

РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.42:552.513:552.23(571.53/.55)

СОСТАВ И УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЗДНЕДОКЕМБРИЙСКИХ ТЕРРИГЕННЫХ ПОРОД КАРАГАССКОЙ СЕРИИ (БИРЮСИНСКОЕ ПРИСАЯНЬЕ)



З.Л. Мотова, Т.В. Донская, Д.П. Гладкочуб, А.М. Мазукабзов

Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

В работе представлены результаты петрографических и литогеохимических исследований позднедокембрийских терригенных отложений двух свит карагасской серии Бирюсинского Присянья. Полученные данные позволили выявить эпигенетические преобразования изученных пород на стадии позднего катагенеза и установить, что основным источником сноса являлись кислые магматические породы, а одним из наиболее вероятных источников могли быть гранитоиды саянского комплекса, широко распространенные в Присяянском краевом выступе фундамента Сибирского кратона.

Ключевые слова: поздний докембрий, терригенные породы, геохимия, петрография, катагенез, Сибирский кратон.

Введение и современное состояние вопроса

Позднедокембрийские осадочные толщи широко распространены в пределах южной окраины Сибирского кратона. В Бирюсинском Присянье породы этого возраста представлены терригенно-карбонатными отложениями карагасской и оселковой серий. Большинство исследователей [Дольник, Воронцова, 1972; Шенфиль, 1991; Эволюция..., 2006; Метелкин и др., 2010; Летникова и др., 2013; Gladkochub et al., 2019 и др.] считают, что накопление терригенно-карбонатных толщ карагасской и оселковой серий происходило в условиях окраинно-континентального бассейна, связанного с открытием Палеоазиатского океана, омывавшего южный фланг Сибирского кратона в позднем докембрии – раннем палеозое. Е.Ф. Летникова с соавторами [Летникова, Прошенкин, 2012] в результате проведенных петрографических, геохимических и изотопных (Sm-Nd) исследований предположили, что терригенные отложения карагасской серии образовались в результате размыва трахириолитов и ассоциирующего с ними пирокластического материала, неизвестных в настоящее время в пределах исследуемой территории. Ю.К. Советов с соавторами [Советов и др., 2015] на основании исследования крупногалечных конгломератов из базального горизонта шангулежской свиты карагасской серии установили, что обломочный материал в бассейн седиментации этой свиты поступал преимущественно с Сибирского кратона и был представлен осадочными (кремни, фтаниты, алевролиты, доломиты), метаморфическими (гранитогнейсы и ортокварциты) и магматиче-

скими породами (граниты, кварцевые порфиры и их туфы, пегматиты, габбро). Д.П. Гладкочубом с соавторами [Gladkochub et al., 2019] в результате изучения возраста детритовых цирконов U-Pb методом LA-ICP-MS из терригенных отложений карагасской серии были получены исключительно архей-раннепротерозойские возрасты, соответствующие возрасту магматических пород, распространенных на южной окраине Сибирского кратона [Rojas-Agramonte et al., 2011], при этом основные возрастные пики отвечают интервалу 1850–1840 млн лет и соответствуют возрасту гранитоидов саянского комплекса [Левицкий и др., 2002; Туркина и др., 2003, 2006; Донская и др., 2014], распространенных в Присяянском краевом выступе фундамента Сибирского кратона. Такая неоднозначность трактовки основных питающих провинций для терригенных отложений карагасской серии потребовала проведения дополнительных исследований с целью уточнения состава основных источников сноса обломочного материала, поступающего в бассейн седиментации. Для решения данной проблемы нами проведены детальные петрографические и литогеохимические исследования терригенных пород шангулежской и тагульской свит карагасской серии, результаты которых представлены в настоящей статье.

Геологическая характеристика района исследований

В строении Бирюсинского Присянья участвуют несколько тектонических блоков, самым крупным из них является Бирюсинский блок, в пределах ко-

торого широко распространены позднедокембрийские терригенные толщи (рис. 1). Бирюсинский блок протягивается на 350 км от бассейна р. Ока до р. Агул при максимальной ширине 80 км. На юго-востоке Бирюсинский блок примыкает к Урикско-Ийскому грабену, а на юго-западе ограничивается Главным Саянским разломом. На северо-западе

породы Бирюсинского блока перекрываются среднепалеозойскими отложениями Рыбинской впадины. Бирюсинский блок представляет собой гетерогенную структуру, состоящую из позднеархейских (хайламинская и монкресская серии) и раннепротерозойских пород (елашская и неройская серии) [Эволюция..., 2006].

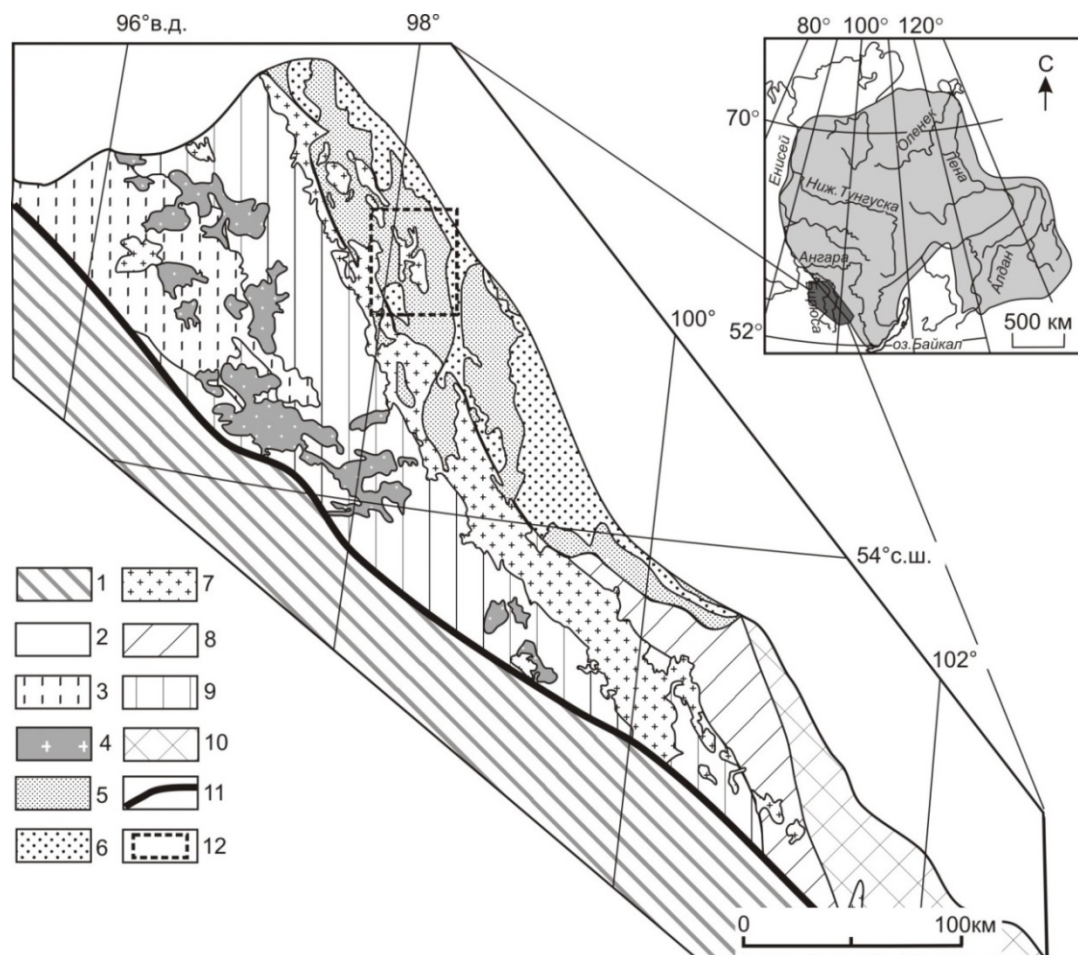


Рис. 1. Геологическая схема Бирюсинского Присянья [Галимова и др., 2012]

1 – Центрально-Азиатский складчатый пояс; 2 – фанерозойские образования чехла Сибирской платформы; 3 – девонские вулканогенно-осадочные породы наложенных впадин; 4 – палеозойские гранитоиды; 5 – осадочные отложения оселковской серии; 6 – осадочные отложения карагасской серии; 7 – раннепротерозойские постколлизийные гранитоиды; 8 – раннепротерозойские образования Урикско-Ийского блока фундамента Сибирского кратона; 9 – раннепротерозойские – архейские образования Бирюсинского блока фундамента Сибирского кратона; 10 – архейские образования Шарыжалгайского выступа фундамента Сибирского кратона; 11 – Главный Саянский разлом; 12 – участок детальных работ.

На врезке показаны контуры Сибирской платформы и район исследований.

Fig. 1. The geological scheme of the Biryusa Sayan Region [Galimova et al., 2012]

1 – Central Asian fold belt; 2 – Phanerozoic formations of the Siberian platform; 3 – Devonian volcanic-sedimentary rocks; 4 – Paleozoic granitoids; 5 – sedimentary rocks of the Oselok suite; 6 – sedimentary rocks of the Karagas suite; 7 – Early Proterozoic post-collisional granitoids; 8 – Early Proterozoic formations of the Urik-Iya block; 9 – Early Proterozoic-Archean formations of the Biryusa block; 10 – Archean formations of the Sharyzhalgai block; 11 – The main Sayan fault; 12 – section of detailed work.

The inset shows the contours of the Siberian platform and the study area.

В пределах Бирюсинского блока распространены раннепротерозойские гранитоиды саянского комплекса, прослеживающиеся вдоль зоны его сочленения с другими блоками Сибирского кратона. U-Pb возраст гранитоидов саянского комплекса варьируется от $1\,858 \pm 20$ до $1\,874 \pm 14$ млн лет [Левицкий и

др., 2002; Туркина и др., 2003, 2006; Донская и др., 2014]. Гранитоиды прорывают позднеархейские образования хайламинской и монкресской серий, а также раннепротерозойские образования елашской серии. В составе карагасской серии выделяются три свиты (снизу вверх) (рис. 2): шангулежская, тагуль-

ская и ипситская. Каждая из свит представляет собой крупный седиментационный цикл [Хоментовский и др., 1972; Шенфиль, 1991].

Шангулежская свита с разрывом залегает на архейских и раннепротерозойских образованиях фундамента Сибирского кратона. В основании свиты находится горизонт конгломератов, выше по разрезу свита сложена разнозернистыми кварцевыми и аркозовыми песчаниками с линзами гравелитов, мелкогалечных конгломератов, алевролитов и аргиллитов. В верхней части разреза свиты залегают кремнистые доломиты, доломиты в переслаивании с алевролитами, аргиллитами и кремнистыми породами. Общая мощность шан-

гулежской свиты составляет 450–500 м. Тагульская свита с небольшим разрывом залегает на породах шангулежской свиты и представлена красноцветными терригенно-карбонатными отложениями. Нижняя часть разреза сложена мелкогалечными конгломератами и гравелитами, выше залегают песчаники и алевролиты с прослоями доломитов. В верхней части свиты залегает толща тонко ритмично переслаивающихся алевролитов, алевролитистых аргиллитов с прослоями микрофитолитовых и строматолитовых доломитов [Брагин, 1986; Галимова и др., 2012; Советов и др., 2012]. Мощность тагульской свиты варьируется от 600 до 1000 м.

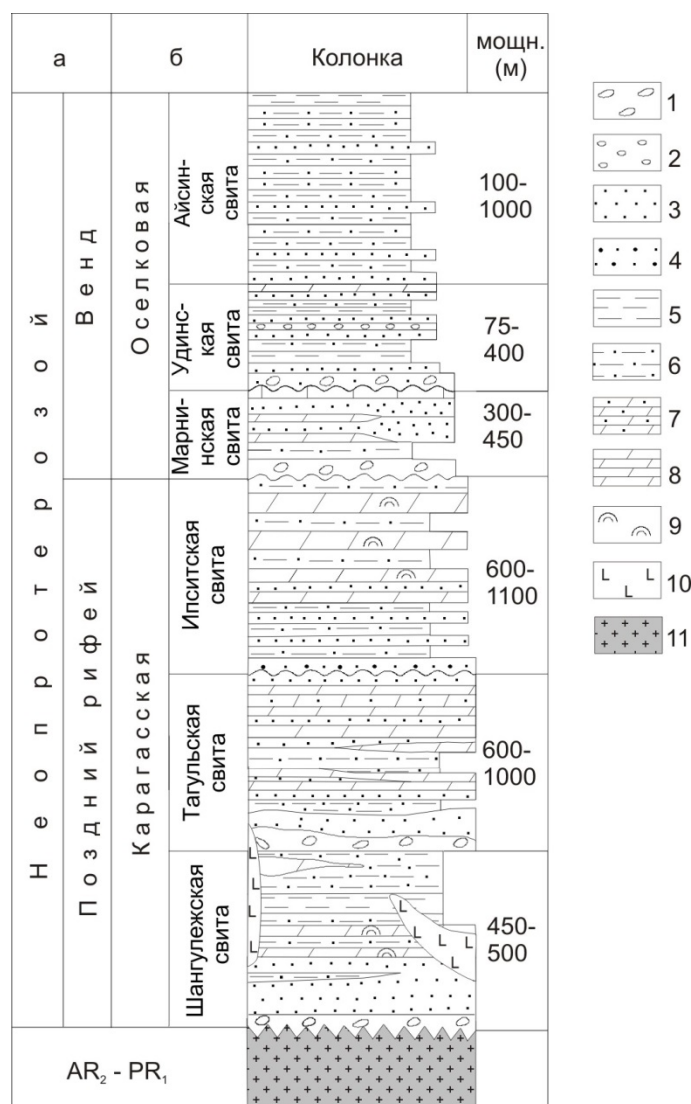


Рис. 2. Литологическая колонка докембрийских образований Бирюсинского Присянья модифицирована после [Решения..., 1983; Брагин, 1986]

а – общая хроностратиграфическая шкала; б – серии и свиты. 1 – конгломераты; 2 – мелкогалечные конгломераты и гравелиты; 3 – песчаники; 4 – кремнистые алевролиты и песчаники; 5 – аргиллиты; 6 – алевролиты; 7 – песчаные доломиты; 8 – доломиты; 9 – строматолиты и микрофитолиты; 10 – долериты и габбро-долериты; 11 – позднеархейский-раннепротерозойский фундамент Сибирского кратона

Fig. 2. The lithological column of Precambrian formations of the Biryusa Sayan Region modified after [Decision..., 1983; Bragin, 1986]

а – general chronostratigraphic scale; б – series and suites. 1 – conglomerates; 2 – small pebble conglomerates and gravelites; 3 – sandstones; 4 – siliceous siltstones and sandstones; 5 – mudstones; 6 – siltstones; 7 – sandy dolomites; 8 – dolomites; 9 – stromatolites and microphytolites; 10 – dolerites and gabbro-dolerites; 11 – Late Archean-Early Proterozoic foundation of the Siberian craton

Ипситская свита со стратиграфическим несогласием залегает на отложениях тагульской свиты. Нижняя часть свиты, однородная по составу, представлена тонкозернистыми кварцевыми и аркозовыми песчаниками. Верхняя часть свиты отличается резкой сменой набора пород и сложена доломитами, микрофитолитовыми доломитами, часто окремненными, переслаивающимися с алевролитами и аргиллитами. Мощность ипситской свиты изменяется от 600 до 1100 м.

Позднедокембрийский возраст отложений карагасской серии принимается на основании находок средне- и верхнерифейских строматолитов и микрофитолитов [Решения..., 1983], присутствия в разрезе шангулежской свиты силлов и даек габбро-долеритов нерсинского комплекса с Ar-Ar возрастом по плагиоклазу 741 ± 4 млн лет [Gladkochub et al., 2006], а также на основании U-Pb (LA-ICP-MS) гео-

хронологических исследований детритовых цирконов из терригенных отложений карагасской серии [Gladkochub et al., 2019].

Методы исследований

Петрографические и литогеохимические исследования терригенных отложений шангулежской и тагульской свит проведены по образцам, отобранным из коренных обнажений, расположенных по левому и правому бортам среднего течения р. Бирюса (рис. 3), сложенных в основном аркозовыми песчаниками и алевропесчаниками. Всего из отложений шангулежской и тагульской свит были отобраны 32 пробы аркозовых песчаников и алевропесчаников, в том числе 16 образцов из отложений шангулежской свиты, и 16 образцов из тагульской свиты.

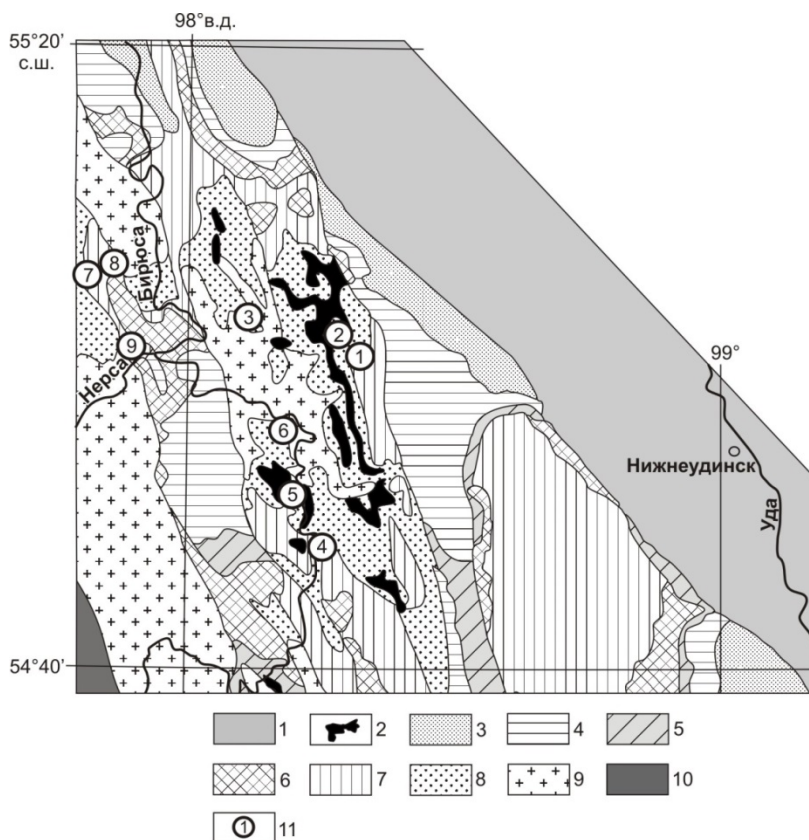


Рис. 3. Геологическая карта участка детальных работ [Галимова и др., 2012]

1 – фанерозойские образования чехла Сибирской платформы; 2 – дайки и силлы долеритов и габбродолеритов; 3–5 – оселковая серия: 3 – песчаники, алевролиты и аргиллиты айсинской свиты; 4 – песчаники, алевролиты, аргиллиты и гравеллиты удинской свиты; 5 – алевролиты, песчаники, известняки и доломиты марнинской свиты; 6–8 – карагасская серия: 6 – алевролиты, песчаники и доломиты ипситской свиты; 7 – песчаники, аргиллиты, алевролиты и доломиты тагульской свиты; 8 – конгломераты, песчаники, алевролиты и доломиты шангулежской свиты; 9 – раннепротерозойские гранитоиды саянского комплекса; 10 – раннепротерозойские – позднеархейские образования Бирюсинского блока фундамента Сибирского кратона; 11 – места отбора проб для литологических исследований и их номера (см. табл. 1).

Fig. 3. Geological map of the area of detailed work [according to Galimova et al., 2012]

1 – Phanerozoic formations of the Siberian platform; 2 – dikes and sills of dolerites and gabbrodolerites; 3–5 – oselok group: 3 – sandstones, siltstones and mudstones of the Aisa suite; 4 – sandstones, siltstones, mudstones and gravelstones of the Uda suite; 5 – siltstones, sandstones, limestones and dolomites of the Marnya suite; 6–8 – Karagas group: 6 – siltstones, sandstones and dolomites of the Ipsit suite; 7 – sandstones, mudstones, siltstones and dolomites of the Tagul suite; 8 – conglomerates, sandstones, siltstones and dolomites of the Shangulezh suite; 9 – Early Proterozoic granitoids of the Sayan complex; 10 – Early Proterozoic-Late Archean formations of the Biryusa block of the Siberian craton; 11 – sampling sites for lithological studies and their numbers (see Table 1).

Петрографические исследования шлифов были выполнены в Институте земной коры СО РАН с использованием поляризационных микроскопов Polam P-112 и Olympus BX53P. Определение основных петрогенных оксидов выполнено методом силикатного анализа в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК СО РАН (аналитики: Царева Н.Ю., Бондарева Г.В.) по методике [Ревенко, 2014]. Содержания редких и редкоземельных элементов определены методом ICP-MS в Лимнологическом институте СО РАН, ОПЦКП «Ультрамикроанализ», на квадрупольном масс-спектрометре Agilent 7500ce (Agilent Technologies Inc., США) (аналитик Пантеева С.В.). Концентрации элементов рассчитаны относительно международных стандартов AGV-2, BCR-2, JG-2, G-2, GSP-2. Химическое разложение проб для ICP-MS анализа проводилось в ЦКП «Геодинамика и геохронология» ИЗК

СО РАН методом сплавления с метаборатом лития, по методике [Panteeva et al., 2003]. Ошибка определений редких и редкоземельных элементов методом ICP-MS составляла не более 5%.

Петрографическая характеристика

По минеральному составу, в соответствии с классификацией по В.Н. Шванову [Шванов, 1987] (рис. 4), изученные породы шангулежской свиты классифицируются как олигомиктовые (полевошпат-кварцевые) песчаники и мезомиктовые (субаркозы) песчаники. Породы тагульской свиты, в соответствии с данной классификацией, относятся к олигомиктовым (полевошпат-кварцевым) песчаникам и аркозовым алевропесчаникам (рис. 4). Микрофотографии шлифов из образцов пород каждой группы приведены в табл. 1.



Рис. 4. Классификация песчаных и алевритовых пород [Шванов, 1987]

1 – точки составов пород шангулежской свиты; 2 – точки составов пород тагульской свиты

Fig. 4. Classification of sand and silty rocks [Shvanov, 1987]

1 – points of rock composition of the Shangulezhskaya suite; 2 – points of composition of rocks of the Tagul suite

Олигомиктовые (полевошпат-кварцевые) песчаники шангулежской свиты сложены полуокатанным и неокатанным обломочным материалом плохой и средней степени сортировки. Цемент глинистый. Структура псаммитовая, текстура массивная. В минеральном составе этих песчаников преобладают кварц (75–86%) и полевые шпаты (8–17%), представленные калиевыми полевыми шпатами и плагиоклазами. Второстепенные минералы представлены рудным минералом (ильменит) – 1–2%, биотитом – 1% и светлой слюдой – 1–3%. Акцессорные

минералы: сфен-лейкоксен, турмалин, апатит и циркон. Обломки пород (3–10%) представлены кислыми эффузивами, кремнями и гранитоидами. Кварц в породе окатан, корродирован, имеет волнистое погасание и массу включений гидроокислов железа. Повсеместно отмечается регенерация обломочных зерен кварца. Обломки полевых шпатов корродированы, плагиоклазы серицитизированы, калиевые полевые шпаты интенсивно пелитизированы и «пропитаны» гидроокислами железа. Также в породе отмечается повсеместное присутствие новообразованного

игольчатого тремолит-актинолитового агрегата с примесью хлорита и светлой слюды.

Мезомиктовые песчаники (субаркозы) шангулежской свиты сложены плохо отсортированным полуокатанным и неокатанным обломочным материалом. Цемент базально-поровый, глинисто-карбонатный. Структура породы псаммитовая, текстура массивная. В минеральном составе этих песчаников преобладают кварц (58–70%) и полевые шпаты (16–30%). Второстепенные минералы: рудный минерал (ильменит) (3–5%) и гидроокислы железа (2–4%). Среди минералов акцессорной группы наблюдаются циркон, турмалин, сфен-лейкоксен и светлая слюда. Обломки пород (2–18%) представлены кремнями, кислыми эффузивами и гранитоидами. Кварц в породе корродирован, трещиноват, имеет волнистое погасание. Края обломков кварца неровные, реакционные, разъедены цементирующим карбонатом. Отмечается интенсивная пелити-

зация калиевых полевых шпатов и серицитизация плагиоклазов. Края обломков полевых шпатов также разъедены цементирующим веществом.

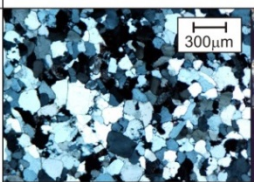
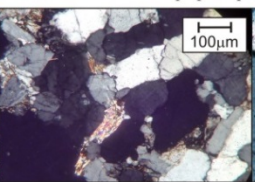
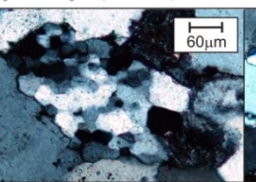
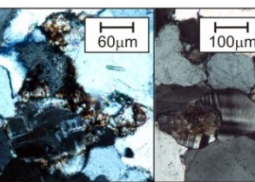
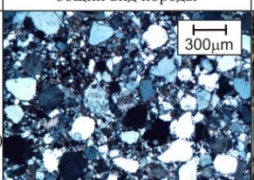
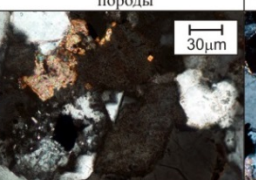
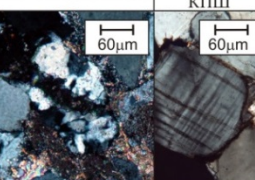
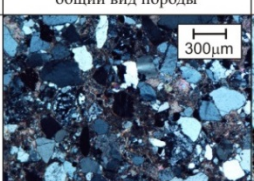
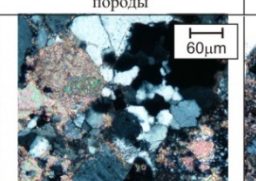
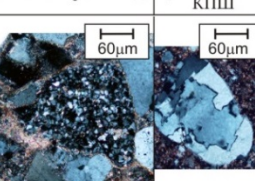
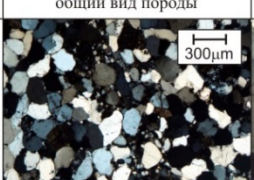
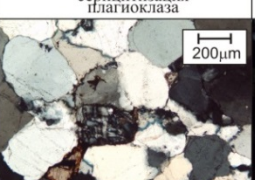
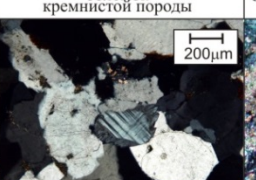
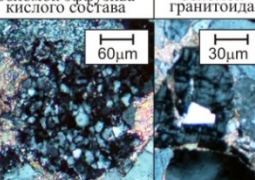
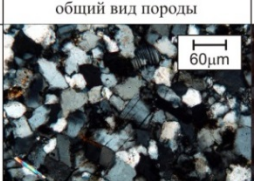
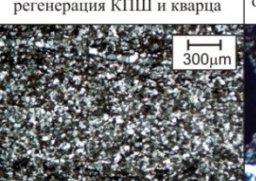
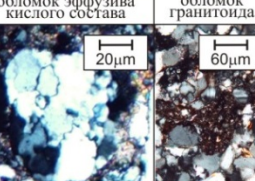
Аркозовые песчаники шангулежской свиты сложены полуокатанным и неокатанным, плохо отсортированным обломочным материалом. Цемент контакто-поровый, глинистый. Структура псаммитовая, текстура пятнистая. В минеральном составе преобладает кварц – 74% и полевые шпаты – 17%. Второстепенные минералы представлены гидроокислами железа (1–2%). Акцессорные минералы: циркон, турмалин, светлая слюда и сфен-лейкоксен. Среди обломков пород (8%) различаются гранитоиды и кремни. Кварц в породе имеет волнистое погасание и заполнен включениями гидроокислов железа. Полевые шпаты трещиноваты, обогащены гидроокислами железа. Калиевые полевые шпаты пелитизированы, плагиоклазы серицитизированы.

Таблица 1

Микрофотографии шлифов из песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит карагасской серии

Table 1

Microphotographs of thin sections from sandstones and siltstones of the Shangulezh and Tagul suites of the Karagas group

Свита	Порода	Микрофотографии шлифов (николи ×)				
Шангулежская свита	Олиго-миктовые (полево-шпат-кварцевые) песчаники					
		общий вид породы	тремолит-актинолитовый агрегат с примесью хлорита	обломок кремнистой породы	обломок гранитоида	пелитизация КПШ
Шангулежская свита	Мезо-миктовые песчаники (субаркозы)					
		общий вид породы	серицитизация плагиоклаза	обломок кремнистой породы	обломок гранитоида	регенерация КПШ
Шангулежская свита	Аркозовые песчаники					
		общий вид породы	серицитизация плагиоклаза	обломок кремнистой породы	обломок эффузива кислого состава	обломок гранитоида
Тагульская свита	Олиго-миктовые (полево-шпат-кварцевые) песчаники					
		общий вид породы	регенерация кварца	регенерация КПШ и кварца	обломок эффузива кислого состава	обломок гранитоида
Тагульская свита	Аркозовые алевропесчаники					
		общий вид породы	обломок гранитоида	микротрещины заполнены новообразованным кварцем	обломок кремнистой породы	пелитизация КПШ

Олигомиктовые (полевошпат-кварцевые песчаники) тагульской свиты сложены полуокатанным и неокатанным обломочным материалом средней степени сортировки. Цемент регенерационный, карбонатно-кремнистый, кремнистый. Структура псаммитовая, текстура массивная. В минеральном составе преобладают кварц (77–80%) и полевые шпаты (9–10%). Второстепенные минералы представлены рудным минералом (ильменит) (1%) и светлой слюдой (1–2%). Акцессорные минералы: циркон и апатит. Среди обломков пород (8–12%) выделяются гранитоиды, кварциты и кислые эффузивы. Кварц в породе корродирован, трещиноват, имеет волнистое погасание. Повсеместно отмечается регенерация обломочных зерен кварца. Полевые шпаты представлены калиевыми полевыми шпатами и плагиоклазами. Калиевые полевые шпаты пелитизированы, плагиоклазы серицитизированы. Порода катаклазирована, по микротрещинам интенсивно развиваются гидроокислы железа.

Аркозовые алевропесчаники тагульской свиты сложены полуокатанным и неокатанным обломочным материалом средней степени сортировки. Цемент контактовый, регенерационный, глинисто-гидрослюдистый. Структура пород алевропсаммитовая. Ориентированная микрослоистая текстура породы определяется однонаправленно ориентированными чешуйками биотита и мусковита. В минеральном составе аркозовых алевропесчаников преобладают кварц (51–70%) и полевые шпаты (27–46%). Второстепенные минералы представлены мусковитом (2–3%), биотитом (1–3%) и серицитом (1%). Акцессорные минералы: апатит, турмалин, ильменит, сфен-лейкоксен, циркон. Обломки пород (1–4%) представлены эффузивами кислого состава и гранитоидами. Кварц в породе трещиноват, давлен, имеет волнистое погасание. Полевые шпаты представлены калиевыми полевыми шпатами и плагиоклазами. Калиевые полевые шпаты интенсивно пелитизированы, плагиоклазы серицитизированы. В породе отмечается регенерация обломочных зерен кварца и полевых шпатов, а также хлоритизация биотита и мусковита. Микротрещины в породе заполнены новообразованным кварцем, по которому развиваются гидроокислы железа.

Литогеохимическая характеристика

Петрогенные элементы. Петрохимическая характеристика терригенных пород шангулежской и тагульской свит карагасской серии приведена с использованием 32 представительных анализов образцов песчаников и алевропесчаников, которые приведены в табл. 2.

Петрохимическая классификация терригенных отложений шангулежской и тагульской свит прове-

дена с использованием диаграммы Ф. Дж. Петтиджона с соавторами [Pettijohn et al., 1972]. Для генетической типизации аркозовых песчаников и алевропесчаников была использована система петрохимических модулей [Юдович, Кетрис, 2000]: ГМ (гидролизатный) = $(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO})/\text{SiO}_2$, ТМ (титановый) = $\text{TiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3$, ЖМ (железный) = $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO})/(\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$, ФМ (фемический) = $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MgO})/\text{SiO}_2$, АМ (алюмокремневый) = $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{SiO}_2$, рассчитанные значения которых приведены в табл. 2.

Олигомиктовые (полевошпат-кварцевые) песчаники шангулежской и тагульской свит обнаруживают концентрации SiO_2 , варьирующие от 65,16 до 97,22 мас.%. Концентрации Al_2O_3 в песчаниках этой группы изменяются от 1,59 до 13,79 мас. %. Отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ в этих породах изменяется от 1 до 290. Рассчитанные значения гидролизатного модуля (ГМ = 0,02–0,16), наряду с концентрациями MgO (0,07–2,96 мас. %) и низкими значениями титанового модуля (ТМ = 0,01–0,04) и фемического модуля (ФМ = 0,01–0,14), позволяют классифицировать эти породы как силиты [Юдович, Кетрис, 2000]. Повышенные относительно фемического и титанового модулей значения железного модуля (ЖМ = 0,10–1,18), являются признаком наличия эпигенетических преобразований в песчаниках этой группы [Юдович, Кетрис, 2000].

Мезомиктовые песчаники (субаркозы) шангулежской свиты характеризуются содержаниями SiO_2 , варьирующими от 67,54 до 92,70 мас. % и Al_2O_3 – от 3,72 до 11,00 мас. %. Отношение $\text{K}_2\text{O}/\text{Na}_2\text{O}$ в песчаниках этой группы варьируется от 7 до 96. Значение гидролизатного модуля (ГМ = 0,11–0,23) и низкая магнезиальность (MgO = 0,03–0,07 мас. %) позволяют классифицировать эти песчаники как силиты. Как и олигомиктовые песчаники, породы этой группы характеризуются низкими значениями фемического (ФМ = 0,04–0,13) и титанового (ТМ = 0,02–0,04) модулей, относительно повышенных значений железного модуля (ЖМ = 0,24–0,74), что указывает на эпигенетическую проработку этих песчаников с образованием аутигенных минералов [Юдович, Кетрис, 2000].

Аркозовые песчаники тагульской и шангулежской свит характеризуются значениями SiO_2 , варьирующими от 74,43 до 92,70 мас. %, концентрации Al_2O_3 , изменяются от 0,20 до 3,27 мас. %. Значение $\text{K}_2\text{O}/\text{Al}_2\text{O}_3$ в этих породах варьируется от 44 до 94. Рассчитанная величина гидролизатного модуля (ГМ = 0,06–0,21) и низкая магнезиальность (MgO = 0,06–0,91) позволяет отнести эти породы к силитам. Для аркозовых алевропесчаников обеих свит отмечаются повышенные значения железного модуля (ЖМ = 0,09–0,43) относительно фемического (ФМ = 0,01–0,08) и титанового (ТМ = 0,01–0,04) мо-

дулей, что свидетельствует о наличии процессов эпигенетической проработки этих пород с образованием аутигенных минералов [Юдович, Кетрис, 2000].

Все исследуемые породы обнаруживают низкие показатели титанистости ($TM = 0,01-0,04$), позитивную корреляцию TM – $ЖМ$ ($r = 0,13$) и $ГМ$ – $ФМ$ ($r = 0,8$), (рис. 5, а, б), что в совокупности дает основание отнести их к осадочным породам первого цикла седиментации (т.е. образованным за счет разрушения первично-магматических пород) [Юдович, Кетрис, 2000]. На модульных диаграммах (рис. 5, а, б), наблюдается перекрытие точек составов песчанников и алевропесчанников шангулежской и тагульской свит карагасской серии, что свидетельствует об их генетическом родстве.

На классификационной диаграмме Ф.Дж. Петтиджона с соавторами [Pettijohn et al., 1972] (см. рис. 6)

большинство точек состава изученных пород шангулежской и тагульской свит расположены в поле пород, для которых характерны аномально низкие содержания Na_2O и отношение $\log(Na_2O/K_2O) < -1$, что свидетельствует о потере Na при эпигенетических преобразованиях. Породы с $\log(Na_2O/K_2O) > -1$ располагаются в полях аркозов, субаркозов и сублититов (рис. 6).

Редкие и рассеянные элементы. Содержания редких и рассеянных элементов в представленных образцах пород шангулежской и тагульской свит, а также отношения некоторых редких элементов приведены в табл. 3. Для наглядности особенностей распределения этих элементов в изученных песчаниках и алевропесчаниках проведено сопоставление их концентраций с таковыми в среднем протерозойском кратонном песчанике (СПКП) [Condie, 1993].

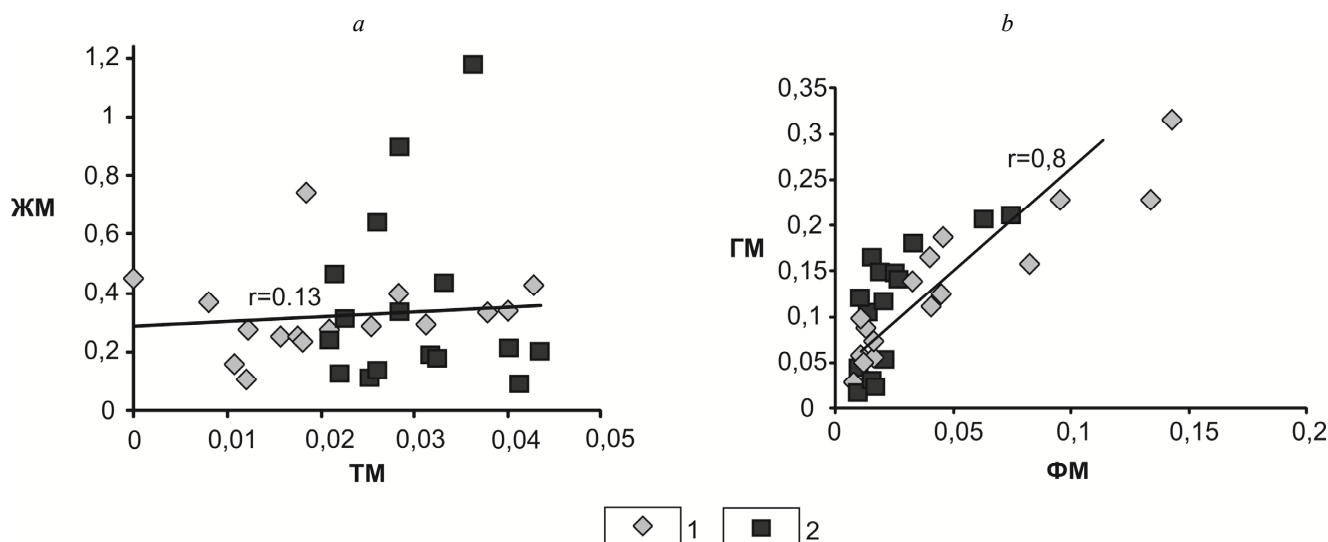


Рис. 5. Модульные диаграммы TM – $ЖМ$ (а), $ГМ$ – $ФМ$ (б) для песчаников и алевропесчанников шангулежской и тагульской свит карагасской серии [Юдович, Кетрис, 2000]

1 – песчаники и алевропесчаники шангулежской свиты; 2 – песчаники и алевропесчаники тагульской свиты

Fig. 5. Modular diagrams TM – $ЖМ$ (а), $ГМ$ – $ФМ$ (б) for sandstones and siltstones of the Shangulezh and Tagul suites of the Karagas group [Yudovich, Ketris, 2000]

1 – sandstones and siltstones of the Shangulezh suite; 2 – sandstones and siltstones of the Tagul suite

Таблица 2

Петрохимический состав терригенных отложений карагасской серии

Table 2

Major element (wt.%) concentrations for clastic rocks of the Karagas group

Компо- нент, мас. %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Шангулежская свита (Shangulezh suite)															
	Олигомиктовые (полевошпат-кварцевые) песчаники										Мезомиктовые песчаники (субаркозы)					Арко- зы
	Т.н.1		Т.н.2			Т.н.3	Т.н.4	Т.н.5		Т.н.6	Т.н.1		Т.н.6			Т.н.3
	1115	1116	1118	1119	1120	1121	1126	1133	1134	1138	1114	1117	1139	1140	1141	1122
SiO ₂	81,9	69,6	81,94	90,70	91,20	96,50	65,16	85,74	87,13	91,60	67,54	81,11	69,25	71,75	67,69	92,70
TiO ₂	0,20	0,30	0,22	0,06	0,07	<0,02	0,59	0,09	0,07	0,08	0,44	0,21	0,16	0,17	0,16	0,03
Al ₂ O ₃	7,08	7,91	8,65	4,90	3,98	1,59	13,79	7,49	6,49	3,85	11,0	6,72	10,2	9,4	8,7	3,72
Fe ₂ O ₃	1,90	2,06	1,73	0,36	<0,20	<0,20	2,16	<0,20	<0,20	<0,20	3,15	1,12	1,34	0,46	0,69	<0,20

Компонент, мас. %	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Шангулужская свита (Shangulezh suite)															
	Олигомиктовые (полевошпат-кварцевые) песчаники										Мезомиктовые песчаники (субаркозы)					Аркозы
	Т.н.1		Т.н.2			Т.н.3	Т.н.4	Т.н.5		Т.н.6	Т.н.1		Т.н.6			Т.н.3
	1115	1116	1118	1119	1120	1121	1126	1133	1134	1138	1114	1117	1139	1140	1141	1122
FeO	0,93	0,66	0,78	0,98	1,02	0,72	4,0	0,78	1,02	0,98	0,71	0,89	1,18	1,75	5,81	1,32
MnO	0,05	0,04	0,03	0,02	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,04	0,03	0,07	0,06	0,07	<0,01
MgO	0,65	2,96	0,13	0,13	0,13	0,07	3,16	0,23	0,10	0,17	2,55	1,27	0,56	0,62	2,5	0,13
CaO	0,61	3,86	0,06	<0,05	<0,05	<0,05	0,51	0,31	0,22	<0,05	1,94	0,41	5,2	4,79	4,11	<0,05
Na ₂ O	0,12	0,08	1,83	1,21	0,95	0,03	0,13	1,2	0,64	0,48	0,09	0,11	0,75	0,56	0,14	0,04
K ₂ O	5,33	6,24	3,38	1,09	1,88	0,94	7,24	3,76	4,04	2,03	8,62	4,89	5,39	5,13	4,26	1,77
P ₂ O ₅	0,09	0,11	0,05	<0,03	<0,03	<0,03	0,14	<0,03	<0,03	0,04	0,13	0,11	0,07	0,07	0,08	<0,03
п.п.п.	0,16	0,26	0,57	0,49	0,33	0,06	2,64	0,09	0,06	0,30	0,80	0,12	1,12	0,94	2,36	0,14
CO ₂	0,82	5,81	0,19	н. обн	н. обн	0,08	0,25	0,2	0,14	0,06	2,73	1,95	4,51	4,03	3,22	0,07
Сумма	99,84	99,89	99,56	99,94	99,56	99,99	99,77	99,89	99,91	99,59	99,74	98,94	99,80	99,73	99,79	99,92
K ₂ O/Na ₂ O	44	78	2	1	2	31	56	3	6	4	96	44	7	9	30	44
ГМ	0,12	0,16	0,14	0,07	0,06	0,02	0,32	0,10	0,09	0,05	0,23	0,11	0,19	0,17	0,23	0,06
ТМ	0,03	0,04	0,03	0,01	0,02	–	0,04	0,01	0,01	0,02	0,04	0,03	0,02	0,02	0,02	0,01
ЖМ	0,40	0,34	0,29	0,27	0,25	0,45	0,43	0,10	0,16	0,25	0,34	0,29	0,25	0,24	0,74	0,37
ФМ	0,04	0,08	0,03	0,02	0,01	0,01	0,14	0,01	0,01	0,01	0,10	0,04	0,05	0,04	0,13	0,02

Окончание табл. 2

End of Table 2

Компонент (мас. %)	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32
	Тагульская свита (Tagul suite)															
	Олигомиктовые (полевошпат-кварцевые) песчаники						Аркозовые алевропесчаники									
	Т.н.8						Т.н.9									
	1286	1286/1	1286/2	1286/3	1286/4	1286/5	z1326	z1327	z1328	z1329	z1330	z1331	z1332	z1333	z1334	z1335
SiO ₂	91,63	92,71	92,21	95,82	95,92	97,22	84,19	83,27	82,21	79,65	80,33	75,05	77,07	78,15	74,73	80,20
TiO ₂	0,07	0,07	0,07	0,04	0,04	0,03	0,20	0,26	0,36	0,22	0,30	0,32	0,44	0,28	0,35	0,39
Al ₂ O ₃	3,25	3,10	3,35	1,10	1,40	1,15	7,53	7,85	8,66	10,09	9,49	11,31	10,98	11,21	10,59	9,06
Fe ₂ O ₃	0,46	0,29	0,35	0,31	0,27	0,29	0,26	0,53	0,24	0,48	0,92	0,20	1,34	0,43	2,24	0,57
FeO	1,06	0,68	0,48	1,02	1,01	0,45	0,76	0,91	0,54	0,79	0,92	3,67	1,09	0,74	2,47	1,31
MnO	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01
MgO	0,17	0,10	0,10	0,15	0,10	0,10	0,07	0,24	0,09	0,25	0,21	0,86	0,14	0,06	0,91	0,33
CaO	0,34	0,18	0,13	0,41	0,10	0,10	0,11	0,05	0,10	0,07	0,05	0,07	0,27	0,27	0,05	0,14
Na ₂ O	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	0,01	0,01	0,07	0,07	0,08	0,08	0,08	0,08	0,10	0,09	0,07	0,09
K ₂ O	2,90	2,83	2,93	0,92	1,30	0,88	6,17	5,86	6,72	7,50	6,89	7,19	7,97	8,38	6,45	6,65
P ₂ O ₅	0,08	0,08	0,08	0,06	0,03	0,04	0,12	0,07	0,08	0,07	0,11	0,09	0,21	0,25	0,09	0,14
п.п.п.	0,30	0,05	0,05	0,05	0,32	0,05	0,24	0,39	0,35	0,45	0,65	1,32	0,38	0,24	1,73	0,73
CO ₂	н. обн	0,26	0,06	0,50	0,06	0,07	0,08	0,10	0,06	0,11	0,07	0,23	0,22	0,15	0,20	0,24
Сумма	100,26	100,35	99,81	100,39	100,56	100,39	99,80	99,60	99,49	99,76	100,02	100,39	100,21	100,25	99,88	99,85
K ₂ O/Na ₂ O	290	283	293	92	130	88	88	84	84	94	86	90	80	93	92	74
ГМ	0,05	0,04	0,05	0,03	0,03	0,02	0,10	0,11	0,12	0,15	0,14	0,21	0,18	0,16	0,21	0,14
ТМ	0,02	0,02	0,02	0,04	0,03	0,03	0,03	0,03	0,04	0,02	0,03	0,03	0,04	0,03	0,03	0,04
ЖМ	0,46	0,31	0,25	1,18	0,90	0,64	0,13	0,18	0,09	0,12	0,19	0,33	0,21	0,10	0,43	0,20
ФМ	0,02	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,06	0,03	0,02	0,08	0,03

Примечание. Т.н. – место отбора проб; н. обн. – оксиды не обнаружены; ¹ – песчаники; ² – алевропесчаники; Петрохимические модули [Юдович, Кетрис, 2000]: ГМ (гидролизатный) = $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} / \text{SiO}_2$; ТМ (титановый) = $\text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$; ЖМ (железный) = $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$; ФМ (фемический) = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$.

Note. Т.н. – sampling location; н. обн. – no oxides detected; ¹ – sandstones; ² – silt sandstones; Petrochemical modules [Yudovich, Ketris, 2000]: ГМ (hydrolyzatic) = $\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2 + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} / \text{SiO}_2$; ТМ (titanic) = $\text{TiO}_2 / \text{Al}_2\text{O}_3$; ЖМ (ferreous) = $(\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{MnO}) / (\text{Al}_2\text{O}_3 + \text{TiO}_2)$; ФМ (femic) = $(\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{FeO} + \text{MnO} + \text{MgO}) / \text{SiO}_2$.

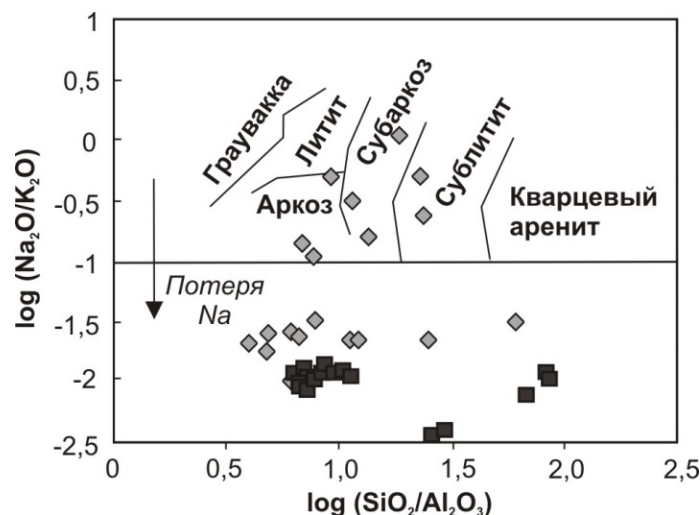


Рис. 6. Классификационная диаграмма $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) - \log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ для песчаников [Pettijohn et al., 1972]
Условные обозначения см. на рис. 5

Fig. 6. The classification diagram $\log(\text{Na}_2\text{O}/\text{K}_2\text{O}) - \log(\text{SiO}_2/\text{Al}_2\text{O}_3)$ for sandstones [Pettijohn et al., 1972]
Legend see fig. 5

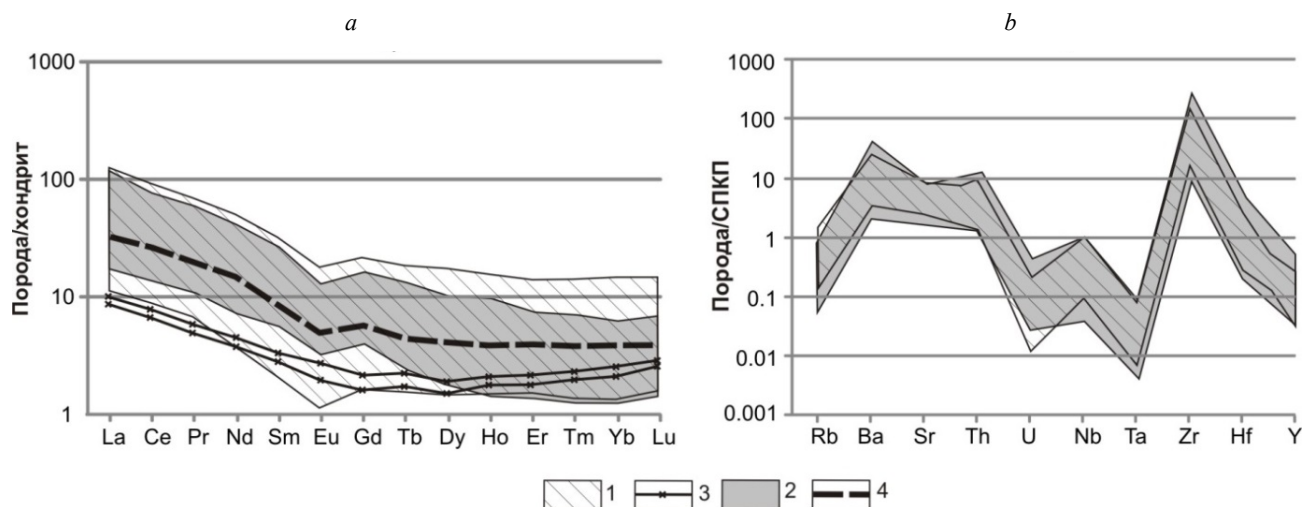


Рис. 7. Спектры распределения РЗЭ, нормированные по хондриту [Boynton, 1984] (a); содержания ряда элементов-примесей, нормированные на СПКП [Condie, 1993] (b) для песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит карагасской серии

1 – аркозовые песчаники и алевропесчаники шангулежской свиты; 2 – аркозовые песчаники и алевропесчаники тагульской свиты; 3 – образцы аркозовых песчаников шангулежской свиты № 1133 и 1134; 4 – спектр распределения РЗЭ среднего протерозойского кратонного песчаника К. Конди (СПКП) [Condie, 1993]

Fig. 7. REE distribution spectra normalized by chondrite [Boynton, 1984] (a); the contents of a number of impurity elements normalized to CPKP [Condie, 1993] (b) for sandstones and siltstones of the Shangulezh and Tagul suites of the Karagas group.

1 – arkoses sandstones and siltstones of the Shangulezh suite; 2 – arkoses sandstones and siltstones of the Tagul suite; 3 – samples of arkoses sandstones of the Shangulezh suite No. 1133 and 1134; 4 – distribution spectrum of REE of the middle Proterozoic cratonic sandstone K. Kondi (SPKP) [Condie, 1993]

Таблица 3

Содержания редких и рассеянных элементов в терригенных породах карагасской серии

Table 3

Rare earth element (ppm) concentrations for clastic rocks of the Karagas group

Элемент, отношение	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16
	Шангулежская свита (Shangulezh suite)															
	Олигомиктовые (полевошпат-кварцевые) песчаники										Мезомиктовые песчаники (субаркозы)					Аркозы
	Т.н.1		Т.н.2			Т.н.3	Т.н.4	Т.н.5		Т.н.6	Т.н.1		Т.н.6			Т.н. 3
	1115	1116	1118	1119	1120	1121	1126	1133	1134	1138	1114	1117	1139	1140	1141	1122
Rb, г/т	60,98	70,58	90,55	30,07	46,69	35,36	139,72	86,50	91,74	52,72	89,97	60,23	227,34	209,03	127,43	68,12
Ba	212,24	209,43	376,69	133,28	186,33	91,66	388,60	403,52	402,57	243,47	264,76	224,69	595,69	629,35	534,95	216,04
Sr	39,20	45,15	54,74	37,69	37,76	27,70	50,24	50,21	45,97	41,20	51,63	48,50	76,21	75,32	80,84	45,24
Y	9,39	9,80	10,39	2,74	17,64	12,03	8,69	4,36	3,66	5,74	12,46	7,58	9,67	11,62	20,60	15,69
Zr	199,97	225,26	354,94	94,19	162,48	65,09	163,64	218,01	211,27	46,61	271,12	236,72	119,58	123,18	131,52	63,41
Hf	4,86	5,57	8,85	2,37	4,04	1,67	4,25	5,48	5,26	1,14	6,68	5,83	2,97	3,02	3,41	1,67
Nb	4,92	6,22	4,56	1,30	1,91	1,12	9,96	3,15	3,12	1,07	9,24	4,34	4,10	4,56	5,01	1,23
La	15,24	16,85	11,06	8,21	8,55	12,74	36,01	3,33	2,90	8,58	26,84	5,61	37,94	21,33	31,43	12,20
Ce	32,09	36,27	20,83	15,87	16,00	22,41	64,20	6,85	5,84	16,58	57,22	11,82	63,02	39,53	64,27	21,38
Pr	3,58	3,87	2,56	1,98	1,95	2,45	6,52	0,73	0,62	1,83	6,11	1,30	6,13	4,39	7,16	2,52
Nd	13,27	14,81	9,11	6,64	6,35	8,00	23,38	2,84	2,41	5,72	23,29	4,51	21,66	15,62	25,54	8,64
Sm	2,78	3,24	1,96	1,34	1,40	1,41	3,75	0,68	0,58	1,23	4,15	1,14	3,56	2,81	5,33	1,79
Eu	0,52	0,54	0,44	0,23	0,38	0,25	0,65	0,22	0,15	0,23	0,81	0,27	0,54	0,60	0,96	0,45
Gd	2,30	2,41	1,72	1,05	1,91	1,57	2,68	0,60	0,46	1,15	3,12	1,24	2,51	2,36	4,47	2,16
Tb	0,29	0,31	0,26	0,12	0,38	0,26	0,30	0,11	0,08	0,14	0,37	0,18	0,30	0,31	0,64	0,38
Dy	1,72	1,77	1,78	0,54	2,67	1,77	1,53	0,66	0,52	0,82	2,10	1,08	1,62	1,90	3,49	2,50
Ho	0,33	0,36	0,38	0,10	0,58	0,39	0,32	0,15	0,13	0,19	0,42	0,22	0,32	0,39	0,69	0,51
Er	0,91	1,01	1,05	0,28	1,51	1,04	0,87	0,49	0,41	0,54	1,27	0,63	0,93	1,07	1,67	1,38
Tm	0,14	0,15	0,16	0,04	0,21	0,14	0,12	0,08	0,06	0,07	0,21	0,10	0,15	0,17	0,22	0,19
Yb	0,89	1,00	1,06	0,25	1,24	0,86	0,81	0,56	0,47	0,45	1,32	0,64	1,01	1,16	1,23	0,97
Lu	0,15	0,16	0,18	0,05	0,17	0,12	0,13	0,10	0,09	0,07	0,23	0,12	0,18	0,19	0,21	0,15
Th	5,76	6,87	4,34	1,99	2,36	2,00	10,46	3,63	3,41	1,56	9,19	3,78	6,83	6,73	7,93	1,84
U	1,52	1,78	0,84	0,60	0,64	0,25	1,73	1,03	0,62	0,15	2,21	1,15	1,34	1,61	2,12	0,63
Ni	16,00	13,00	20,00	11,00	13,00	7,90	67,00	16,00	13,00	13,00	26,00	13,00	39,00	22,00	13,00	15,00
Co	3,60	3,60	5,40	5,40	3,90	1,90	27,00	2,30	2,50	3,10	6,60	3,80	2,30	2,40	6,70	2,40
Sc	6,10	6,40	2,00	1,90	2,50	1,90	7,70	1,90	1,90	2,90	6,10	6,40	2,00	3,90	4,20	1,90
(La/Yb) _n	11,5	11,4	7,0	22,1	4,6	10,0	30,0	4,0	4,2	12,8	13,7	5,9	25,3	12,3	17,2	8,5
Eu/Eu*	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,5	0,6	1,0	0,9	0,6	0,7	0,7	0,6	0,7	0,6	0,7
ΣREE	74,2	82,8	52,5	36,7	43,3	53,4	141,3	17,4	14,7	37,6	127,5	28,9	139,9	91,8	147,3	55,2

Окончание табл. 3

End of Table 3

Элемент, отношение	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	СПКП
	Тагульская свита (Tagul suite)															
	Олигомиктовые (полевошпат-кварцевые) песчаники								Аркозовые алевропесчаники							
	Т.н.8								Т.н.9							
	1286	1286/1	1286/2	1286/3	1286/4	1286/5	z1326	z1327	z1328	z1329	z1330	z1331	z1333	z1334	z1335	
Rb, г/т	34,26	33,79	34,4	10,77	15,04	10,96	117,37	109,72	116,98	134,4	123,12	127,84	125,14	113,45	116,68	30
Ba	131,6	122,14	135	46,14	56,03	55,8	734,22	829,07	709,14	998,7	675,01	921	757,29	809,24	777,61	190
Sr	22,81	22,39	23,48	13,61	9,42	15,99	56,05	49	42,96	54,04	58,43	54,07	53,92	45	50,08	27
Y	3,16	3,27	3,15	3,55	3,14	3,61	18,71	14,88	26,97	12,75	13	21,85	21,49	14,65	24,59	10,3
Zr	56,6	42,76	49,91	27,55	69,78	28,86	191,25	231,08	329,1	148,91	152,15	477,95	299,96	366,83	366,1	89
Hf	1,47	1,16	1,37	0,76	1,72	0,79	4,89	5,75	7,97	3,87	4,06	11,72	7,35	8,91	9,2	2,5
Nb	3,33	2,64	2,93	0,47	0,77	0,44	5,88	5,52	7,41	5,49	6,26	7,46	7,46	4,37	7,6	3,7
La	9,35	11,18	9,19	4,04	4,05	3,55	12,32	15,66	18,9	19,83	16,83	38,94	30,07	26,63	27,3	10,1
Ce	28,99	33,82	28,51	8,49	7,88	8,23	24,68	31,81	38,32	38,91	32,42	74,79	62,38	59,39	52,35	21,6
Pr	2,31	2,77	2,28	0,92	0,91	0,86	2,74	3,84	4,57	4,14	3,63	8,37	7,21	6,95	6	—
Nd	7,47	9,23	7,33	2,82	2,83	2,43	10,26	14,25	17,03	13,4	13,09	29,17	25,83	25,91	21	9

Sm	1,34	1,4	1,26	0,58	0,57	0,45	2,82	3,2	4,71	2,44	3,43	5,98	5,1	5,39	4,57	1,75
Eu	0,24	0,26	0,24	0,1	0,11	0,09	0,76	0,8	0,97	0,45	0,74	1,11	1,06	1,02	0,87	0,36
Gd	0,98	1,08	0,96	0,51	0,52	0,44	3,07	2,68	4,61	2,5	2,95	5,08	4,83	4,4	4,13	1,52
Tb	0,14	0,15	0,14	0,08	0,08	0,08	0,49	0,38	0,76	0,36	0,4	0,6	0,6	0,51	0,59	0,23
Dy	0,72	0,76	0,76	0,55	0,5	0,52	2,84	2,24	4,44	2,13	2,33	3,39	3,45	2,64	3,75	–
Ho	0,13	0,14	0,13	0,12	0,11	0,12	0,58	0,46	0,88	0,42	0,44	0,69	0,69	0,49	0,77	–
Er	0,35	0,33	0,34	0,35	0,34	0,33	1,58	1,29	2,24	1,09	1,16	1,88	1,8	1,29	2,03	–
Tm	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,25	0,2	0,32	0,17	0,17	0,3	0,26	0,2	0,3	–
Yb	0,33	0,31	0,34	0,31	0,35	0,31	1,41	1,26	1,95	1,07	1,11	1,91	1,53	1,34	1,93	0,84
Lu	0,06	0,05	0,07	0,05	0,06	0,05	0,22	0,19	0,29	0,15	0,16	0,3	0,24	0,21	0,28	0,13
Th	1,61	1,46	1,6	0,89	1,02	1,42	4,18	6,87	6,75	5,32	5,57	11,74	9,69	8,84	10,88	4,2
U	0,34	0,32	0,33	0,25	0,33	0,29	1,45	3,62	4,25	1,81	3,35	2,35	3,48	2,37	2,61	1,2
Ni	9,7	7,5	6,2	15	16	6	11	11	9	11	8,6	24	14	9,7	25	11
Co	3,3	5,3	8,3	14	12	29	3	2,3	2,3	2,5	2,6	5,2	4,6	2,8	4,6	2,8
Sc	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	1,99	2,5	3,6	4,7	3,5	4,8	4,6	4,8	2,5	5,9	2,4
(La/Yb) _n	19	24,4	18	8,7	7,9	7,7	5,9	8,4	6,5	12,5	10,2	13,8	13,2	13,4	9,6	7,3
Eu/Eu*	0,6	0,7	0,7	0,6	0,6	0,6	0,8	0,8	0,6	0,6	0,7	0,6	0,7	0,6	0,6	0,68
ΣREE	52,5	61,5	51,6	19	18,4	17,5	64	78,3	100	87,1	78,9	172,5	145,1	136,4	125,9	–

Примечание. Нормирование по хондриту [Boynnton, 1984]; $Eu/Eu^* = (Eu_n)/((Sm)_n \times (Gd)_n)^{1/2}$; $\Sigma REE = \Sigma (La-Lu)$; * – средний состав СПКП – химический состав среднего протерозойского кратонного песчаника [Condie, 1993]; прочерк – нет данных.

Note. Rationing accordting to chondrits [Boynnton, 1984]; $Eu/Eu^* = (Eu_n)/((Sm)_n \times (Gd)_n)^{1/2}$; $\Sigma REE = \Sigma (La-Lu)$; * – the average composition of SPKP is the chemical composition of the middle Proterozoic cratonic sandstone [Condie, 1993]; dash – no data.

Для всех пород характерны фракционированные спектры распределения РЗЭ, нормированные по хондриту [Boynnton, 1984]: $(La/Yb)_n = 4,0-30,0$. Среднее значение $(La/Yb)_n = 12,5$ немного превышает $(La/Yb)_n = 7,3$ в СПКП. Спектры распределения РЗЭ песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит перекрываются и схожи со спектром РЗЭ для СПКП (см. рис. 7, а). Для всех пород характерно наличие отрицательной европиевой аномалии ($Eu/Eu^* = 0,5-0,8$). Исключение составили два образца песчаника шангулежской свиты (обр. 1133 и 1134), значение Eu/Eu^* для них составляет 0,9 и 1,3 соответственно (табл. 3, рис. 7, а).

Проанализированные образцы песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит карагасской серии обнаруживают существенно повышенные относительно СПКП содержания Ba, Sr и Zr. Концентрации Hf и Th близки к указанному эталону. Уровни концентраций Rb, U, Nb, Ta и Y понижены в сравнении с СПКП (табл. 3, рис. 7, б).

Обсуждение результатов

Петрографические особенности песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит карагасской серии обнаруживают характерные признаки эпигенетической проработки, а именно повсеместно в породах отмечается регенерация кварца и полевых шпатов, гидрослюдизация цементирующего вещества, серицитизация плагиоклазов и пелитизация калиевых полевых шпатов (см. табл. 1), являющиеся характерными минеральными индикаторами позднего, глубинного катагенеза [Япаскерт, 1994]. Петрохимические характеристики подтверждают наличие

процессов эпигенетической проработки, а именно повышенные значения железного модуля ЖМ относительно титанового ТМ и фемического ФМ модулей, рассчитанных для песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит, указывают на присутствие аутигенных минералов в этих породах [Юдович, Кетрис, 2000]. Кроме того, большинство изученных образцов обнаруживают резко повышенные содержания K_2O относительно весьма низких значений Na_2O (см. табл. 2, рис. 8).

В совокупности эти характеристики дают основание допускать, что отложения шангулежской и тагульской свит карагасской серии были подвержены процессам эпигенетических преобразований, в ходе которых произошло перераспределение оксидов калия и натрия, причем эти процессы протекали неравномерно. В частности, породы, относимые к одной и той же группе по петрографическим характеристикам (например, олигомиктовые песчаники или аркозовые алевропесчаники), на одних участках опробования обнаруживали отличные от пород, отобранных на других участках, содержания K_2O и Na_2O и, соответственно, отношения этих элементов (табл. 2, рис. 8). Таким образом, есть основание полагать, что концентрации мобильных петрогенных и редких элементов в изученных породах не являются первичными. Такие особенности изученных терригенных образований, накладывают определенные ограничения на применение в данном исследовании большинства дискриминационных диаграмм, позволяющих реконструировать состав пород источника сноса, интенсивность химического преобразования пород в области источника, геодинамические обстановки образования песчаных пород и т.д. [Bhatia, 1983; Тейлор, МакЛенан, 1988 и др.].

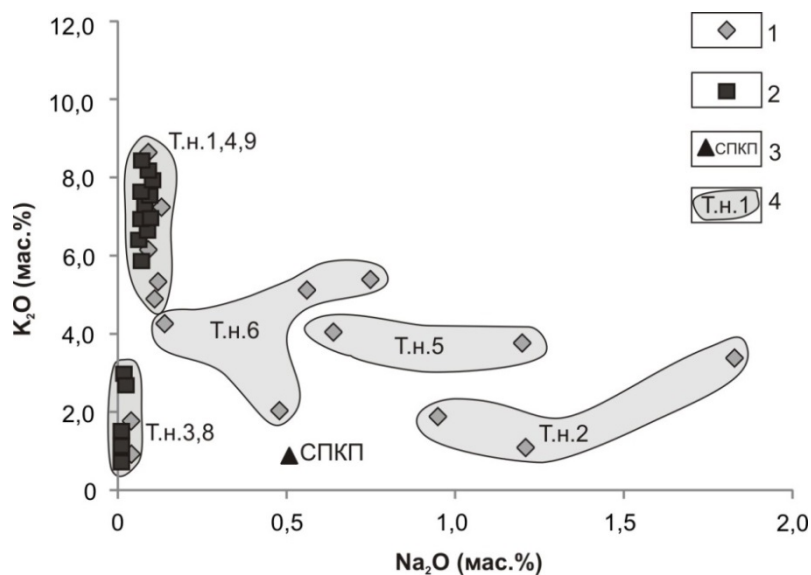


Рис. 8. Диаграмма K_2O – Na_2O для аркозовых песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит

1 – песчаники и алевропесчаники шангулежской свиты; 2 – песчаники и алевропесчаники тагульской свиты; 3 – точка состава среднего протерозойского песчаника К. Конди [Condie, 1993]; 4 – номера мест отбора проб (см. табл. 1)

Fig. 8. K_2O – Na_2O diagram for arkose sandstones and siltstones of the Shangulezh and Tagul suites

1 – sandstones and siltstones of the Shangulezh suite; 2 – sandstones and siltstones of the Tagul suite; 3 – compositional point of the middle Proterozoic sandstone K. Condy [Condie, 1993]; 4 – numbers of sampling (see Table 1).

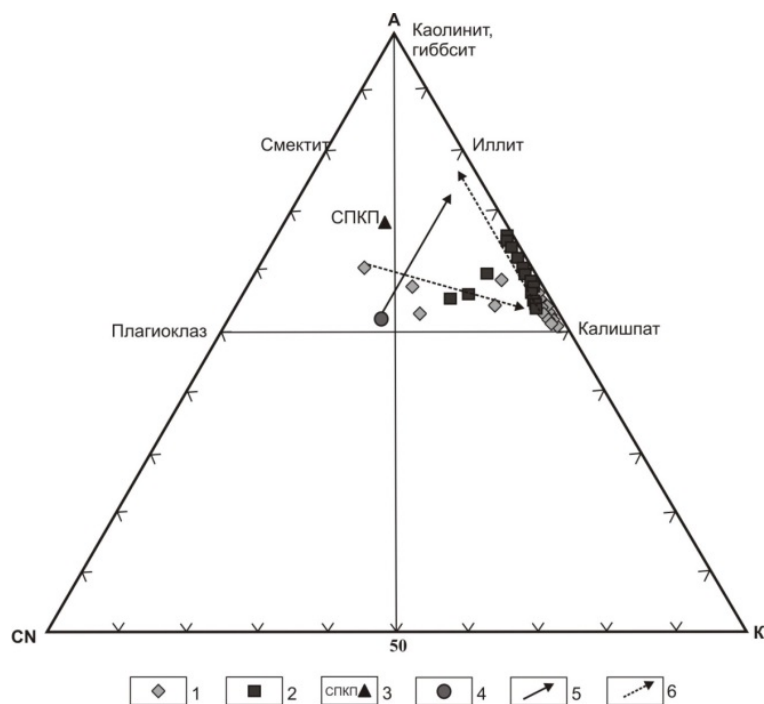


Рис. 9. Треугольная диаграмма A–CN–K (Al_2O_3 –(CaO^*+Na_2O)– K_2O) [Nesbitt, Young, 1989] для терригенных пород шангулежской и тагульской свит карагасской серии

1 – аркозовые песчаники и алевропесчаники шангулежской свиты; 2 – аркозовые песчаники и алевропесчаники тагульской свиты; 3 – фигуративная точка среднего протерозойского песчаника К. Конди [Condie, 1993]; 4–5 – точка состава и тренд выветривания для гранитов [Nesbitt, Young, 1989]; 6 – тренды выветривания для исследуемых пород

Fig. 9. Triangular diagram A–CN–K (Al_2O_3 –($CaO^* + Na_2O$)– K_2O) [Nesbitt, Young, 1989] for terrigenous rocks of the Shangulezh and Tagul suites of the Karagas group

1 – arkoses sandstones and siltstones of the Shangulezh suite; 2 – arkoses sandstones and siltstones of the Tagul suite; 3 – a figurative point of the middle Proterozoic sandstone K. Condy [Condie, 1993]; 4–5 – composition point and weathering trend for granites [Nesbitt, Young, 1989]; 6 – weathering trends for the studied rocks

Характеристика процессов выветривания. Для определения степени химического выветривания пород в области источника сноса обычно используют индекс CIA [Nesbitt, Young, 1982], который рассчитывается с помощью формулы (молекулярные массы): $CIA = [Al_2O_3 / (Al_2O_3 + CaO^* + Na_2O + K_2O)]$, где CaO^* учитывается как доля CaO без учета кальция, входящего в состав карбоната. Графическое изображение степени химического преобразования терригенных пород приводится с использованием диаграммы $A - CN - K(Al_2O_3 - (CaO^* + Na_2O) - K_2O)$ [Nesbitt, Young, 1989], которая иллюстрирует направленность химического преобразования пород в области источника, а также позволяет оценить применимость индекса CIA для оценки степени химического выветривания [McLennan et al., 1993].

На диаграмме $A - CN - K$ (см. рис. 9) фигуративные точки терригенных пород шангулежской и тагульской свит карагасской серии располагаются ниже точки состава СПКП [Condie, 1993], отклоняются от линии тренда выветривания гранита [Интерпретация..., 2001], смещаются в сторону полюса «К» (точка состава калиевого полевого шпата) и образуют два тренда. Первый тренд прослеживается от линии выветривания гранита к точке состава калиевого полевого шпата. Этот тренд образуют фигуративные точки, для которых характерны наименьшие среди проанализированных образцов значения K_2O/Na_2O (см. табл. 2). Направление этого тренда свидетельствует об увеличении концентраций K_2O в процессе эпигенетических преобразований [Япаскурт, 1994; Fedo et al., 1995; McLennan, 2001; Varga and Szakmany, 2004; Varga et al., 2007; Юдович, Кетрис, 2008]. Данный вывод подтверждается петрографическими и литохимическими данными. Так, наиболее отличительными петрографическими характеристиками образцов, образующих тренд, являются присутствие в этих породах аутигенного калиевого полевого шпата, а также обрастание обломков кварца и калиевого полевого шпата глинисто-гидро-людитым агрегатом (см. табл. 1). Литохимической особенностью этих образцов, являются повышенные содержания K_2O и весьма низкие значения Na_2O по сравнению с СПКП [Condie, 1993] и, соответственно, значения K_2O/Na_2O , варьирующиеся от 1 до 9 (табл. 1, рис. 8).

Второй тренд на диаграмме $A-CN-K$ (рис. 9) образуют фигуративные точки образцов, имеющих чрезвычайно высокие значения K_2O/Na_2O , которые варьируются в широком диапазоне от 30 до 293 (табл. 2, рис. 8). Этот тренд располагается параллельно стороне треугольника $A-K$ и прослеживается от точки состава калиевого шпата к точке состава иллита (рис. 9). Подобное положение этих фигуративных точек указывает на процесс разложения полевых шпатов, приводящий к формированию иллита в эпигенетически преобразованных породах [Япас-

курт, 1994; Fedo et al., 1995; Юдович, Кетрис, 2008]. Петрографические и литохимические особенности образцов, образующих данный тренд, подтверждают этот вывод. То есть для них характерна пелитизация обломочных зерен калиевых полевых шпатов и замещение глинистого цемента глинисто-гидро-людитым агрегатом (табл. 1).

Источники сноса. При реконструкции состава пород в области источника в первую очередь особое внимание уделяется изучению обломочных компонентов, содержащихся в терригенных отложениях. Песчаники и алевропесчаники шангулежской и тагульской свит обнаруживают кварц-полево-шпатовый состав, обилие обломков гранитоидов, кварцитов и кислых эффузивов. Набор аксессуарных минералов в проанализированных терригенных отложениях (циркон, турмалин, апатит, рутил) типичен для пород кислого состава. Совокупность этих петрографических характеристик свидетельствует о преобладании кислых магматических пород (преимущественно гранитоидов) в области источников сноса.

Не менее информативными для определения состава пород в области источника являются редкие и рассеянные элементы, которые за счет своей устойчивости к растворению в воде практически в первозданных концентрациях перемещаются в бассейн седиментации [Интерпретация..., 2001; Маслов, 2005]. Все исследуемые образцы песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит карагасской серии обнаруживают крутой наклон спектров $P3Э$, нормированных по хондриту [Boynnton, 1984], и обогащение легкими лантаноидами относительно тяжелых $(La/Yb)_n = 4,0-30,0$. Для большинства исследованных образцов фиксируется отрицательная европиевая аномалия ($Eu/Eu^* = 0,5-0,8$), что свидетельствует о преобладании кислых магматических в области источника сноса исследуемых терригенных отложений (см. рис. 7 а, табл. 3) [Тейлор, МакЛеннан, 1988]. Анализ распределения таких индикаторных элементов, как La , Sc , Th и Zr , а также высокие значения отношений этих элементов (Th/Sc , Zr/Sc , Th/Co , La/Sc) (табл. 3, рис. 10 а, б), подтверждают вывод о преобладании кислых магматических пород в области эрозии [McLennan et al., 1993; Cullers, 2002].

Преобладание неокатанных и полуокатанных обломков во всех исследованных образцах песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит, а также плохая или средняя степень сортировки обломочного материала свидетельствуют о близости пород источника к бассейну седиментации. Положение большинства фигуративных точек изученных пород на диаграмме $F - Q - L$ (полевые шпаты – кварц – обломки пород) (рис. 11) [Dickinson et al., 1983] позволяет рассматривать породы внутренних частей кратонов и рециклированных орогенов в качестве основных поставщиков обломочного материала в бассейн седиментации.

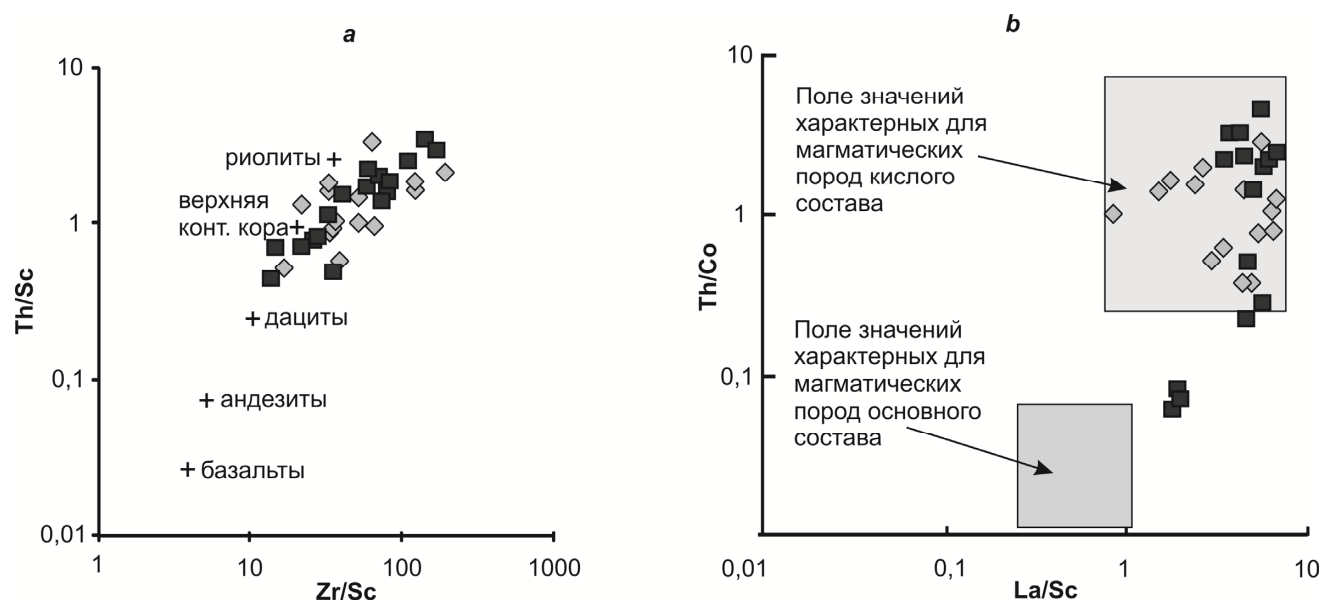


Рис. 10. Положение фигуративных точек составов терригенных пород шангулежской и тагульской свит карагасской серии на диаграммах Th/Sc – Zr/Sc (a) [Cullers, 2002] и La/Sc – Th/Co (b) [Тэйлор, МакЛеннан, 1988]

Условные обозначения см. на рис. 5

Fig. 10. The position of the figurative points of the compositions of terrigenous rocks of the Shangulezh and Tagul suite of the Karagas group on the diagrams Th/Sc – Zr/Sc (a) [Cullers, 2002] and La/Sc – Th/Co (b) [Taylor, McLennan, 1988]

Conventions see Fig. 5

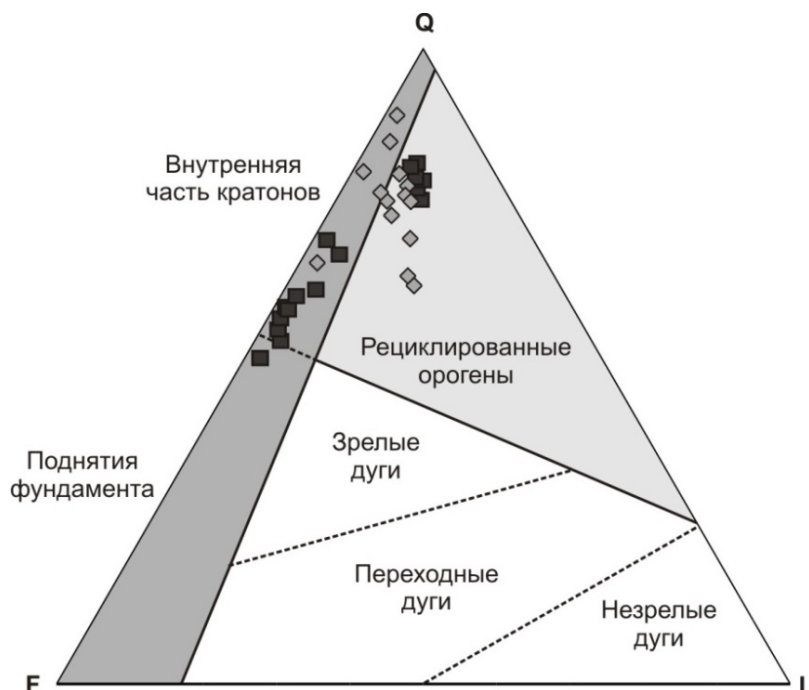


Рис. 11. Треугольная диаграмма F–Q–L (полевые шпаты – кварц – обломки пород) [Dickinson et al., 1983] для терригенных пород шангулежской и тагульской свит карагасской серии

Условные обозначения см. на рис. 5

Fig. 11. Triangular diagram F–Q–L (feldspars – quartz – rock fragments) [Dickinson et al., 1983] for terrigenous rocks of the Shangulezh and Tagul suites of the Karagas group

Conventions see Fig. 5

Таким образом, петрографические и литогеохимические характеристики терригенных пород шангулежской и тагульской свит карагасской серии позволяют предположить, что изученные породы образовались на обширной континентальной окраине Сибирского кратона в основном за счет разрушения докембрийских пород фундамента, при этом одними из основных источников обломочного материала являлись кислые магматические породы. Выявленное в ходе проведенных исследований сходство петрографических и геохимических характеристик пород шангулежской и тагульской свит дает основание предположить, что накопление осадочных толщ, относимых к этим двум свитам, происходило в сходном тектоническом режиме, при поступлении в бассейны седиментации обломочных пород из одной питающей провинции.

Заключение

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Изученные породы шангулежской и тагульской свит карагасской серии являются осадками первого цикла седиментации и обнаруживают петрографические и петрохимические признаки эпиге-

нетических преобразований на стадии позднего, глубинного катагенеза.

2. Обнаруженные сходства петрографических и литогеохимических характеристик изученных песчаников и алевропесчаников шангулежской и тагульской свит свидетельствует о том, что седиментация этих пород происходила в схожем тектоническом режиме, при поступлении обломочного материала из одной питающей провинции.

3. Обилие обломков гранитоидов, кварцитов и кремней в кластогенной составляющей изученных пород в совокупности с характером распределения редких и рассеянных элементов позволило установить, что исследованные терригенные породы шангулежской и тагульской свит были образованы в основном за счет разрушения кислых магматических пород. Учитывая результаты геохронологических исследований детритовых цирконов, полученных [Gladkochub et al., 2019], можно предположить, что одними из основных источников сноса выступали гранитоиды саянского комплекса, широко распространенные в Бирюсинском Присянья.

Исследования выполнены при поддержке РФФИ, проект № 19-05-00266.

ЛИТЕРАТУРА

- Брагин С.С. Некоторые проблемы стратиграфии карагасской серии позднего рифея Присянья // Поздний докембрий и ранний палеозой Сибири. Стратиграфия и палеонтология. Новосибирск : ИГиГ СО РАН СССР, 1986. С. 32–39.
- Галимова Т.Ф., Пашкова А.Г., Поваринцева С.А., Перфильев В.В., Намолова М.М., Андрющенко С.В., Денисенко Е.П., Пермяков С.А., Миронюк Е.П., Тимашков А.Н., Плеханов А.О. Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Ангара-Енисейская. Лист N-47 – Нижнеудинск. Объяснительная записка. СПб. : Картографическая фабрика ВСЕГЕИ, 2012. 652 с. + 14 вкл.
- Дольник Т.А., Воронцова Г.А. Новые данные о возрасте отложений карагасской серии Присянья // ДАН СССР. 1972. Т. 204, № 2. С. 426–429.
- Донская Т.В., Гладkochуб Д.П., Мазукабзов А.М., Вингейт М.Т.Д. Раннепротерозойские постколлизийные гранитоиды Бирюсинского блока Сибирского кратона // Геология и геофизика. 2014. Т. 55, № 7. С. 1028–1043.
- Интерпретация геохимических данных : учеб. пособие / Е.В. Складчиков, Д.П. Гладkochуб, Т.В. Донская, А.В. Иванов, Е.Ф. Летникова, А.Г. Миронов, И.Г. Бараш, В.А. Буланов, А.И. Сизых ; под ред. Е.В. Складчиков. М. : Интернет Инжиниринг, 2001. 288 с.
- Левицкий В.И., Мельников А.И., Резницкий Л.З., Бибикина Е.В., Кирилова Т.И., Козаков И.К., Макаров В.А., Плоткина Ю.В. Посткинематические раннепротерозойские гранитоиды юго-западной части Сибирской платформы // Геология и геофизика. 2002. Т. 43, № 8. С. 717–732.
- Летникова Е.Ф., Прошенкин А.И. Источники сноса для неопротерозойских терригенных отложений Бирюсинского Присянья: петрографические, геохимические и изотопные свидетельства // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещания. Вып. 10 : в 2 т. Иркутск : Институт земной коры СО РАН, 2012. Т. 1. С. 160–161.
- Летникова Е.Ф., Кузнецов А.Б., Вишневская И.А., Вещева С.В., Прошенкин А.И., Джен Х. Вендская пассивная континентальная окраина юга Сибирской платформы: геохимические, изотопные (Sr, Sm-Nd) свидетельства, данные U-Pb датирования LA-ICP-MS детритовых цирконов // Геология и геофизика. 2013. Т. 54, № 10. С. 1507–1529.
- Маслов А.В. Осадочные породы: методы изучения и интерпретация полученных данных : учеб. пособие. Екатеринбург : Изд-во УГГУ, 2005. 289 с.
- Метелкин Д.В., Благовидов В.В., Казанский А.Ю. История формирования карагасской серии Бирюсинского Присянья: синтез палеомагнитных и литолого-фациальных данных // Геология и геофизика. 2010. Т. 51, № 8. С. 1114–1133.
- Ревенко А.Г. Физические и химические методы исследования горных пород и минералов в Аналитическом центре ИЗК СО РАН // Геодинамика и Тектонофизика. 2014. Т. 5 (1). С. 101–114.
- Решения всесоюзного стратиграфического совещания по докембрию, палеозою и четвертичной системе Средней Сибири. Новосибирск, 1983. Ч. 1. 214 с.
- Советов Ю.К., Кречетов Д.В., Соловецкая Л.В. Предвендский седиментационный цикл (сиквенс) Присянья: условия осадконакопления и литостратиграфическая корреляция // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещания. Иркутск : ИЗК СО РАН, 2012. Вып. 10, т. 2. С. 84–86.

- Советов Ю.К., Меновщикова О.Н., Казак А.К., Соловецкая Л.В.** Структурные параметры и происхождение базальных конгломератов карагасской серии криогения Присяяня // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы совещания. Иркутск : ИЗК СО РАН, 2015. Вып. 13. С. 224–226.
- Тэйлор С.Р., Мак-Леннан С.М.** Континентальная кора: ее состав и эволюция : пер. с англ. М. : Мир, 1988. 384 с.
- Туркина О.М., Бибикина Е.В., Ножкин А.Д.** Этапы и геодинамические обстановки раннепротерозойского гранитообразования на юго-западной окраине Сибирского кратона // ДАН. 2003. Т. 388. № 6. С. 779–783.
- Туркина О.М., Ножкин А.Д., Баянова Т.Б.** Источники и условия образования раннепротерозойских гранитоидов юго-западной окраины Сибирского кратона // Петрология. 2006. Т. 14, № 3. С. 284–306.
- Хоментовский В.В., Шенфиль В.Ю., Якшин М.С., Бутаков Е.П.** Опорные разрезы отложений докембрия и нижнего кембрия Сибирской платформы. М. : Наука, 1972. 356 с.
- Шванов В.Н.** Петрография осадочных пород (компонентный состав, систематика и описание минеральных видов). Л. : Недра, 1987. 269 с.
- Шенфиль В.Ю.** Поздний докембрий Сибирской платформы. Новосибирск : Наука, 1991. 185 с.
- Эволюция южной части Сибирского кратона (Интеграционные проекты СО РАН) / [А.М. Мазукабзов и др.] ; науч. ред. Е.В. Скляр. Новосибирск : Изд-во СО РАН, 2006. Вып. 11. 367 с.**
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** Основы литохимии. СПб. : Наука, 2000. 497 с.
- Юдович Я.Э., Кетрис М.П.** Минеральные индикаторы литогенеза. Сыктывкар : Геопринт, 2008. 564 с.
- Япаскурт О.В.** Стадиальный анализ литогенеза. М. : Изд-во МГУ, 1994. 142 с.
- Bhatia M.R.** Plate tectonics and geochemical composition of sandstones // J. Geol. 1983. V. 91, № 6. P. 611–627.
- Boynnton W.V.** Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: Rare earth element geochemistry / ed. by P. Henderson. Amsterdam : Elsevier Sci. Publ. Co., 1984. P. 63–114.
- Condie K.C.** Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales // Chemical geology. 1993. V. 104. P. 1–37.
- Cullers R.L.** Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // Chemical Geology. 2002. V. 191 (4). P. 305–327. DOI: 10.1016/S0009-2541(02)00133-X
- Dickinson W.R., Beard L.S., Brackenridge G.R., Erjavec J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindberg F.A., Ryberg P.T.** Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting // Geological Society of America Bulletin. 1983. V. 94. P. 222–235.
- Fedo C.M., Young G.M., Nesbitt H.W.** Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for weathering conditions and provenance // Geology. 1995. V. 23 (10). P. 291–294.
- Gladkochub D.P., Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Ponomarchuk V.A., Stanevich A.M.** Mafic intrusions in southwestern Siberia and implications for a Neoproterozoic connection with Laurentia // Precambrian Research. 2006. № 147. P. 260–278.
- Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H.** U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean // Gondwana Research. 2019. № 65. P. 1–16.
- McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N.** Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // Geological Society of America. Special Paper. 1993. № 248. P. 21–40.
- McLennan S.M.** Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // Geochemistry, Geophysics, Geosystems. 2001. V. 2. Doi: 10.1029/2000GC000109
- Nesbitt H.W., Young G.M.** Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // Nature. 1982. V. 299. P. 715–717.
- Nesbitt H.W., Young G.M.** Formation and diagenesis of weathering profiles // J. Geol. 1989. V. 97. P. 129–147.
- Panteeva S.V., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Markova V.V., Sandimirova G.P.** Determination of 24 trace elements in felsic rocks by inductively coupled plasma mass spectrometry after lithium metaborate fusion // Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy. 2003. V. 58, № 2. P. 341–350.
- Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Demoux A., Xia X., Wang W., Donskaya T., Liu D., Sun M.** Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt // Gondwana Research. 2011. V. 19 (3). P. 751–763. Doi: 10.1016/j.gr.2010.10.00
- Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R.** Sand and Sandstones. New York: Springer, 1972. 158 p.
- Varga A.R., Szakmány Gy.** Geochemistry and provenance of the Upper Carboniferous sandstones from borehole Diosvizlo-3 (Tesen Sandstone formation, SW Hungary) // Acta Mineralogica-Petrographica, Szeged. 2004. V. 45, № 2. P. 7–14.
- Varga A.R., Szakmány Gy., Árgyelán T., Józsa S.** Complex examination of the Upper Paleozoic siliciclastic rocks from southern Transdanubia, SW Hungary – Mineralogical, petrographic, and geochemical study // Geological Society of America. Special Paper. 2007. V. 420. P. 1–20.

Авторы:

Мотова Зинаида Леонидовна, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: motova@crust.irk.ru

Донская Татьяна Владимировна, доктор геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: tanlen@crust.irk.ru

Гладкочуб Дмитрий Петрович, доктор геолого-минералогических наук, член-корр. РАН, директор, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.

E-mail: gladkochub@mail.ru

Мазукабзов Анатолий Муталибович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия.
E-mail: mazuk@crust.irk.ru

Geosphere Research, 2020, 2, 44–63. DOI: 10.17223/25421379/15/4

Z.L. Motova, T.V. Donskaya, D.P. Gladkochub, A.M. Mazukabzov

Institute of the Earth's Crust SB RAS, Irkutsk, Russia

THE COMPOSITION AND CONDITIONS OF THE ORIGIN OF LATE PRECAMBRIAN TERRIGENOUS ROCKS OF THE KARAGASS GROUP (BIRYUSA SAYAN REGION)

We present the results of petrographic and geochemical studies of the Late Precambrian terrigenous rocks of the Shangulezh and Tagul suites of the Karagas group of the Biryusa Sayan Region (South-West of the Siberian Craton). The results of reconstruction of the sources of clastic material and the degree of their chemical conversion are presented. The studied terrigenous deposits of the Shangulezh and Tagul suites of the Karagas group are represented by arkoses sandstones and siltstones, and are characterized by similar characteristics. For the majority of the studied rocks, mineralogical signs of epigenetic transformations at the stage of late catagenesis are recorded, expressed by fouling of potassium feldspar fragments by freshly formed autigenic potassium feldspar, regeneration of quartz clastic grains, and also by fouling of quartz fragments and potassium feldspar clay-micaceous aggregate (illite-hydrite). A characteristic petrochemical feature of most of the studied samples is sharply increased K_2O concentrations relative to very low Na_2O contents. The presence of fragments of granitoids, quartzite's, flints in the clastogenic component of the studied sandstones and siltstones indicates the basement rocks of the Siberian craton as the main feeding province for sedimentary strata of the Shangulezh and Tagul suites of the Karagas group. The set of accessory minerals in the heavy fraction of most of the studied samples, as well as the distribution pattern of rare and trace elements that are not mobile during epigenetic transformations, indicate the predominance of acidic rocks in the region in the source area, and a distinct europium minimum in the REE spectra of the studied terrigenous rocks indicates the prevalence of granitoids in source of demolition. Taking into account the geological structure of the study area, it is assumed that one of the main rocks in the source area for these sediments could be granitoids of the Sayan complex, which are widespread in the Cissayan marginal ledge of the Siberian craton basement. Similar petrographic and petro- and geochemical characteristics of the studied terrigenous rocks indicate that they accumulated in the same tectonic regime, in a single sedimentation basin, when clastic material came from the same feeding province.

Keywords: Late Precambrian, clastic rocks, geochemistry, petrography, epigenesis, Siberian craton.

References

- Bragin S.S. *Nekotorye problemy stratigrafii karagasskoj serii pozdnego rifeja Prisayan'ya* [Some problems of the stratigraphy of the Karagas group of the Late Riphean of the Sayan Region] // *Pozdnyj dokembrij i rannij paleozoj Sibiri. Stratigrafiya i paleontologiya*. 1986. pp. 32–39. In Russian
- Galimova T.F., Pashkova A.G., Povarintseva S.A., Perfil'ev V.V., Namolova M.M., Andryushchenko S.V., Denisenko E.P., Permyakov S.A. *Gosudarstvennaya geologicheskaya karta Rossijskoj Federacii. Masshtab 1 : 1 000 000 (tret'e pokolenie). Seriya Angaro-Enisejskaya. List N-47 – Nizhneudinsk. Ob'yasnitel'naya zapiska* [The State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1: 1000000 (Series 3). Angara-Yenisei Series. Sheet N-47 – Nizhneudinsk]. St. Petersburg : Kartograficheskaya fabrika VSEGEI, 2012. 652 p. In Russian
- Dolnik T.A., Vorontsova G.A. *Novyye dannyye o vozraste otlozhenij karagasskoj serii Prisayan'ya* [New data on the age of sediments of the Karagas group of the Sayan Region] // *DAN SSSR*. 1972. V. 204 (2). pp. 426–429. In Russian
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Wingate M.T.D. Early Proterozoic postcollisional granitoids of the Biryusa block of the Siberian craton // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55 (7). pp. 812–823.
- Skyarov E.V. (Ed.). *Interpretatsiya geokhimicheskix dannyx: Uchebnoe posobie* [Interpretation of Geochemical Data]. Internet Engineering, Moscow, 2001. 288 p. In Russian
- Levitskii V. I., Mel'nikov A. I., Reznitskii L. Z., Bibikova E. V., Kirnozova T. I., Kozakov I. K., Makarov V. A., and Plotkina Yu. V. Early proterozoic postcollisional granitoids in Southwestern Siberian Craton // *Russian Geology and Geophysics*. 2002. V.8. pp. 717–731.
- Letnikova E.F., Proshenkin A.I. *Istochniki snosa dlya neoproterozojskix terrigennyx otlozhenij Biryusinskogo Prisayan'ya: petrograficheskie, geokhimicheskie i izotopnyye svidetel'stva* [The sources for the Neoproterozoic terrigenous sediments of the Biryusa Sayan Region: petrographic, geochemical, and isotopic evidence] // *Geodinamicheskaya e'volutsiya litosfery Central'no-Aziatskogo podvuzhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya. Vy'p. 10. V 2-x tomakh. T. 1*. Irkutsk: Institut Zemnoj kory SO RAN, 2012. pp. 160–161. In Russian
- Letnikova E.F., Kuznetsov A.B., Vishnevskaya I.A., Veshcheva S.V., Proshenkin A.I., Geng H. The Vendian passive continental margin in the Southern Siberian Craton: geochemical and isotopic (Sr, Sm–Nd) evidence and U–Pb dating of detrital zircons by the LA-ICP-MS method // *Russian Geology and Geophysics*. 2013. V.10. pp. 1507–1529.
- Maslov A.V. *Osadochnyye porody: metody izucheniya i interpretatsiya poluchennykh dannyx* [Sedimentary rocks: research methods and interpretation of the data]. Uchebnoe posobie. Ekaterinburg: Izd-vo UGGU, 2005. 289 p. In Russian
- Metelkin D.V., Blagovidov V.V. and Kazansky A.Yu. The history of the Karagas Supergroup evolution in the Birusa Region: synthesis of paleomagnetic and sedimentological data // *Russian Geology and Geophysics*. 2010. V.8. pp. 868–884.
- Revenko A.G. Physical and chemical methods of researching rocks and minerals in the Analytical Centre of the Institute of the Earth's crust, SB RAS. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014. V. 5 (1), pp. 101–114.

Resheniyavsesoyuznogo stratigraficheskogo soveshchaniya po dokembriyu, paleozooyu i chetvertichnoj sisteme Srednej Sibiri [Decision of the All-Union Stratigraphic Conference on Precambrian, Paleozoic and Quaternary System of Central Siberia], Part 1, Novosibirsk, 1983. 214 p. In Russian

Sovetov Yu.K., Krechetov D.V., Soloveckaya L.V. *Predvendskij sedimentacionnyj cikl (sikvens) Prisayan'ya: usloviya osadkonekopeniya i litostratigraficheskaya korrelyatsiya* [Pre-Vendian Sedimentation Cycle (Sequence) of the Cissayan: sedimentation conditions and lithostratigraphic correlation] // *Geodinamicheskaya e'voluciya litosfery* Central'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya. Vy'p. 10. T. 2. Irkutsk, IZK SO RAN, 2012. pp. 84–86. In Russian

Sovetov Yu.K., Menovshchikova O.N., Kazak A.K., Solovetskaya L.V. *Strukturny'e parametry i proisozhdenie bazal'ny'x konglomeratov karagasskoj serii kriogeniya Prisayan'ya* [Structural parameters and the origin of the basal conglomerates of the Karagas cryogenic series of the Sayan region] // *Geodinamicheskaya e'voluciya litosfery* Central'no-Aziatskogo podvizhnogo poyasa (ot okeana k kontinentu): Materialy soveshchaniya. Vy'p. 13. Irkutsk, IZK SO RAN, 2015. pp. 224–226. In Russian

Turkina O.M., Bibikova E.V., Nozhkin A.D. Stages and geodynamic settings of Early Proterozoic granite formation on the Southwestern Margin of the Siberian Craton // *Doklady Earth Sciences*. 2003. V. 389 (2). pp. 159–163.

Turkina O.M., Nozhkin A.D., Bayanova T.B. Sources and formation conditions of Early Proterozoic granitoids from the Southwestern Margin of the Siberian Craton // *Petrology*. 2006. V. 14 (3). pp. 262–283.

Taylor S.R., McLennan S.M. *The Continental Crust: Its Composition and Evolution*. Blackwell, London, 1985. 312 p.

Homentovskij V.V., SHenfil' V.YU., YAkshin M.S., Butakov E.P. *Opornye razrezy otlozhenij dokembriya i nizhnego kembriya Sibirskoj platformy* [Reference sections of Precambrian and Lower Cambrian sediments of the Siberian Platform]. Moscow: Nauka, 1972. 356 p. In Russian

Shenfil' V.YU. *Pozdnij dokembrij Sibirskoj platformy* [Late Precambrian of the Siberian Platform]. Novosibirsk: Nauka, 1991. 185 p. In Russian

Shvanov V.N. *Petrografiya osadochnykh porod (komponentnyj sostav, sistematika i opisanie mineral'nykh vidov)* [Petrography of sedimentary rocks (component composition, systematics and description of mineral species)]. Leningrad: Nedra, 1987. 269 p. In Russian

Sklyarov E.V. (Ed.) *E'voluciya yuzhnoj chasti Sibirskogo kratona (Integracionny'e proekty SO RAN; Vy'p. 11)* [Precambrian Evolution of Southern Part of the Siberian Craton]; Ros.Akad. Nauk, Sib. Otd-nie In-t zemnoj kory'. Novosibirsk: Izd-vo SO RAN, 2006. 367 p. In Russian

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Osnovy litoximii* [Fundamentals of Lithochemistry]. St. Petersburg: Nauka, 2000. 497 p. In Russian

Yudovich Ya.E., Ketris M.P. *Mineral'ny'e indikator'y litogeneza* [Mineral Indicators of Lithogenesis]. Geoprint: Syktyvkar, 2008. 564 p. In Russian

Yapaskurt O.V. *Stadial'nyj analiz litogeneza* [Stage Analysis of Lithogenesis]. Moscow: Izd-vo MGU, 1994. 142 p. In Russian

Bhatia M.R. Plate tectonics and geochemical composition of sandstones // *J.Geol.*. 1983. V. 91. № 6. pp. 611–627.

Boynnton W.V. Cosmochemistry of the rare earth elements; meteorite studies. In: *Rare earth element geochemistry*. Henderson, P. (Editors) // Elsevier Sci. 1984. Publ. Co., Amsterdam. pp. 63–114.

Condie K. C. Chemical composition and evolution of the upper continental crust: Contrasting results from surface samples and shales // *Chemical geology*. 1993. V. 104. pp. 1–37.

Cullers R.L. Implications of elemental concentrations for provenance, redox conditions, and metamorphic studies of shales and limestones near Pueblo, CO, USA // *Chemical Geology*. 2002. V. 191 (4). pp. 305–327. Doi: 10.1016/S0009-2541(02)00133-X

Dickinson W.R., Beard L.S., Brackenridge G.R., Erjavec J.L., Ferguson R.C., Inman K.F., Knepp R.A., Lindberg F.A., and Ryberg P.T. Provenance of North American Phanerozoic sandstones in relation to tectonic setting // *Geological Society of America Bulletin*. 1983. V. 94. pp. 222–235.

Fedo C.M., Young G.M., Nesbitt H.W. Unraveling the effects of potassium metasomatism in sedimentary rocks and paleosols, with implications for weathering conditions and provenance // *Geology*. 1995. V. 23 (10). pp. 291–294.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Stanevich A.M., Pisarevsky S.A., Zhang S., Motova Z.L., Mazukabzov A.M., Li H. U-Pb detrital zircon geochronology and provenance of Neoproterozoic sedimentary rocks in southern Siberia: New insights into breakup of Rodinia and opening of Paleo-Asian Ocean // *Gondwana Research*. 2019. № 65. pp. 1–16.

Gladkochub D.P., Wingate M.T.D., Pisarevsky S.A., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Ponomarchuk V.A., Stanevich A.M. Mafic intrusions in southwestern Siberia and implications for a Neoproterozoic connection with Laurentia // *Precambrian Research*. 2006. № 147. pp. 260–278.

McLennan S.M., Hemming S., McDaniel D.K., Hanson G.N. Geochemical approaches to sedimentation, provenance, and tectonics // *Geological Society of American. Special Paper*. 1993. № 248. pp. 21–40.

McLennan S.M. Relationships between the trace element composition of sedimentary rocks and upper continental crust // *Geochemistry, Geophysics, Geosystems*. 2001. V. 2. Doi:10.1029/2000GC000109

Nesbitt H.W., Young G.M. Early Proterozoic climates and plate motions inferred from major element chemistry of lutites // *Nature*. 1982. V. 299. pp. 715–717.

Nesbitt H.W., Young G.M. Formation and diagenesis of weathering profiles // *J. Geol.* 1989. V. 97. pp. 129–147.

Panteeva S.V., Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Markova V.V., Sandimirova G.P. Determination of 24 trace elements in felsic rocks by inductively coupled plasma mass spectrometry after lithium metaborate fusion // *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*. 2003. V. 58. № 2. pp. 341–350.

Pettijohn F.J., Potter P.E., Siever R. *Sand and Sand-stones*. New York: Springer, 1972. 158 p.

Rojas-Agramonte Y., Kröner A., Demoux A., Xia X., Wang W., Donskaya T., Liu D., Sun M. Detrital and xenocrystic zircon ages from Neoproterozoic to Palaeozoic arc terranes of Mongolia: significance for the origin of crustal fragments in the Central Asian Orogenic Belt // *Gondwana Research*. 2011. V. 19 (3). pp. 751–763. Doi: 10.1016/j.gr.2010.10.00

Varga A.R., Szakmány Gy. Geochemistry and provenance of the Upper Carboniferous sandstones from borehole Diosvizlo-3 (Temes Sandstone formation, SW Hungary) // *Acta Mineralogica-Petrographica, Szeged*. 2004. V. 45. № 2. pp. 7–14.

Varga A.R., Szakmány Gy., Árgyelán T., Józsa S. Complex examination of the Upper Paleozoic siliciclastic rocks from southern Transdanubia, SW Hungary—Mineralogical, petrographic, and geochemical study // *Geological Society of America. Special Paper*. 2007. V. 420. pp. 1–20.

Authors:

Motova Zinaida L., Cand. Sci.(Geol.-Miner), Researcher, Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: motova@crust.irk.ru

Donskaya Tatiana V., Dr.Sci.(Geol.-Miner), Lead Researcher, Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: tanlen@crust.irk.ru

Gladkochub Dmitry P., Dr.Sci.(Geol.-Miner), Corresponding Member of RAS, Professor of RAS, Director, Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: dima@crust.irk.ru

Mazukabzov Anatily M., Dr.Sci.(Geol.-Miner), Chief Researcher, Institute of the Earth's Crust Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia.

E-mail: mazuk@crust.irk.ru