветривания ($\text{CIA} = 52$, табл. 2) обладает наименьшей степенью фракционирования и слабо выраженной европиевой аномалией, что может быть характерно для слабо выветрелых продуктов разрушения верхней континентальной коры с заметной долей ювенильных магматических пород (Cullers, 2000).

В среднем рифее своими низкими содержаниями $\Sigma\text{PЗЭ} = 36.8–41.9$ мкг/г особо выделяются кварцевые песчаники талынской свиты Юдомо-Майского прогиба (ан. 7, 8, рис. 3б). При этом наиболее высокая степень фракционирования ($(\text{La}/\text{Yb})_N = 15.5$) отмечается в ан. 7, залегающем в основании разреза талынской свиты. Скорее всего, формирование песчаников с таким распределением РЗЭ связано с удалением в процессе осадконакопления минералов, обогащенных тяжелы-

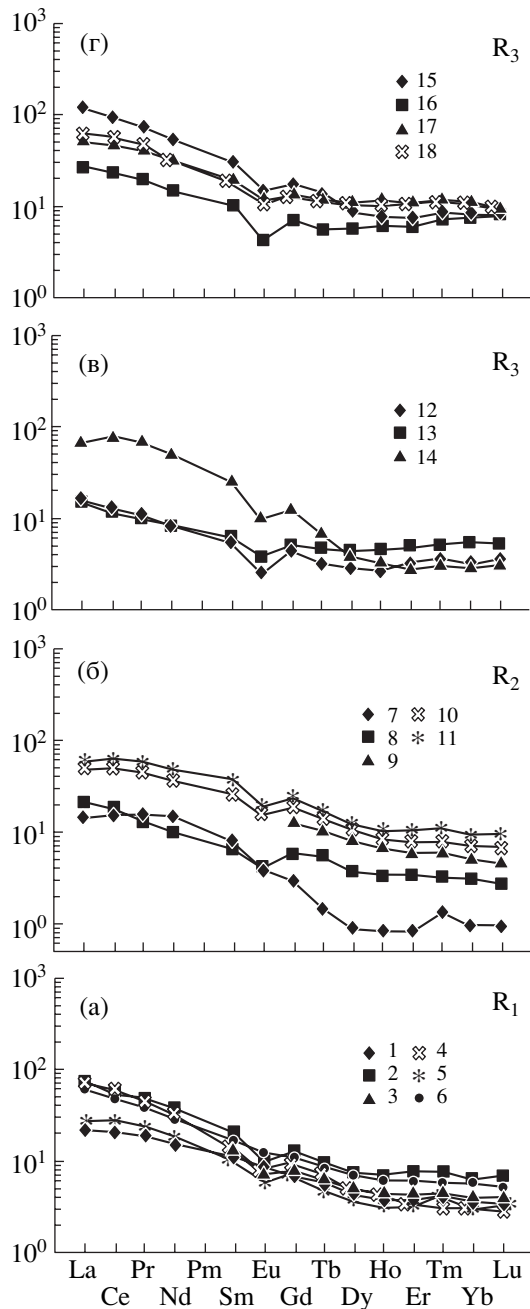


Рис. 3. Нормированное к углестому хондриту (Тейлор, Мак-Леннан, 1988) распределение РЗЭ в рифейских песчаниках Учуро-Майского региона.

а – нижний рифей, б – средний рифей, в – верхний рифей, Майская плита, г – верхний рифей, Юдомо-Майский прогиб. Номера спектров соответствуют порядковым номерам образцов в табл. 1, 2, 3.

ми РЗЭ, таких как циркон, рутил и гранат. Граувакковые песчаники тоттинской свиты как Юдомо-Майского прогиба (ан. 9, табл. 3), так и Учуро-Майской плиты (ан. 10, 11) в целом ближе по содержанию РЗЭ к песчаникам нижнего рифея (99.9–159.9 мкг/г) и отличаются от последних лишь более низкими отношениями $(La/Yb)_N = 6.2–8.6$ (рис. 3а, б).

Кварцевые песчаники кандыкской свиты Учуро-Майской плиты (ан. 12, 13; табл. 3) обладают низкими величинами $\Sigma РЗЭ$ и небольшой степенью их фракционирования $(La/Yb)_N = 2.8–5.1$ и этим существенно отличаются от грауваккового песчаника из кровли разреза этой же свиты (ан. 14), в котором отношение $(La/Yb)_N$ достигает 21.9 (рис. 3в). Граувакки (ан. 15, 16) и алевролиты (ан. 17, 18) устькирбинской свиты Юдомо-Майского прогиба при различных содержаниях ТРЗЭ (рис. 3г) и значениях $\Sigma РЗЭ$ также обладают небольшой степенью фракционирования РЗЭ $(La/Yb)_N = 3.5–5.7$.

Приведенные данные показывают, что распределение РЗЭ в аркозовых, граувакковых песчаниках и алевролитах рифея Учуро-Майского региона в существенной степени не зависит от их химического состава, а также геологического и стратиграфического положения. Общими для них являются переменная степень фракционирования РЗЭ и сравнительно широкий диапазон вариаций отрицательной европиевой аномалии (0.51–0.91, рис. 4), остающихся в пределах характерных для гранитоидных субстратов верхней континентальной коры (УСС, Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Cullers, 2000). При переходе от песчаников нижнего рифея и основания среднего рифея (талынская свита) к тоттинским песчаникам и, далее, к грубозернистым породам уйской серии наблюдается некоторая тенденция к обогащению пород тяжелыми РЗЭ, что свидетельствует о возрастании степени рециклирования осадочного материала и согласуется с ранее полученными данными об изменении вещественного состава терригенных отложений Учуро-Майского региона на протяжении рифея (Котова, Подковыров, 2001; Подковыров и др., 2002). Кварцевые песчаники среднего и верхнего рифея по сравнению с граувакковыми и алевритовыми разностями обеднены РЗЭ, однако при существенной разнице в содержаниях для них характерны сходные кривые распределения РЗЭ.

Отношение Hf/Zr во всех изученных песчаниках близко к величине 0.03 (табл. 3), при этом наиболее низкие содержания Hf и Zr характерны для песчаников трехгорной, димской, талынской и базальных слоев тоттинской свиты Юдомо-Майского прогиба (ан. 1–9). Th/U отношение в породах варьирует в широких пределах (0.9–8.4) и прямо не зависит от их состава; при этом кварцевые и аркозовые песчаники трехгорной, димской и талынской свит, за исключением обр. 2 (табл. 3), обеднены U и Th , а граувакки и алевропесчаники вышележащих свит среднего и верхнего рифея содержат, как правило, более высокие концентрации Th (1.5–7.2 мкг/г) и U (0.7–2.1 мкг/г, табл. 3).

Отношение La/Sc в песчаниках нижнего рифея Юдомо-Майского прогиба в среднем составляет 4.25; в остальных песчаниках (средний, верхний

рифей) отношения этих элементов значительно варьируют (1.7–14.6) независимо от состава и положения в разрезе (табл. 3). Используемое для анализа источников тонкозернистых кластических осадков отношение Th/Sc (Тейлор, Мак-Леннан, 1988), вероятно, не столь показательно для грубозернистых осадков. В рассматриваемых песчаниках оно значительно варьирует (0.59–2.65) независимо от состава песчаников и их стратиграфического положения. При этом следует отметить, что использование Th/Sc отношения (Тейлор, Мак-Леннан, 1988) для разграничения архейских/постархейских источников глинистых пород не подтверждается при изучении аргиллитов сибирского гипостратотипа рифея (Подковыров и др., 2002) и типового разреза рифея Урала (Маслов и др., 2006). Низкие отношения Yb/Th (0.19–0.65) и Sc/Th (0.38–2.13) в песчаных породах Учуро-Майского региона являются типичными для верхней континентальной коры по работе (Тейлор, Мак-Леннан, 1988).

На диаграммах Th-La-Sc и Th/Sc-Eu/Eu* (рис. 4, 5) большая часть точек составов изученных песчаников располагается в области между составами гранита и гранодиорита (тоналита), что, в частности, согласуется с результатами геохимических исследований песчаников уйской серии (Cullers, Podkovyrov, 2002). В совокупности с данными о распределении РЗЭ это свидетельствует о том, что большинство песчаников имеют варьирующие, но в целом близкие по составу гранитоидные источники.

Большая часть изученных образцов песчаных пород по распределению РЗЭ наиболее близка к фанерозойской граувакке с промежуточным содержанием кварца (Тейлор, Мак-Леннан, 1988), состав которой использован для нормирования по редким элементам на спайдер-диаграммах (рис. 6). Так, в песчаниках трехгорной и димской свит Юдомо-Майского прогиба наблюдается обогащение K, Rb, Ba и значительное обеднение Sc, Cr, Zn, Sr, а вышележащие кварцевые песчаники талынской свиты, кроме большинства петрогенных компонентов, экстремально обеднены теми же малыми элементами, особенно Sc, Cr, Sr, что подчеркивает нарастание минералогической зрелости обломочного, существенно гранитоидного материала на протяжении раннего – начала среднего рифея. Граувакковые песчаники тоттинской свиты, наиболее близкие по содержанию редких элементов к фанерозойской граувакке, обеднены Sc, V, Cr и обогащены Ba. Песчаники уйской серии сравнительно с фанерозойской “промежуточной” грауваккой незначительно обогащены K, Rb, Ba. При этом песчаники кандыкской свиты Учуро-Майской плиты несколько обеднены Sc, Cr, Sr, а песчаники устькирбинской свиты Юдомо-Майского прогиба значительно обеднены Sc, V, Cr, Co, Ni, Zn, Ga и Sr, что закономерно отражает различие геодинамических обстановок и субстра-

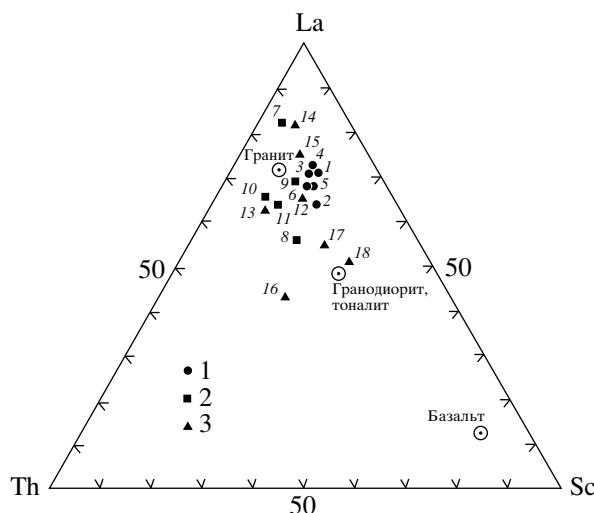


Рис. 4. Диаграмма La-Th-Sc (Cullers, Podkovyrov, 2002) для рифейских песчаников Учуро-Майского региона. Условные обозначения см. на рис. 2.

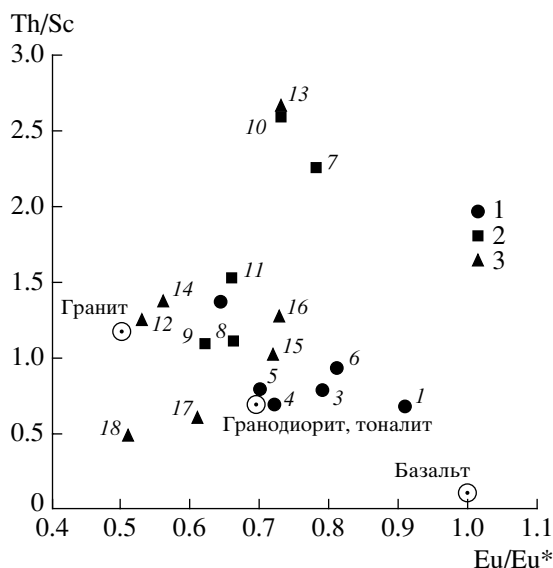


Рис. 5. Диаграмма Th/Sc-Eu/Eu* (Cullers, Podkovyrov, 2002) для рифейских песчаников Учуро-Майского региона. Условные обозначения см. на рис. 2.

тов островодужных австралийских и континентальных сибирских бассейнов седиментации. В целом, геохимический анализ песчаников разных уровней и свит рифея Учуро-Майского региона показал, что наиболее ярко различия в содержаниях редких и редкоземельных элементов выражены для двух групп силикокластических пород – кварцево-аркозовых (в основном рециклированных) и алеволито-граувакковых (пород, как правило, первого цикла или петрогенных) что согласуется с общими закономерностями эволюции геохимических параметров кластогенных осадков (Тейлор, Мак-Леннан, 1988; Cullers, 2000).

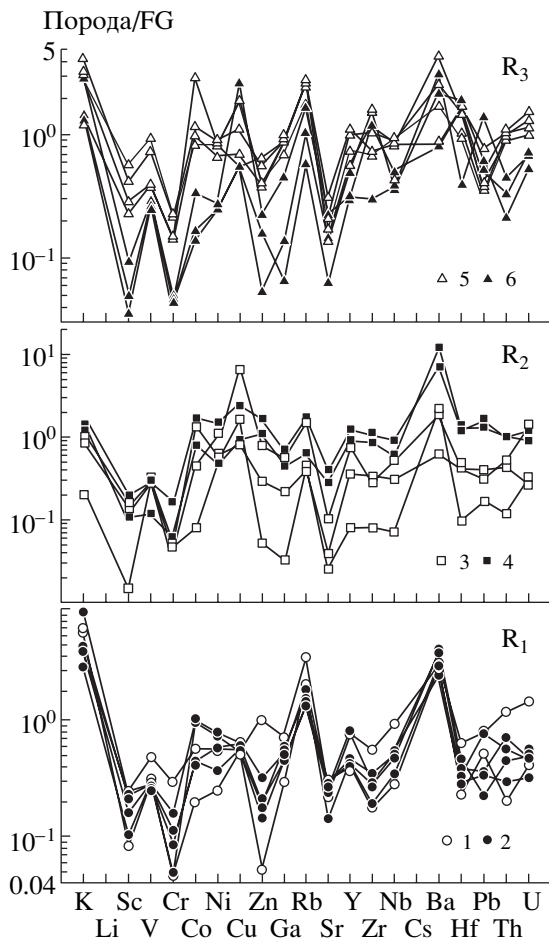


Рис. 6. Спайдер-диаграммы для рифейских песчаников Учуро-Майского региона.

FG – фанерозойская граувакка по (Тейлор, Мак-Леннан, 1988, табл. 6.9, ан. МК64). Свиты: 1 – трехгорная, 2 – димская, 3 – талынская, 4 – тотгинская, 5 – кандыкская, 6 – устькирбинская.

Sm-Nd ИЗОТОПНАЯ СИСТЕМАТИКА ПЕСЧАНИКОВ

Результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований рифейских песчаников Майской плиты и Юдомо-Майского прогиба представлены в табл. 4.

Аркозовые песчаники трехгорной и димской свит учурской серии нижнего рифея Юдомо-Майского прогиба характеризуются $T_{Nd}(DM) = 2.4$ млрд. лет. Близкие оценки Nd модельного возраста были получены ранее и для глинистых пород этих свит ($T_{Nd}(DM) = 2.1–2.3$ млрд. лет) (Подковыров и др., 2002). Более широкие вариации оценок $T_{Nd}(DM) = 1.8–2.8$ млрд. лет наблюдаются в песчаниках среднего рифея. Наиболее древним Nd модельным возрастом ($T_{Nd}(DM) = 2.8$ млрд. лет) обладает кварцевый песчаник талынской свиты аимчанской серии Юдомо-Майского прогиба. Для другого образца кварцевого песчаника этой свиты и граувакковых песчаников тотгинской свиты керпыльской серии оценки

$T_{Nd}(DM)$ составляют соответственно 2.2 и 2.3 млрд. лет, а один из образцов граувакковых песчаников тотгинской свиты характеризуется $T_{Nd}(DM) = 1.8$ млрд. лет. Для глинистых пород среднего рифея Учуро-Майского региона значения $T_{Nd}(DM)$ изменяются в интервале 1.8–2.3 млрд. лет (Подковыров и др., 2002).

Sm-Nd изотопно-геохимические данные для песчаников уйской серии верхнего рифея показывают, что для них, так же, как и для песчаников керпыльской и аимчанской серий среднего рифея, характерны сравнительно большие вариации оценок Nd модельного возраста ($T_{Nd}(DM) = 1.7–2.3$ млрд. лет). Для кварцевого и грауваккового песчаников кандыкской свиты уйской серии Учуро-Майской плиты получены оценки $T_{Nd}(DM)$ соответственно 2.3 и 1.7 млрд. лет, а для алевролита устькирбинской свиты той же серии в Юдомо-Майском прогибе – 2.0 млрд. лет. Эти оценки в целом сопоставимы с оценками Nd модельного возраста аргиллитов уйской серии ($T_{Nd}(DM) = 1.8–2.1$ млрд. лет (Подковыров и др., 2002)).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

На сегодняшний день для определения областей сноса и идентификации источников рифейских песчаников Учуро-Майского региона мы можем воспользоваться, главным образом, результатами геохронологических, геохимических и Sm-Nd изотопно-геохимических исследований магматических и метаморфических комплексов центральной и восточной частей Алданского щита (Великославинский и др., 2003; Ковач и др., 1996а,б, 1999; Котов, 2003; Котов и др., 1993, 1995, 1999, 2004), поскольку для Джугджуро-Становой складчатой области и погребенного фундамента Сибирской платформы такие данные пока еще носят фрагментарный характер (Ковач и др., 2000; Котов, 2003; Ларин и др., 2002). С другой стороны, в рифейской истории Учуро-Майского региона выделяется ряд принципиальных геологических рубежей, расчленяющих эту историю на крупные этапы, каждому из которых могут быть сопоставлены свои области и источники сноса терригенных осадков (Семихатов, Серебряков, 1983; Подковыров, 1997; Khudoley et al., 2001).

Области сноса рифейских песчаников Учуро-Майского региона. Согласно Sm-Nd изотопным характеристикам рифейские песчаники Учуро-Майского региона распадаются на три группы, обладающие следующими значениями $T_{Nd}(DM) = 1.7–1.8$, $2.0–2.4$ и 2.8 млрд. лет. При этом для большей части изученных образцов оценки $T_{Nd}(DM)$ находятся в интервале $2.0–2.4$ млрд. лет, что свидетельствует о преобладании в областях сноса пород с раннепротерозойским Nd модельным возрастом. Исходя из этого, в качестве главной области сноса для рифейских песчаников Учуро-Майского региона следует

Таблица 2. Химический состав и некоторые петрохимические параметры изученных образцов песчаников рифея Учуро-Майского региона

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
№ обр.	54-17	54-15	57-10	57-25	58-15	58-28	55-2	55-32	55-73	74-21	74-13	78-37	71-20	71-10	104-45	104-49	85-5	85-12
SiO ₂	72.72	54.26	47.72	76.2	70.4	35.27	94.4	87.88	79.78	78.26	77.44	92.36	90.99	79.72	73.52	73.53	63.99	65.95
TiO ₂	0.11	0.46	0.25	0.31	0.21	0.34	0.04	0.19	0.25	0.3	0.43	0.12	0.15	0.19	0.93	1.03	1.18	1.1
Al ₂ O ₃	7.84	9.79	7.98	10.57	8.48	9.23	1.61	3.77	8.21	8.15	9.24	2.65	3.47	9.01	12.45	11.81	15.73	14.98
ΣFeO	1.96	3.56	2.34	2.34	3.54	4.38	1.67	4.52	5.1	4.51	5.8	2.36	0.72	3.05	4.3	5.73	6.37	6.01
MnO	0.01	0.05	0.05	0.01	0.03	0.1	0.01	0.09	0.02	0.06	0.01	0.01	0.01	0.01	0.04	0.06	0.09	0.09
MgO	2.11	5.68	7.16	1.67	2.68	9.27	0.1	0.76	0.85	1.23	1.29	0.1	0.21	0.66	0.97	1.1	2.54	2.64
CaO	3.3	7.64	11.35	0.62	4.18	13.73	0.09	0.47	0.35	1.76	0.53	0.09	0.96	0.25	0.12	0.16	0.96	0.68
Na ₂ O	0.19	0.06	0.08	0.13	1	0.07	0.15	0.22	1.59	2.43	1.98	0.14	0.88	2.3	1.93	1.52	1.61	1.85
K ₂ O	5.89	4.1	4.58	7.45	3.48	4.48	1.05	0.6	1.77	0.6	1.75	1.1	1.6	3.03	2.73	2.17	3.74	3.29
P ₂ O ₅	0.09	0.13	0.09	0.02	0.05	0.02	0.02	0.07	0.12	0.14	0.08	0.07	0.07	0.07	0.06	0.06	0.14	0.11
ППП	5.28	13.75	17.9	0.25	5.45	22.59	0.25	0.93	1.39	2.05	0.94	0.25	0.25	1.2	1.5	1.5	2.1	1.9
Сумма	99.5	99.48	99.5	99.57	99.5	99.48	99.39	99.5	99.43	99.49	99.49	99.25	99.31	99.49	98.55	98.67	98.45	98.6
lg(Si/Al)	0.97	0.74	0.78	0.86	0.92	0.58	1.77	1.37	0.99	0.98	0.92	1.54	1.42	0.95	0.77	0.79	0.61	0.64
lg(Na/K)	-1.49	-1.84	-1.76	-1.76	-0.54	-1.81	-0.84	-0.44	-0.05	0.61	0.05	-0.9	-0.26	-0.12	-0.15	-0.15	-0.37	-0.25
<i>a</i>	0.127	0.213	0.197	0.164	0.142	0.308	0.02	0.05	0.121	0.123	0.141	0.034	0.045	0.133	0.2	0.189	0.29	0.268
<i>b</i>	0.15	0.38	0.51	0.09	0.2	0.7	0.03	0.09	0.1	0.13	0.12	0.04	0.03	0.06	0.01	0.11	0.18	0.17
<i>n</i>	0.13	0.09	0.1	0.16	0.11	0.1	0.03	0.02	0.09	0.09	0.1	0.03	0.06	0.14	0.12	0.1	0.13	0.13
<i>k</i>	0.95	0.98	0.97	0.97	0.7	0.98	0.82	0.64	0.42	0.14	0.37	0.84	0.54	0.46	0.48	0.48	0.6	0.54
Q	48	35.7	28	43.8	48.5	15.4	88.9	81	60.6	57.8	53.8	86.3	78.5	53.9	48.3	51.8	34	36
PL	1.8	0.6	0.8	1.2	9.1	0.6	1.3	2.1	14.8	22.6	18.4	1.3	8.1	19.1	17	13.6	15	17.3
OR	31.9	11.5	20.1	37.7	13.7	16.2	5.7	3.5	2.8	3.5	2.1	3.7	9.3	13.5	1.3	3	1.3	0.6
ILL	4.8	23	12.5	9.7	11.9	18.6	0.8	–	13.7	–	15	4.9	–	7.9	27.2	18.2	37.2	34
CHL	–	–	–	–	–	–	–	10.5	–	11.9	–	–	–	–	–	10.5	–	–
DL	9.2	24	31.4	1.9	10.7	40.6	0.2	0.4	0.2	0.3	0.6	–	1	–	–	–	2.2	1.2
ANK	1.8	1.4	5.7	–	2.3	5.1	–	–	–	–	–	0.2	2	–	–	–	–	–
CC	–	–	0.5	–	–	–	–	0.6	–	2.2	–	–	–	–	–	–	–	–
SRP	–	–	–	2.3	–	–	0.1	–	1.2	–	2	–	–	1.2	1	–	3	3.9
GT	1.5	2.8	–	2.4	2.8	2.5	2	0.9	5.7	0.7	7.1	2.6	0.1	3.4	4.2	1.9	6.3	6
RM	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
F	33.7	12.1	20.9	38.9	22.8	16.8	7	5.6	17.6	26.1	20.5	5	17.4	32.6	18.3	16.6	16.3	17.9
P	18.3	52.2	51.1	17.3	28.7	67.8	4.1	13.4	21.8	16.1	25.7	8.7	4.1	13.5	33.4	31.6	49.7	46.1
Q	48	35.7	28	43.8	48.5	15.4	88.9	81	60.6	57.8	53.8	86.3	78.5	53.9	48.3	51.8	34	36
F, ат. кол-во	34.3	26	15.5	44	57.4	21	90.3	77	77.1	67.3	71.6	93	65.6	72.1	71.3	74.5	58.4	56.1
CIA	52	66.3	59	52.9	58.9	62.4	51	66.9	61.4	51	60.2	62.6	41.3	54.5	66.2	69.7	65.1	65.6

Примечание. Порядковые номера анализов соответствуют табл. 1. Петрохимические параметры: [lg(SiO₂/Al₂O₃) – lg(Na₂O/K₂O)] – по Ф. Петтиджону с соавторами (1976); *a*, *b*, *n*, *k* – по А.Н. Неелову (1980). Нормативный минеральный состав (Розен, Нистратов, 1984): Q – кварц, PL – плагиоклаз, OR – ортоклаз, ILL – иллит, CHL – хлорит, DL – доломит, ANK – анкерит, CC – кальцит, SRP – серпентин, GT – гётит, RM – редкие минералы (рутил, родохрозит и апатит). Пробел означает отсутствие данного расчетного минерала. F–P–Q – соотношения компонентов на рис. 2; F – железистость; CIA – химический индекс выветривания (Nesbitt, Young, 1982).

Таблица 3. Содержания редких и редкоземельных элементов (в г/т) в изученных образцах песчаников рифея Учуро-Майского региона

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
№ обр.	54-17	54-15	57-10	57-25	58-15	58-28	55-2	55-32	55-73	74-21	74-13	78-37	71-20	71-10	104-45	104-49	85-5	85-12
Li	<0.5	21	20	25	15	32	1.8	33	22	43	58	11.3	5.8	14.7	11.1	13.4	17.8	21
Sc	2.1	6.0	4.0	5.8	2.6	5.4	0.37	2.8	3.5	2.6	4.7	1.21	0.87	2.3	7.2	5.8	10.6	14.6
Ti	669	2670	1560	1670	1140	1870	283	1260	1530	1810	3010	577	977	1010	3430	3490	3710	3870
V	<50	84	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	<50	67	69	128	164
Cr	<5	32	9.3	12.2	5.3	17.3	<5	5.8	<5	6.8	17.7	<5	<5	<5	15.5	16.1	24	24
Co	2.2	6.3	4.9	4.9	10.5	10.6	0.87	14.7	5.0	8.7	18.4	1.51	1.86	3.7	10.9	33	13.0	9.1
Ni	<5	11.5	7.5	11.7	14.5	14.5	10.2	12.1	22	9.5	30	<5	<5	5.5	13.4	16.5	17.7	16.6
Cu	<5	<5	<5	5.9	5.65	<5	14.8	7.4	60	8.4	21	<5	<5	24	6.4	17.2	10.1	<5
Zn	<5	15.2	13.8	31	20	16.9	<5	28	74	104	158	15.1	<5	21	36	39	54	62
Ga	4.5	10.9	6.8	8.0	6.7	9.1	<0.5	3.3	8.6	6.8	10.6	0.96	2.1	6.8	12.3	10.6	13.3	13.3
Rb	75	127	53	66	49	56	16.3	13.9	55	23	61	21	38	60	95	70	98	93
Sr	67	49	64	32	65	52	5.7	8.5	23	63	89	13.9	33	50	38	31	69	47
Y	9.4	17.0	10.5	9.5	9.1	18.0	1.78	8.1	16.6	20	27	6.7	11.0	7.0	17	12.8	25	22
Zr	31	98	61	47	34	51	14.3	61	51	155	192	212	269	53	122	211	128	183
Nb	2.9	9.5	5.2	4.8	3.5	5.5	0.72	3.2	5.1	6.1	9.1	1.51	3.6	3.9	9.1	8.5	8.5	8.7
Cs	0.89	3.5	1.35	1.63	0.84	2.5	0.28	0.69	2.2	0.81	2.2	0.31	0.4	1.43	3.5	2.6	3.7	1.54
Ba	432	471	608	582	439	368	346	95	278	1820	1070	123	334	478	259	124	662	391
La	8.5	27	16.9	26	10.2	23	5.5	7.8	17.1	19.2	22	5.9	5.6	25	46	10.0	20	22
Ce	20	55	36	58	27	49	14.4	17.3	41	50	59	12.1	11.5	74	94	23	49	52
Pr	2.7	6.6	4.3	6.3	3.3	5.5	2.1	1.87	5.0	6.3	7.8	1.46	1.43	9.6	10.4	2.8	5.9	6.0
Nd	11.4	26	15.9	23	13.4	21	10.6	7.3	20	26.3	40	5.6	5.8	36	39	10.5	23	23
Sm	2.6	4.8	2.9	3.7	2.5	3.8	1.9	1.6	4.2	6.0	8.7	1.29	1.46	6.0	7.1	2.4	4.9	4.4
Eu	0.72	0.91	0.7	0.76	0.53	1.00	0.34	0.36	0.83	1.41	1.73	0.23	0.35	0.88	1.22	0.38	1.11	0.99
Gd	2.2	3.9	2.5	2.8	2.2	3.7	0.91	1.79	4.0	5.8	7.4	1.34	1.48	3.8	5.3	2.2	4.5	4.0
Tb	0.33	0.55	0.36	0.38	0.3	0.54	0.087	0.32	0.62	0.8	0.99	0.19	0.28	0.39	0.75	0.33	0.78	0.66

Таблица 3. Окончание

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
№ обр.	54-17	54-15	57-10	57-25	58-15	58-28	55-2	55-32	55-73	74-21	74-13	78-37	71-20	71-10	104-45	104-49	85-5	85-12
Dy	1.63	2.8	1.88	1.75	1.5	2.7	0.35	1.45	3.2	4.1	4.7	1.10	1.63	1.55	3.5	2.2	4.38	3.9
Ho	0.32	0.60	0.38	0.34	0.3	0.54	0.072	0.29	0.62	0.73	0.89	0.24	0.38	0.29	0.67	0.52	0.99	0.89
Er	0.94	1.9	1.04	0.86	0.88	1.54	0.21	0.86	1.51	1.9	2.6	0.77	1.17	0.73	1.89	1.53	2.8	2.6
Tm	0.154	0.28	0.149	0.118	0.146	0.2	0.048	0.116	0.23	0.29	0.39	0.124	0.184	0.118	0.31	0.26	0.43	0.4
Yb	0.92	1.62	0.98	0.76	0.82	1.45	0.24	0.78	1.35	1.78	2.3	0.78	1.34	0.78	2.1	1.9	2.6	2.6
Lu	0.128	0.27	0.152	0.112	0.132	0.19	0.037	0.105	0.186	0.26	0.38	0.133	0.2	0.124	0.32	0.31	0.33	0.37
Hf	0.88	2.5	1.78	1.27	1.08	1.47	0.38	1.51	1.57	4.5	5.1	6.1	7.3	1.49	3.6	6.4	4.0	5.6
Ta	0.36	1.05	0.58	0.45	0.41	0.59	0.073	0.31	0.57	0.76	1.00	0.20	0.39	0.44	0.96	0.82	0.83	0.83
Pb	6.7	10.2	2.9	10.0	4.4	4.7	2.2	5.3	4.1	21	17.0	8.0	6.8	18.1	6.8	10.0	5.5	4.6
Th	1.42	8.3	3.1	4.0	2.0	5.0	0.85	3.1	3.8	6.9	7.2	1.49	2.3	3.2	7.2	7.3	6.3	6.8
U	0.55	1.9	0.66	0.61	0.43	0.63	0.44	0.36	1.73	1.24	1.59	0.72	0.96	0.90	1.52	2.1	1.32	1.77
Eu/Eu*	0.91	0.64	0.79	0.72	0.70	0.81	0.78	0.66	0.62	0.73	0.66	0.53	0.73	0.56	0.72	0.73	0.61	0.51
ΣPЗЭ	52.837	132.352	84.141	124.880	63.208	114.160	36.794	41.941	99.846	124.870	158.880	31.257	32.804	159.262	212.560	58.330	120.720	123.810
(La/Yb) _N	6.2	11.3	11.7	22.9	8.4	10.7	15.5	6.7	8.6	7.3	6.2	5.1	2.8	21.9	5.1	5.7	5.1	3.5
(La/Sm) _N	2.0	3.5	3.6	4.4	2.6	3.8	1.8	3.2	2.6	2.0	1.6	2.9	2.4	2.7	4.0	2.6	2.5	3.2
(Gd/Yb) _N	1.9	1.9	2.1	3.0	2.2	2.1	3.1	1.9	2.4	2.6	2.6	1.4	0.9	4.0	2.1	0.9	1.4	1.2
Hf/Zr	0.029	0.025	0.029	0.027	0.032	0.029	0.026	0.025	0.031	0.029	0.027	0.029	0.027	0.028	0.029	0.03	0.031	0.03
La/Th	6.0	3.2	5.4	6.4	5.0	4.6	6.4	2.6	4.5	2.8	3.0	4.0	2.4	8.0	3.2	3.2	6.3	1.4
Th/Sc	0.68	1.40	0.78	0.69	0.79	0.92	2.26	1.10	1.10	2.60	1.50	1.20	2.65	1.40	0.59	0.47	1.00	1.30
Th/U	2.6	4.3	4.7	6.6	4.8	7.9	1.9	8.4	2.2	5.6	4.5	2.1	0.9	3.5	4.7	3.6	4.8	3.9
Yb/Th	0.65	0.20	0.31	0.19	0.40	0.29	0.28	0.26	0.36	0.26	0.33	0.52	0.58	0.25	0.29	0.27	0.42	0.39
Sc/Th	1.47	0.73	1.28	1.45	1.27	1.08	0.44	0.91	0.92	0.38	0.65	0.81	0.38	0.73	0.99	0.79	1.69	2.13
La/Sc	4.1	4.5	4.2	4.5	3.9	4.3	14.6	2.8	4.9	7.2	4.6	4.9	6.4	10.9	6.4	1.7	1.9	1.5

Примечание. Порядковые номера анализов соответствуют табл. 1, 2.

Таблица 4. Результаты Sm-Nd изотопно-геохимических исследований рифейских песчаников Учуро-Майского региона

№ п/п	№ п/п в табл. 1, 2, 3	Образец	Sm (ppm)	Nd (ppm)	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$	$\varepsilon_{\text{Nd}}(0)$	$T_{\text{Nd}}(\text{DM})$
Юдомо-Майский прогиб								
1	18	85/12	4.35	21.8	0.1205	0.511943 ± 7	-13.56	1971
2	9	55/73	4.28	20.1	0.1288	0.511865 ± 4	-15.1	2302
3	8	55/32	1.63	7.50	0.1314	0.511615 ± 6	-20.0	2833
4	7	55/2	1.77	10.13	0.1055	0.511561 ± 6	-21.0	2233
5	5	58/15	2.69	14.23	0.1141	0.511557 ± 8	-21.1	2429
6	4	57/25	4.14	25.3	0.0990	0.511310 ± 5	-25.9	2436
7	1	54/17	2.25	10.65	0.1279	0.511785 ± 8	-16.6	2418
Учуро-Майская плита								
8	12	78/37	1.43	6.11	0.1418	0.512046 ± 8	-11.5	2334
9	13	71/20	1.37	5.46	0.1521	0.512037 ± 9	-11.7	-
10	14	71/10	6.64	41.4	0.0970	0.511806 ± 9	-16.2	1753
11		74/6	3.32	20.1	0.0998	0.511821 ± 5	-15.9	1777
12	10	74/21	6.10	26.4	0.1393	0.512003 ± 5	-12.4	2344

Примечание. $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} \pm 2\sigma$ – величины ошибки соответствуют последней значащей цифре после запятой.

рассматривать раннепротерозойскую Sm-Nd изотопную провинцию Алданского щита, которая занимает большую часть его территории (Котов, 2003) и расположена к югу и к западу от Юдомо-Майского прогиба (рис. 8). Эта изотопная провинция охватывает большую часть Алданского геоблока и Батомгский геоблок Алданского щита, а также Сутамский блок зоны сочленения Алданского щита и Джугджуро-Становой складчатой области, и отличается тем, что в ней исключительно широко представлены магматические, метавулканические и метаосадочные породы с раннепротерозойскими метками $T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 2.0$ – 2.4 млрд. лет (Котов, 2003). Кроме того, к раннепротерозойской Sm-Nd изотопной провинции Алданского щита относится Билякчано-Улканский вулканоплутонический пояс, протягивающийся более чем на 750 км вдоль юго-восточной границы Сибирской платформы и “сшивающий” тектонические структуры как Алданского щита, так и Джугджуро-Становой складчатой области (Larin et al., 1997). В пределах этого пояса широко распространены изверженные породы улканского комплекса, обладающие $T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 2.2$ – 2.4 млрд. лет (Котов, 2003; Larin et al., 1997) и представленные бимодальной ассоциацией вулканитов улканской серии и прорывающих ее гипабиссальных массивов калиевых гранитоидов. Следует также отметить, что на территории раннепротерозойской Sm-Nd изотопной провинции Алданского щита известны выходы пород с $T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 2.6$ – 3.1 млрд. лет (Котов, 2003), что, по-видимому, объясняет присутствие в разрезах рифея Учуро-Майского региона песчаников с $T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 2.8$ млрд. лет.

На Алданском щите докембрийские метаморфические и магматические породы с $T_{\text{Nd}}(\text{DM})$ мо-

ложе 2.0 млрд. лет не обнаружены (Котов, 2003). Отсюда следует, что в областях сноса рифейских песчаников с $T_{\text{Nd}}(\text{DM}) = 1.7$ – 1.8 млрд. лет наряду с раннепротерозойскими породами присутствовали породы рифейского возраста, либо при формировании этих песчаников происходило поступление осадочного материала из разных областей сноса. К сожалению, вопрос о местоположении областей сноса позднепротерозойского материала остается открытым. По мнению А.К. Худолея с соавторами (Khudoley et al., 2001), они располагались восточнее и/или юго-восточнее по отношению к Юдомо-Майскому прогибу. Некоторые палинспастические реконструкции позволяют думать, что эти области располагались в пределах Гренвилльского орогена суперконтинента Лаврентия.

Источники рифейских песчаников Учуро-Майского региона. Для изученных разрезов нижнего рифея Горностахской антиклинали Юдомо-Майского прогиба наиболее вероятными источниками вещества осадков, судя по анализу конфигурации раннерифейского бассейна и определению направлений переноса (палеотечений) являлись расположенные северо-восточнее поднятия дорифейского фундамента Сибирской платформы (Семихатов, Серебряков, 1983; Khudoley et al., 2001). Песчаники учурской серии нижнего рифея представлены преимущественно высоко калиевыми аркозами с карбонатным матриксом, которые являются одними из наименее дифференцированных осадков сибирского гипостратотипа рифея (Котова, Подковыров, 2001). Другими словами, состав подобных петрогенных пород первого цикла должен в первом приближении отражать состав подстилающего фундамента. В настоящее время

об источниках песчаников нижнего рифея мы можем судить на основании следующих данных:

1. Петрохимические (Котова, Подковыров, 2001) и геохимические особенности аркозовых песчаников учурской серии свидетельствуют, что в их формировании принимали участие продукты разрушения пород, варьирующие по составу от гранита до гранодиорита (рис. 3а, 4, 5). 2. По распределению РЗЭ песчаники учурской серии Юдомо-Майского прогиба в большинстве случаев близки к метавулканическим породам федоровской толщи алданского гранулитогнейсового мегакомплекса (рис. 7а), которая является “эталоном” раннепротерозойских островодужных комплексов Алданского щита – индикаторов формирования раннепротерозойской ювенильной континентальной коры этого региона (Котов, 2003). Исключение представляет только один образец (димская свита, р. Белая, ан. 4, табл. 3), спектр распределения РЗЭ в котором практически идентичен гранито-гнейсам тимптонского комплекса (рис. 7б). От гранитов улканского комплекса аркозовые песчаники учурской серии отличаются более низкими содержаниями РЗЭ и менее ярко выраженной отрицательной европиевой аномалии (рис. 7в), что в принципе указывает на подчиненную роль источников улканского типа в осадках рифея. 3. Результаты Sm-Nd изотопных исследований аркозовых песчаников учурской серии ($T_{Nd}(DM) = 2.4$ млрд. лет) показывают, что их источником послужили породы со средним значением Nd модельного возраста около 2.4 млрд. лет. 4. В песчаниках основания учурской серии из разрезов Горностаховского антиклинория Юдомо-Майского прогиба преобладают детритовые цирконы с возрастом около 1.7 и 2.0 млрд. лет (SHRIMP; Khudoley et al., 2001).

Поступление в бассейны осадконакопления раннего рифея цирконов с возрастом приблизительно 1.7 млрд. лет могло быть связано только с разрушением калиевых гранитоидов и вулканических пород улканского комплекса ($T_{Nd}(DM) = 2.2-2.4$ млрд. лет), возраст которого составляет $1716 \pm 3-1736 \pm 6$ млн. лет (Larin et al., 1997). Другие примеры магматических или метаморфических комплексов этого возраста в пределах Алданского щита и сопредельной территории Джугджуро-Становой складчатой области неизвестны. В свою очередь, источниками цирконов с возрастом около 2.0 млрд. лет могли служить только метаморфические и магматические породы восточной части Алданского щита, а именно (рис. 8): 1) тоналит-гранодиемитовые ортогнейсы и гранито-гнейсы тимптонского комплекса (западная часть Алданского геоблока), имеющие возраст в интервале $1993 \pm 1-2011 \pm 2$ млн. лет и $T_{Nd}(DM) \approx 2.4$ млрд. лет (Котов и др., 1995; Котов, 2003) и 2) раннепротерозойские (1.9–2.0 млрд. лет) метаосадочные и метавулканические породы федоровской, иджекской, кюриканской и холболахской толщ алданского гранулитогнейсового мегакомплекса с $T_{Nd}(DM) = 2.1-2.4$ млрд. лет (восточная часть Алданского геоблока), а также (3) метаморфические и магматические породы ($T_{Nd}(DM) = 2.0-2.5$ млрд. лет) Батомского геоблока Алданского щита (Котов и др., 1995; Ковач и др., 1996а, 1999; Великославинский и др., 2003; Котов, 2003). Приведенные данные позволяют предполагать, что главными источниками аркозовых песчаников учурской серии нижнего рифея Юдомо-Майского прогиба являются средние и кислые метавулканициты федоровской толщи и сходные с ними по составу, возрасту и изотопно-геохимическим особенностям раннепротерозойские метавулканические и метаосадочные породы восточной части Алданского щита, а также калиевые гранитоиды и вулканические породы улканского комплекса.

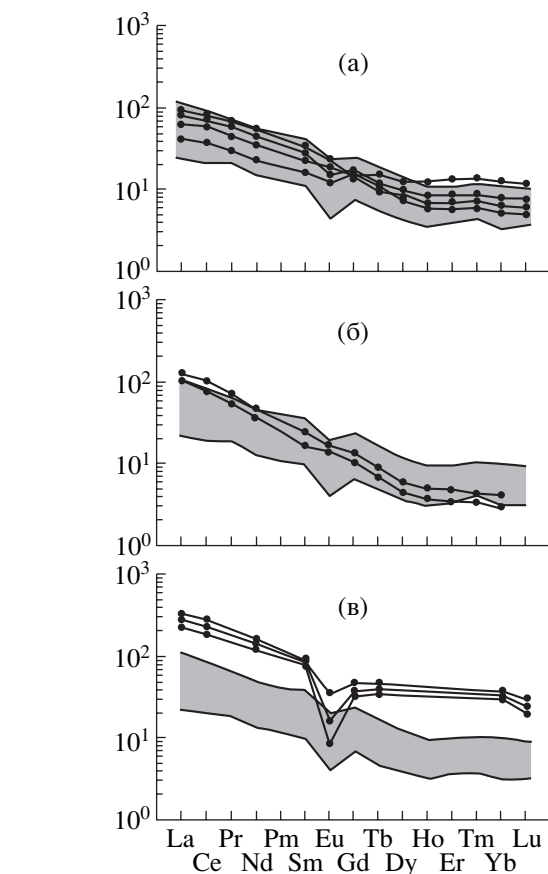


Рис. 7. Сопоставление распределения РЗЭ в рифейских аркозовых и граувакковых песчаниках и алевролитах Учуро-Майского региона (серое поле) с распределением РЗЭ в метаандезитах федоровской толщи алданского гранулитогнейсового комплекса (а), в тоналит-гранодиемитовых ортогнейсах тимптонского комплекса (б) (Ковач, 1994) и в гранитоидах улканского комплекса (в) (Larin et al., 1997).

Более сложным является вопрос об источниках песчаников среднего и верхнего рифея. Судя по петрохимическим (Котова, Подковыров, 2000, 2001) и геохимическим (Cullers, Podkovyrov, 2002) данным, главными источниками этих песчаников

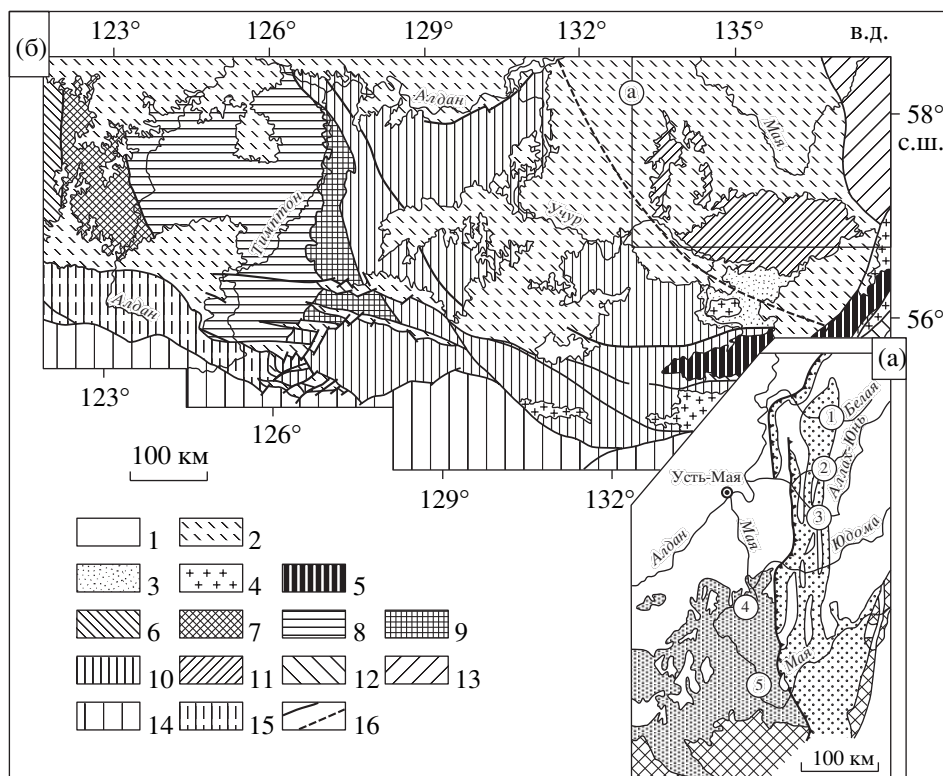


Рис. 8. Схема блокового строения Алданского щита и зоны его сочленения с Джугджуро-Становой складчатой областью (Котов, 2003). На врезке (а) приведена схема геологического строения Учуро-Майского региона Восточной Сибири (рис. 1). Условные обозначения см. рис. 1.

1 – кайнозойские отложения; 2 – мезозойские, палеозойские и верхнепротерозойские платформенные отложения; 3 – вулканский комплекс; 4 – фанерозойские гранитоиды; 5 – анортозиты; 6–11 – Алданский щит: 6 – Чаро-Олекминский геоблок, 7 – зона сочленения Чаро-Олекминского и Алданского геоблоков, 8 – Западно-Алданский мегаблок Алданского геоблока, 9 – зона сочленения Западно- и Восточно-Алданского мегаблоков, 10 – Восточно-Алданский (Учурский) мегаблок Алданского геоблока, 11 – Батомгский геоблок; 12–15 – складчатые области: 12 – Монголо-Охотская, 13 – Верхояно-Чукотская, 14 – Джугджуро-Становая, 15 – зона сочленения Алданского щита и Джугджуро-Становой складчатой области; 16 – разрывные нарушения.

(табл. 3, рис. 4, 5) являлись породы, близкие по составу граниту, тоналиту и гранодиориту. При этом спектры распределения РЗЭ в изученных образцах граувакковых песчаников тоттинской свиты керпыльской серии, а также в граувакковых песчаниках и алевролитах уйской серии идентичны спектрам распределения РЗЭ в метавулканических породах федоровской толщи алданского гранулитогнейсового комплекса (рис. 7а). Другими словами, есть все основания полагать, что главными источниками песчаников среднего и верхнего рифея послужили раннепротерозойские магматические и метаморфические породы восточной части Алданского щита. Однако в разрезах среднего и верхнего рифея наряду с песчаниками, обладающими $T_{Nd}(DM) = 2.0-2.3$ и 2.8 млрд. лет, присутствуют песчаники с $T_{Nd}(DM) = 1.7-1.8$ млрд. лет. Как уже отмечалось выше, источниками части тоттинских и уйских песчаников служили породы не только раннепротерозойского, но и позднепротерозойского возраста. Этот вывод хорошо согласуется с результатами геохронологических исследований детритовых

цирконов из граувакковых песчаников тоттинской свиты керпыльской серии среднего рифея, которые имеют возраст в интервалах 1.3–1.5, 1.9–2.0 и 2.4–2.6 млрд. лет (SHRIMP; Khudoley et al., 2001), а также детритовых цирконов из песчаников уйской серии, для которых получены оценки возраста в интервале 1.0–1.5 млрд. лет (U-Pb метод по циркону; Rainbird et al., 1998). Учитывая, что главной областью сноса раннепротерозойского осадочного материала является восточная часть Алданского щита (Алданский и Батомгский геоблоки), поступление в бассейны седиментации среднего рифея обломочных цирконов с возрастом 2.4–2.6 млрд. лет скорее всего было связано с размывом анорогенных гранитов нелюкинского комплекса с возрастом 2.4–2.5 млрд. лет и $T_{Nd}(DM) = 3.0-3.3$ млрд. лет, выходы которых занимают около 30–40% зоны сочленения Чаро-Олекминского и Алданского геоблоков Алданского щита (Котов и др., 2004). В отличие от этого источниками детритовых цирконов с возрастом 1.9–2.0 млн. лет, так же, как и для песчаников учурской серии, служили магматические и метаморфические породы

Алданского и Батомгского геоблоков (рис. 8). Данные, позволяющие идентифицировать источники, так же, как и определить области сноса детритовых цирконов с возрастом 1.0–1.5 млрд. лет, к сожалению, пока еще отсутствуют.

Таким образом, есть все основания полагать, что главными источниками песчаников среднего и верхнего рифея, так же, как и песчаников нижнего рифея в Учуро-Майском регионе, послужили раннепротерозойские магматические и метаморфические породы восточной части Алданского щита и в том числе анорогенные гранитоиды нелюкинского комплекса. Кроме того, определенную роль в формировании этих песчаников играли источники позднепротерозойского возраста, идентифицировать которые в настоящее время не представляется возможным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленные в статье геохимические и изотопно-геохимические данные свидетельствуют о том, что формирование песчаных отложений протоплатформенного чехла юго-восточной части Сибирской платформы на протяжении рифея было обусловлено, главным образом, поступлением первичного и рециклированного осадочного материала из магматических и метаморфических комплексов фундамента восточной части Алданского щита в ходе денудации раннепротерозойского аккреционного орогена. Формирование этого орогена завершилось к 1.9 млрд. лет и произошло в результате аккреции Федоровской островной дуги к Олекмо-Алданской континентальной микроплите и ее последующего столкновения с пассивной окраиной Учурской континентальной микроплиты, включавшей Батомгскую континентальную микроплиту, образование которой являлось результатом амальгамации раннепротерозойских островных дуг (Котов, 2003).

Первые признаки поступления в бассейны осадконакопления рифейского эндогенного материала устанавливаются, начиная с “тоттинского” времени. Это отражает вовлечение в осадконакопление продуктов выветривания и размыва внешних по отношению к платформе рециклированных орогенов гренвильского цикла (Семихатов и др., 2002) и синхронных осадконакоплению вулканитов (Подковыров и др., 2001), маркирующих начало развития рифтогенного бассейна краевой части платформы. Однако вопрос об областях сноса орогенного материала еще требует своего решения. Наиболее вероятно, что они располагались к востоку и юго-востоку от Юдомо-Майского прогиба (Khudoley et al., 2001).

Исследования выполнены при поддержке РФФИ (проекты 04-05-64810, 04-05-65002) и Программы фундаментальных исследований ОНЗ РАН “Изотопная геология: геохронология, источники вещества”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др.* U-Pb возраст федоровской толщи алданского гранулитогнейсового мегакомплекса (Алданский щит) // Докл. РАН. 2003. Т. 393. № 1. С. 91–96.
- Волкодав И.Г., Базилевская Р.В., Старников А.И. и др.* Стратиграфия нижнего рифея Горностаховской гряды (Юго-Восточная Якутия) // Новое в стратиграфии и палеонтологии позднего докембрия восточных и северных районов Сибири. Новосибирск: ИГиГ СО АН СССР, 1978. С. 3–11.
- Гаврильев Н.Н.* К литолого-геохимической характеристике усть-кирбинских отложений верхнего рифея Юдомо-Майского прогиба // Стратиграфия, палеонтология и литология осадочных формаций Якутии. Якутск: ИГ СО РАН, 1975. С. 184–191.
- Давыдов Ю.В.* Рифейские карбонатные отложения юго-востока Сибирской платформы и ее обрамления: (состав и происхождение). Новосибирск: Наука, 1975. 108 с.
- Ковач В.П.* Гранитоидные комплексы центральной части Алданской гранулитогнейсовой области (геология и петрология) // Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. СПб: ИГГД РАН, 1994. 16 с.
- Ковач В.П., Великославинский С.Д., Котов А.Б. и др.* Sm-Nd изотопная систематика кислых метавулканитов федоровской толщи Алданского щита (район среднего течения р. Тимптон) // Докл. РАН. 1996а. Т. 347. № 2. С. 236–238.
- Ковач В.П., Котов А.Б., Сальникова Е.Б. и др.* Sm-Nd изотопная систематика курумканской толщи иенгурской серии Алданского щита // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1996б. Т. 4. № 3. С. 3–10.
- Ковач В.П., Котов А.Б., Березкин В.И. и др.* Возрастные границы формирования высокометаморфизованных супракрустальных комплексов центральной части Алданского щита: Sm-Nd изотопные данные // Стратиграфия. Геол. корреляция. 1999. Т. 7. № 1. С. 3–17.
- Ковач В.П., Котов А.Б., Смелов А.П. и др.* Этапы формирования континентальной коры погребенного фундамента восточной части Сибирской платформы // Петрология. 2000. Т. 8. № 4. С. 394–408.
- Котов А.Б.* Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. Автореф. дис. ... докт. геол.-мин. наук. СПб.: ИГГД РАН. 2003. 78 с.
- Котов А.Б., Морозова И.М., Сальникова Е.Б. и др.* Раннепротерозойские гранитоиды северо-западной части Алданской гранулитогнейсовой области: U-Pb и Sm-Nd данные // Геология и геофизика. 1993. Т. 34. № 2. С. 15–21.
- Котов А.Б., Ковач В.П., Сальникова Е.Б. и др.* Этапы формирования континентальной коры центральной части Алданской гранулитогнейсовой области: U-Pb и Sm-Nd изотопные данные по гранитоидам // Петрология. 1995. Т. 3. № 1. С. 99–110.
- Котов А.Б., Шемякин В.М., Сальникова Е.Б. и др.* Этапы формирования и изотопная структура континентальной коры Сутамского блока Алданского щита: Sm-Nd изотопная систематика гранитоидов // Докл. РАН. 1999. Т. 366. № 6. С. 809–812.
- Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Ларин А.М. и др.* Раннепротерозойские гранитоиды зоны сочленения Олекминской гранит-зеленокаменной и Алданской гранулитогнейсовой областей, Алданский щит: возраст, источ-

- ники и геодинамические обстановки формирования // Петрология. 2004. Т. 12. № 1. С. 46–67.
- Котова Л.Н., Подковыров В.Н. Петрохимическая типизация песчаников позднепротерозойских бассейнов Учуро-Майского региона Восточной Сибири // Осадочные формации докембрия и их рудоносность. СПб.: ИГГД РАН, 1998. С. 29–30.
- Котова Л.Н., Подковыров В.Н. Состав, геохимические особенности и источники сноса позднепротерозойских песчаников Учуро-Майского гипостратотипа рифея Ю-В Сибири // Тез. докл. Проблемы литологии, геохимии и рудогенеза осадочного процесса. М.: GEOS, 2000. Т. 1. С. 380–382.
- Котова Л.Н., Подковыров В.Н. Петрохимия песчаников сибирского гипостратотипа рифея (Учуро-Майский регион) // Литология и полезн. ископаемые. 2001. № 2. С. 142–154.
- Ларин А.М., Котов А.Б., Ковач В.П. и др. Этапы формирования континентальной коры центральной части Джугджуро-Становой складчатой области (Sm-Nd изотопные данные по гранитоидам) // Геология и геофизика. 2002. Т. 43. № 4. С. 395–399.
- Маслов А.В., Подковыров В.Н., Ронкин Ю.Л. и др. Долговременные вариации состава верхней коры по данным изучения геохимических особенностей глинистых пород позднего докембрия западного склона Южного Урала и Учуро-Майского региона // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2006. Т. 14. № 2. С. 26–51.
- Неелов А.Н. Петрохимическая классификация метаморфизованных осадочных и вулканогенных пород. Л.: Наука, 1980. 100 с.
- Нужнов С.В. Рифейские отложения юго-востока Сибирской платформы. М.: Наука, 1967. 176 с.
- Петтиджон Ф., Поттер П., Сивер Р. Пески и песчаники. М.: Мир, 1976. 535 с.
- Подковыров В.Н. Сибирский гипостратотип рифея и венда: геохимическая цикличность и изотопная хемотратиграфия разреза // Рифей Северной Евразии. Геология. Общие вопросы стратиграфии. Екатеринбург: УрО РАН, 1997. С. 36–44.
- Подковыров В.Н., Ковач В.П., Котова Л.Н. Модели палеотектоники бассейнов сибирского типа рифея (Учуро-Майский регион): геохимические и Nd изотопные свидетельства по глинистым породам // Тез. совещ. “Суперконтиненты докембрия”, 4–6 июня 2001. Иркутск: ИЗК СО РАН, 2001. С. 44–46.
- Подковыров В.Н., Ковач В.П., Котова Л.Н. Глинистые отложения сибирского гипостратотипа рифея и венда: химический состав, Sm-Nd систематика источников и этапы формирования // Литология и полезн. ископаемые. 2002. № 4. С. 397–418.
- Подковыров В.Н., Котова Л.Н., Ковач В.П. и др. Модельные Sm-Nd возраста источников терригенных осадков и геодинамика бассейнов сибирского гипостратотипа рифея (Учуро-Майский регион) // Изотопная геохронология в решении проблем геодинамики и рудогенеза. Тез. докл. СПб.: ИГГД РАН, 2003. С. 362–365.
- Рифейские отложения Сибирской платформы и прилегающих складчатых областей. Новосибирск: Наука, 1973. 208 с.
- Розен О.М., Нистратов Ю.А. Определение минерального состава осадочных пород по химическим анализам // Сов. геология. 1984. № 3. С. 76–83.
- Розен О.М. Граувакки метаморфических комплексов докембрия (связь состава и геодинамических условий формирования) // Изв. вузов. Геология и разведка. 1993. № 1. С. 36–50.
- Семихатов М.А., Комар Вл.А., Серебряков С.Н. Юдомский комплекс стратотипической местности. М.: Наука, 1970. 208 с.
- Семихатов М.А., Серебряков С.Н. Сибирский гипостратотип рифея. М.: Наука, 1983. 224 с.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Горохов И.М. и др. Низкое отношение $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ в гренвилльском и пост-гренвилльском палеоокеане: определяющие факторы // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2002. Т. 10. № 1. С. 3–46.
- Семихатов М.А., Кузнецов А.Б., Подковыров В.Н. и др. Юдомский комплекс стратотипической местности: С-изотопные хемотратиграфические корреляции и соотношение с вендом // Стратиграфия. Геол. корреляция. 2004. Т. 12. № 5. С. 3–28.
- Сухоруков В.И. Опорные разрезы верхнего рифея хребта Улахан-Бам // Поздний докембрий и ранний палеозой Сибири. Сибирская платформа и внешняя зона Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: Наука, 1986. С. 23–64.
- Тейлор Р.С., Мак-Леннан С.М. Континентальная кора: ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 384 с.
- Cullers R.L. The geochemistry of shales, siltstones and sandstones of Pennsylvanian-Permian age, Colorado, USA: implications for provenance and metamorphic studies // Lithos. 2000. V. 51. P. 181–203.
- Cullers R.L., Podkovyrov V.N. Geochemistry of the Mesoproterozoic Lakhanda Shales in southeastern Yakutia, Russia: implications for mineralogical and provenance control, and recycling // Precambrian Res. 2000. V. 104. P. 77–93.
- Cullers R.L., Podkovyrov V.N. The source and origin of terrigenous sedimentary rocks in the Mesoproterozoic Uj group, southeastern Russia // Precambrian Res. 2002. V. 117. P. 157–184.
- Goldstein S.J., Jacobsen S.B. Nd and Sr isotopic systematics of rivers water suspended material: implications for crustal evolution // Earth. Planet. Sci. Lett. 1988. V. 87. № 3. P. 249–265.
- Jacobsen S.B., Wasserburg G.J. Sm-Nd evolution of chondrites and achondrites // Earth Planet. Sci. Lett. 1984. V. 67. P. 137–150.
- Khudoley A.K., Rainbird R.H., Stern R.A. et al. Sedimentary evolution of the Riphean-Vendian Basin of southeastern Siberia // Precambrian Res. 2001. V. 111. P. 129–163.
- Larin A.M., Amelin Yu.V., Neymark L.A. et al. The origin of the 1.73–1.70 Ga anorogenic Ulfkan volcano-plutonic complex, Siberian platform, Russia: inferences from geochronological, geochemical and Nd-Sr-Pb isotopic data // An. Acad. Bras. 1997. V. 69. № 3. P. 295–312.
- Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motion inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 299. P. 715–717.
- Rainbird R.H., Stern R.A., Khudoley A.K. et al. U-Pb geochronology of Riphean sandstone and gabbro from southeast Siberia and its bearing on the Laurentia-Siberia connection // Earth Planet. Sci. Lett. 1998. V. 164. P. 409–420.
- Semikhatov M.A. General problems of Proterozoic stratigraphy in the USSR // Sov. Sci. Rev. Sec. 6. Geology reviews. N.Y.: Harwood academ publ., 1991. V. 1. Pt 1. 190 p.

Рецензенты А.В. Маслов, М.А. Семихатов