

## ПРЕОБРАЗОВАНИЕ КВАРЦИТОВ КАК СЛЕДСТВИЕ ПОЗДНИХ ТЕКТОНИЧЕСКИХ СОБЫТИЙ В РАЗВИТИИ ЧУЙСКОЙ И ГАРГАНСКОЙ ГЛЫБ

**В.А. Макрыгина, А.М. Федоров**

*Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН,  
644033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия*

Рассмотрена эволюция тектонической обстановки и геохимические особенности пород районов проявления сверхчистого кварца в Прибайкалье. Это Чуйское поднятие Северного Прибайкалья с Тыйским месторождением кварца, месторождение Бурал-Сарьдаг и другие проявления на Гарганской глыбе Восточного Саяна. Выявлены черты сходства в седиментации и тектоническом развитии регионов. Кварциты отлагаются в преддуговых бассейнах в составе кремнисто-карбонатных толщ с незначительными проявлениями толеитового вулканизма и малой примесью терригенного материала. Эти условия обеспечивают их исходную относительную чистоту. Слабометаморфизованные кварцитосодержащие толщи либо отлагаются, либо надвинуты в процессе коллизии на более древнее высокометаморфизованное основание, сложенное тоналит-гранодиоритовой ассоциацией (ТТГА, Гарганская глыба) или метавулканиками активных континентальных окраин (Чуйское поднятие). Мигматизация основания и внедрение в него гранитоидов приводит к его воздыманию, сбросовым смещениям и эрозии перекрывающих толщ. Если надвигообразование сопряжено с регрессивным метаморфизмом основания и прогрессивным — покрова, то возвратное движение способно только произвести перекристаллизацию кварца с его очисткой и перетиранию остальных минералов. Это ведет к формированию линз «суперкварцитов», милонитов, катаклазитов и брекчий в шве автохтон — аллохтон и внутри аллохтона.

*Кварциты, кремнисто-карбонатные толщи, древнее основание, метаморфизм, геохимия, воздымание структуры, перекристаллизация.*

### QUARTZITE TRANSFORMATION AS A CONSEQUENCE OF LATE TECTONIC EVENTS IN THE EVOLUTION OF THE CHUYA AND GARGAN BLOCKS

**V.A. Makrygina and A.M. Fedorov**

We consider the evolution of the tectonic setting and geochemical features of rocks in ultrapure quartz areas of the Baikal region. These are the Chuya uplift of the northern Baikal region, with the Tuuya quartz deposit, as well as the Bural-Sar'dag and other deposits in the Gargan block of East Sayan. Similarities are observed in the sedimentation and tectonic evolution of the regions. The conditions of the deposition of quartzites (forearc basins within siliceous-carbonate rocks with slight tholeiitic volcanism and a small amount of terrigenous material) ensure their relative initial purity. Low-grade quartzite-bearing strata are bedded or thrust by collision over an older high-grade basement consisting of a tonalite-trondhjemite-granodiorite association (Gargan block) or active-continental-margin metavolcanics (Chuya uplift). Migmatization of the basement and the intrusion of granitoids therein cause its uplifting, fault displacements, and erosion of the overlying rocks. If the thrusting is associated with retrograde metamorphism of the basement and progressive metamorphism of the cover, backward motion can cause only quartz recrystallization with its purification and the grinding of the other minerals. This leads to the formation of lenses of "superquartzites," mylonites, cataclasites, and breccias in the autochthon-allochthon suture and within the allochthon.

*Quartzites, siliceous-carbonate rocks, ancient basement, metamorphism, geochemistry, uplifting of the structure, recrystallization*

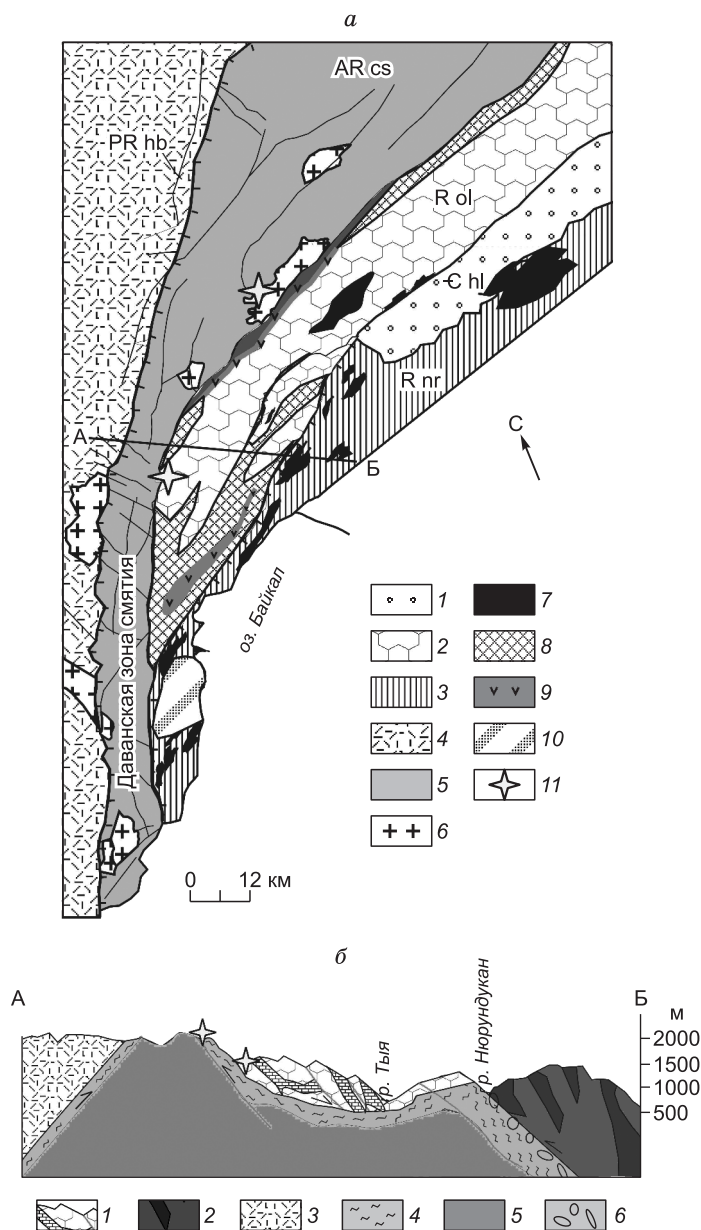
### ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время остро стоит проблема поисков сырья для новой, экологически чистой и возобновляемой энергетики. Одно из главных мест занимает солнечный кремний — сырье для солнечных батарей. Следовательно, нужны большие запасы сверхчистого кварца. В природе существуют два его источника — жильный кварц и метаосадочные кварциты. Но необходимая для промышленности чистота кварца или кварцита в природе встречается редко. Генезис такого кварца до сих пор дискутируется. В Прибайкалье известно несколько месторождений и проявлений сверхчистых кварцитов. Это месторождение Бурал-Сарьдаг и другие проявления кварцитов на Гарганской глыбе Восточного Саяна и Тыйское месторождение в Северном Прибайкалье. Задачей данной работы является сравнение особенностей

строения и тектонической эволюции этих районов с целью выяснения вопроса, сочетание каких факторов и процессов приводит к превращению кварцитов в кондиционное сырье для кремниевого производства.

### ЧУЙСКОЕ ПОДНЯТИЕ

В южном и юго-восточном обрамлении Сибирского кратона к нему примыкают несколько осколков древнего фундамента, расположенных в породах более молодого складчатого обрамления. Это Чуйское, Тондское и Ничатское поднятия на северо-востоке и Гарганская глыба на юго-западе. Из них наиболее полно нами изучено Чуйское поднятие, отделенное от кратона Северо-Байкальским вулканоплутоническим поясом (хибеленская свита) (рис. 1). Оно сложено чуйской толщей довольно монотонных биотит-амфиболовых и амфибол-биотитовых гнейсов с редкими прослоями ортоамфиболитов. Породы претерпели два этапа метаморфизма: гранулитовой фации в архее, 3050 млн лет, K-Ar метод по амфиболу [Петров, Макрыгина, 1975], 2700 млн лет [Донская и др., 2010], остатки которого сохранились только на северо-востоке поднятия, и наложенного протерозойского метаморфизма амфиболитовой фации. Особенностью толщи является практически полное отсутствие метаосадочных пород. По геохимическим данным, породы чуйской серии реконструируются как вулканы активной континентальной окраины [Макрыгина, 1981]. Мигматизация пород распространена очень широко и приводит к образованию гранитогнейсовых куполов, а на севере поднятия развит комплекс чуйско-кодарских гранитов. Обилие в толще гранитного материала приводит к общему воздыманию структуры. Позднее (1870—1910 млн лет, U-Pb термоизохронный метод, Л.В. Сумин) [Макрыгина и др., 1993] вдоль обрамляющих поднятие разломов вблизи Даванской зоны смятия (Кутимский блок) произошла повторная субщелочная гранитизация (табл. 1), вызвавшая плавление в центральных частях гранитогнейсовых куполов с формированием гранофировых гранитов, амазонитовых пегматитов с Sn-P3Э минерализацией (Абчадский купол). Как раз кристаллизация гранофировых гранитов наряду с развитием субщелочной гранитизации и амазонитовых пегматитов свидетельствует об интенсивном поднятии Чуйской глыбы, так как эти образования характерны для малоглубинных условий.



Обилие в толще гранитного материала приводит к общему воздыманию структуры. Позднее (1870—1910 млн лет, U-Pb термоизохронный метод, Л.В. Сумин) [Макрыгина и др., 1993] вдоль обрамляющих поднятие разломов вблизи Даванской зоны смятия (Кутимский блок) произошла повторная субщелочная гранитизация (табл. 1), вызвавшая плавление в центральных частях гранитогнейсовых куполов с формированием гранофировых гранитов, амазонитовых пегматитов с Sn-P3Э минерализацией (Абчадский купол). Как раз кристаллизация гранофировых гранитов наряду с развитием субщелочной гранитизации и амазонитовых пегматитов свидетельствует об интенсивном поднятии Чуйской глыбы, так как эти образования характерны для малоглубинных условий.

**Рис. 1.** Схема геологического строения Северного Прибайкалья (по неопубликованной карте А.И. Сизых с добавлениями В.А. Макрыгиной) (а), разрез А—Б (б).

а — 1 — холоднинская свита, кембрийская моласса; 2 — вулканогенно-осадочные отложения олоkitской серии, неопротерозой; 3 — амфиболиты нюрундуканской свиты, неопротерозой; 4 — вулканы хибеленской свиты, мезопротерозой; 5 — гнейсы и гранитогнейсы чуйской серии, архей; 6 — граниты ирельского и абчадского комплексов; 7 — мафит-ультрамафиты нюрундуканской серии; 8 — катаклазиты Чуйской серии; 9 — хлоритовые сланцы тыйской свиты; 10 — Богучанский гранулитовый блок; 11 — проявления гранулированного кварца на р. Абчада и Тыйское месторождение чистых кварцитов в олоkitской серии; б — 1 — аллохтон олоkitской серии; 2 — надвиг нюрундуканских протофиолитов; 3 — хибеленские вулканы; 4 — катаклазиты чуйских гранитогнейсов; 5 — гранитогнейсы чуйской автохтона; 6 — глыбы тектонического меланжа.

Таблица 1.

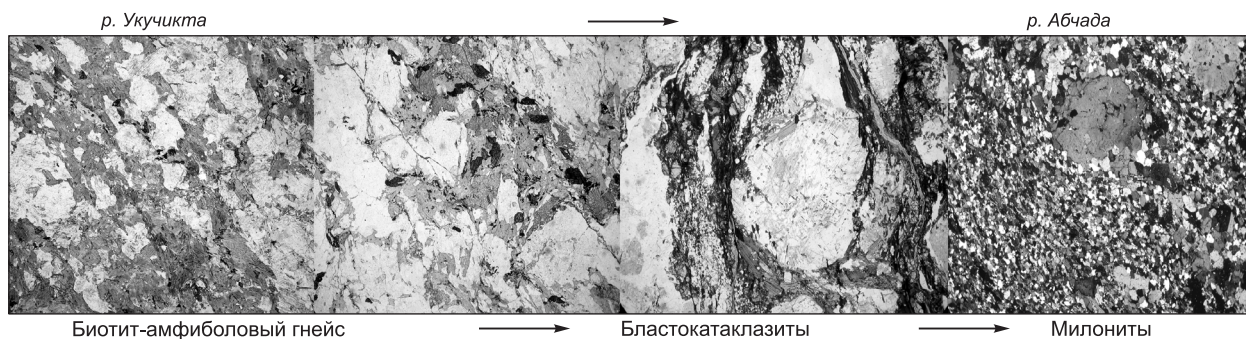
**Состав мигматитов чуйской серии, катаклазитов иловирской свиты  
и обломков из внутриформационных брекчий**

Компонент	АБ143	АБ372	ГРС	ОЛ33	ОЛ34	ОЛ29	ОЛ31
SiO <sub>2</sub> , мас. %	74.7	67.37	73.09	70	70.42	74.34	71.56
TiO <sub>2</sub>	0.07	0.67	0.22	0.43	0.41	0.32	0.39
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.5	14.13	12.66	14.14	13.76	13.43	12.89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.4	2.31	1.54	2.26	3.13	0.43	1.4
FeO	0.72	2.87	1.78	2.19	1.44	1.22	2.12
MnO	0.03	0.08	0.03	0.08	0.11	0.03	0.03
MgO	0.3	0.68	0.2	0.37	0.22	0.52	0.65
CaO	1.3	2.09	0.78	0.68	1.08	0.24	0.13
Na <sub>2</sub> O	4.1	3.56	3.32	2.72	2.87	3.61	2.44
K <sub>2</sub> O	4.26	5.43	5.91	5.86	5.67	5.07	7.09
П.п.п.	0.17	0.1	0.05	0.954	0.63	0.39	0.45
Сумма	99.55	100.48	99.76	99.75	99.81	99.67	99.22
Li, г/т	13	26	3	14	7	8	10
Rb	342	280	368	211	200	110	184
Ba	930	1100	390	1200	1300	1100	710
Sr	25	170	69	66	72	120	57
Pb	63	33	40	43	61	140	57
Sn	35	5	10.2	9.9	9.2	3.9	5.9
Be	4	6.2	3.5	7.8	5.5	3.2	2.3
Zn	7.2	98	76	150	100	70	35
La	5	130	150	150	130	540	150
Ce	25	330	290	210	220	900	200
Nd	8	76	95	105	96	330	98
Sm	Не опр.	22	Не опр.	18	15	71	Не опр.
Eu	»	4.1	»	1.9	2.1	3.5	»
Gd	»	11	»	18	17	41	»
Dy	»	20	»	13	13	45	»
Yb	2	10	8.5	7.8	6.6	13	9.8
Y	15	110	80	51	48	Не опр.	Не опр.
Zr	40	715	380	830	575	1360	355
Nb	8.6	48.3	44	63.5	48.8	32.5	23
B	1.5	8	3.5	10	10	4	4

Примечание. АБ143 — мигматит ранней гранитизации; АБ372, ГРС — мигматиты субщелочной поздней гранитизации; ОЛ33, ОЛ34 — катаклазиты иловирской свиты; ОЛ29, ОЛ31 — обломки брекчий: ОЛ29 — амазонитовый пегматит, ОЛ31 — гранофировый гранит. Силикатные анализы выполнены методом РФА по стандартной методике [Afonin et al., 1992] (аналитик А.Л. Финкельштейн) с применением аттестованных стандартных образцов [Geostandards..., 1994]; Li, Rb — метод фотометрии пламени (аналитик Л.В. Алтухова); редкие элементы с полным спектром РЗЭ — ICP-MS (аналитик Е.В. Смирнова); остальные анализы выполнены атомно-эмиссионным спектральным методом (АЭСА) (аналитики В.А. Русакова, М.В. Пажитных). Все анализы выполнены в ИГХ СО РАН (г. Иркутск).

С юго-востока на чуйскую толщу надвинуты осадочно-вулканогенные породы Олоkitского син-клинория, возраст которых для ондокской свиты, вмещающей Довыренский массив, равен 1000 млн лет по галениту [Тугаринов и др., 1976]. Более поздние U-Pb геохронологические данные [Рыцк и др., 2002] для калиевых риолитов олоkitского комплекса дают цифры  $711 \pm 6$  и  $727 \pm 18$  млн лет. Для маректинских гнейсогранитов, гонджеkitских и окунайских граносиенитов и кварцевых сиенитов типичен узкий возрастной интервал —  $1846 \pm 8$  —  $1843 \pm 5$  млн лет [Рыцк и др., 2006], относящийся явно к Чуйскому автохтону.

Сланцы олоkitской серии зонально метаморфизованы от зеленосланцевой до амфиболитовой фации кианит-силлиманитовой фашиальной серии. На геологических картах их разрез начинается метатерригенной иловирской свитой. Однако детальное изучение разрезов контактов чуйской и иловирской



**Рис. 2.** Фотографии шлифов ( $\times 80$ ) биотит-амфиболовых гнейсов — катаклазитов по разрезу р. Укуçикта — р. Абçада.

толщ показало, что последняя представлена катаклазитами и милонитами по мигматитам чуйской серии (рис. 2) [Макрыгина, 1991]. Те и другие породы имеют одинаковый минералогический и химический состав, вплоть до особенностей распределения редких элементов (см. табл. 1). Субщелочная гранитизация привносит в гнейсы большие количества К, РЗЭ, Nb, Zr, концентрирующихся в аксессуарных минералах, которые сохраняются и в катаклазитах.

Иногда породы превращены в милониты с флюидалной текстурой и гломеропорфировыми скоплениями давленных вкрапленников калишпата, гастингсита и аксессуарных минералов, аналогичных по составу гранитогнейсам чуйской серии. Их ошибочно картировали в качестве вулканитов хибеленской свиты. В иловирской свите олокитской серии встречаются так называемые межформационные конгломераты — перемещенные с автохтона обломки амазонитовых пегматитов и гранофировых гранитов. По облику и редкоэлементному составу они аналогичны породам чуйской серии (см. табл. 1). Более того, весь Олокитский синклиниорий подстилается перетертыми породами чуйского автохтона — это катаклазиты (илови́рская свита) и незатронутые катаклазом породы чуйской серии, выходящие в тектонических окнах — Унгдарском и Маректинском выступах, на м. Онокачанский. На последнем помимо катаклазитов наблюдаются брекчии, состоящие из глыб чуйских мигматитов и гнейсов. Катаклазиты и брекчии прослеживаются на западном замыкании синклинория, где они называются уже харгитуйской свитой. Вместе с надвинутыми с юго-востока нюрундуканскими амфиболитами они образуют крупноглыбовый меланж, который Н.Л. Добрецов с соавторами [1983] считали олистостромой. Но матрикс этого меланжа состоит из тех же катаклазитов и милонитов чуйских мигматитов, в олистостромах же обычно матрикс представлен осадками. Более того, между р. Слюдянка и Богучанской губой, м. Тонкий и до р. Рель нами в 1987 г. был обнаружен блок гранулитов с поперечными к общему северо-восточному направлению пластов нюрундуканских амфиболитов простирающимися двупироксеновых сланцев, эндербитов и чарнокитов (см. рис. 1). Состав основных сланцев блока соответствует щелочным базальтам океанических островов (ОИВ) [Макрыгина и др., 1993]. Основные же породы нюрундуканской серии по геохимическим особенностям соответствуют окраинно-морским базальтам или производным примитивных океанических дуг [Макрыгина, Конева, 1990]. Возраст цирконов из гранулитов по термоизохронному U-Pb методу (Л.В. Сумин) составляет 900 млн лет, а из чарнокитов — 550 млн лет. По-видимому, этот блок был океаническим островом, заблокировавшим зону субдукции. Вследствие этого протоофиолиты были обдуцированы на олокитскую серию и подстилающие ее катаклазиты чуйской толщи.

В процессе воздымания основания Чуйского поднятия происходили сбросовые смещения пород олокитской толщи под углами  $20\text{--}25^\circ$  с милонитизацией пород кровли автохтона и подошвы аллохтона. Таким образом, тектоническая граница основания и перекрывающей толщи, отмеченная катаклазитами и брекчиями, может рассматриваться как детачмент, что сближает структуру с метаморфическими ядрами [Скляров и др., 1997]. Однако форма его осложнена тем, что с юго-востока на структуру надвигается мощная толща нюрундуканских метавулканитов с массивами основных интрузивов (протоофиолитов, по [Клитин, Павлова, 1974]), подпирающими край детачмента крупноглыбовым меланжем. Северо-западная граница Чуйской толщи рисуется на картах как надвиг на вулканиты хибеленской свиты и также сопровождается катаклазитами. Положительные морфоструктуры Чуйского поднятия и Даванской зоны смятия по отношению к гипсометрическому уровню катаклазитов возникли, по-видимому, в процессе продолжающейся декомпрессии и разрушения аллохтонных пластин.

Следствием сбросового движения пород нижних свит олокитской серии (тыйской и авкитской) вдоль кровли автохтона (чуйской серии) является грануляция и очистка кварцевых образований как на



Таблица 2. Состав водных вытяжек из кварца пегматитов и кварцевых жил (мг/экв.), р. Абчада, Чуйское поднятие

Проба	pH	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	F <sup>-</sup>	K	Na	Mg	Ca	Σ <sub>ан.</sub>	Σ <sub>кат.</sub>
АБ65	6.5	0.0060	0.0119	0.0005	0.0026	0.0143	Не обн.	0.0005	0.0176	0.0184
АБ615	6.5	0.0105	0.0094	0.0004	0.0027	0.0207	»	0.0004	0.0239	0.0203
АБ115	6.1	0.0036	0.0080	0.0009	0.0017	0.0069	»	0.0003	0.0090	0.0125
АБ123	6.1	0.0042	0.0086	0.0006	0.0019	0.0063	»	0.0003	0.0087	0.0124

Примечание. АБ65, АБ615 — кварцевые жилы в гранитогнейсах, АБ115, АБ123 — кварцевые ядра в пегматитах. Σ<sub>ан.</sub> и Σ<sub>кат.</sub> — сумма анионов и катионов. Аналитик Л.С. Таусон, ИГХ СО РАН.

поверхности автохтона, так и в прилегающих породах аллохтона. Так, в кварцевых ядрах абчадских пегматитов и кварцевых жилах юга Чуйского поднятия кварц оказался сверхчистым и гранулированным, что отмечено при съемке м-ба 1:50 000 и анализе водных вытяжек из кварца (табл. 2). В то время как на остальной некатаклазированной площади поднятия редкие кварцевые обособления в пегматитах и жилах не гранулированы и содержат значительные количества примесей. Пласты кварцитов в олокитской серии также не гранулированы и представляют переходы от кварцитов и кварцитопесчаников до кварцитосланцев. Но в кварцитах низов авкитской свиты олокитского аллохтона вблизи тектонического шва открыто и разрабатывалось Тыйское месторождение сверхчистого кварца (см. рис. 1). Выделения тепла при механическом возвратном продвижении аллохтона хватает лишь для перекристаллизации и грануляции кварца, полевые шпаты только дробятся и перетираются.

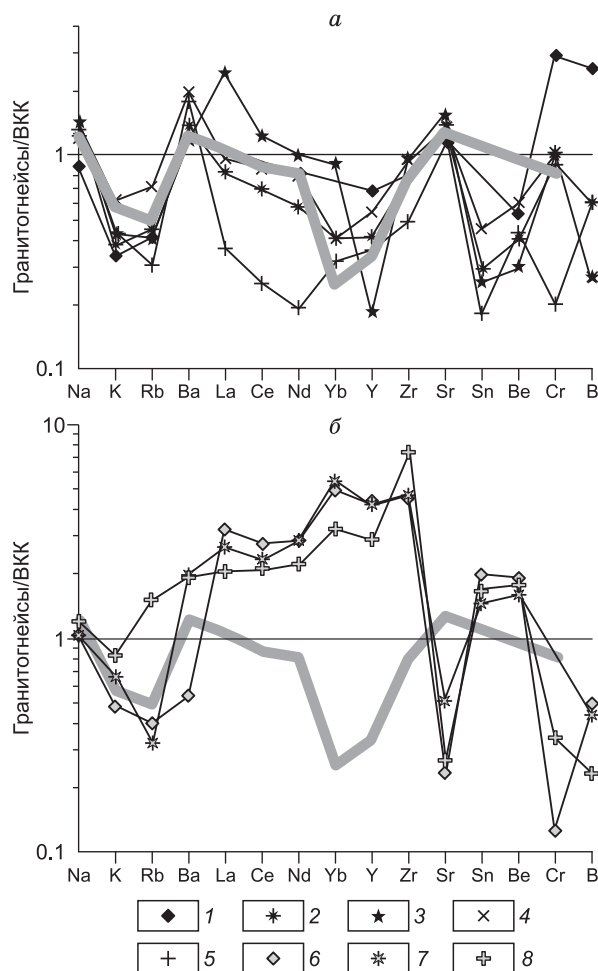
### ГАРГАНСКАЯ ГЛЫБА

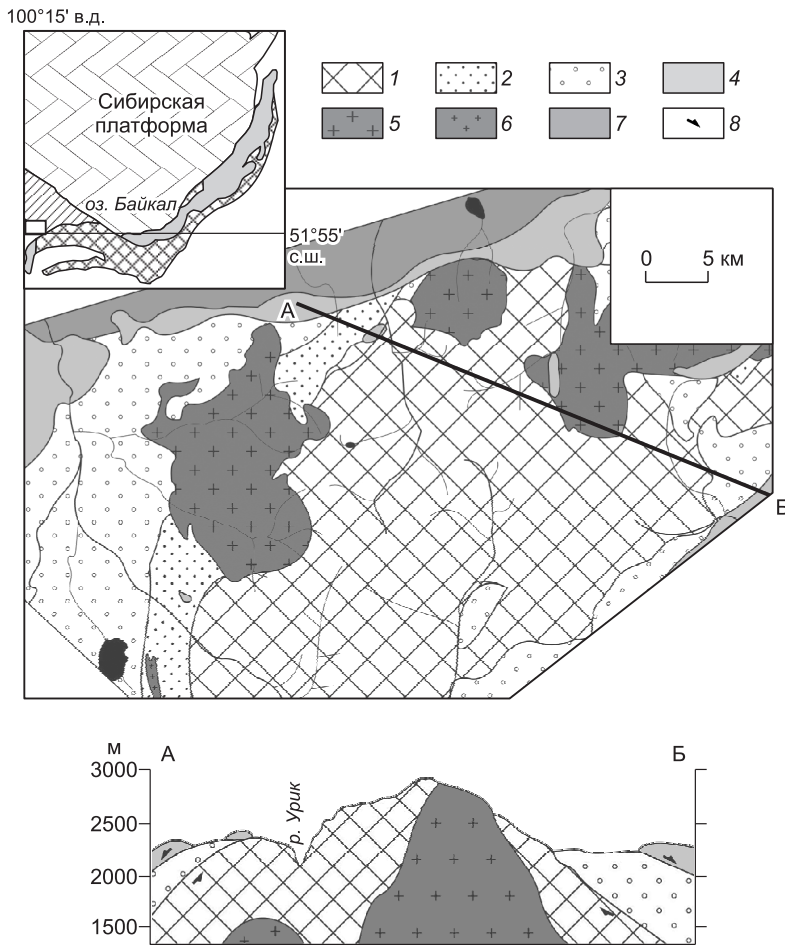
Гарганская глыба, расположенная в Тункинских Гольцах Восточного Саяна, является образованием дискуссионным: то ли это отторженец Присяянского выступа Сибирской платформы, то ли западный край Тувино-Монгольского массива. Последнее время она изучается весьма активно благодаря открытым здесь месторождениям золота [Беличенко и др., 2003; Кузьмичев, 2004; Гребенщикова, 2004; Ковач и др., 2005; Жмодик и др., 2006]. Ее фундамент сложен толщей амфиболит-тоналит-трондьемитового состава, метаморфизованной в амфиболитовой и гранулитовой фациях. Последние определения возраста метаморфизма дали архейские значения (U-Pb метод, 2700 млн лет [Анисимова и др., 2009]). Таким образом, возраст основания Гарганской глыбы, как и Чуйского поднятия, архейский. Но если Гарганская глыба сложена в основном тоналитами и трондьемитами ТТГА, состав которых идентичен среднему значению этих пород в мире (рис. 3, а) и трактуется как примитивная протокора, то состав чуйских мигматитов и гранитогнейсов сильно отличается от них, что может свидетельствовать о рециклированной природе этих пород (см. рис. 3, б).

Гарганская глыба была покрыта отложениями иркутской кварцит-карбонатной и уртагольской тер-

Рис. 3. Средние составы тоналитов (1, 2) и трондьемитов (3—5) Гарганской глыбы, по данным И.В. Левицкого (устное сообщение) (а); средние составы плагиогранитогнейсов (6—8) Чуйского поднятия [Макрыгина, 1981] (б).

Серая линия — среднее значение для ТТГА [Martin, 1994]. Породы нормированы по верхней континентальной коре (ВКК) [Тейлор, Мак-Леннан, 1988].





**Рис. 4. Северная часть Тувино-Монгольского массива (по А.Б. Кузьмичеву [2004] с дополнениями авторов).**

1 — фундамент Гарганской глыбы; 2, 3 — чехол Гарганской глыбы; 2 — осветленные кварциты иркутской свиты, 3 — иркутская и уртагольская свиты; 4 — офиолитовый комплекс нерасчлененный; 5 — гранитоиды сумсунурского комплекса; 6 — гранитоиды мункусардыкского комплекса; 7 — чехол Тувино-Монгольского массива; 8 — направление тектонических движений. На врезке положение изучаемого района.

ригенной свит [Геология..., 1988]. В разрезе иркутской свиты имеется большое количество пластов кварцитов и кварцитосланцев, а также кварц-карбонатных пород. Вдали от границ тектонических пластин кварц в них не гранулирован, и они имеют различную степень загрязнения. Хотя с помощью метода ICP-MS было установлено, что углистые микрокварциты (силициты) отличаются исходно высоким уровнем чистоты [Федоров и др., 2012]. Возраст пород иркутской свиты превышает 1100 млн лет, а около 1020 млн лет образовались офио-

литы Дунжугурской дуги. Позже (около 900—850 млн лет) в результате коллизии произошла обдукция офиолитовых покровов на породы Гарганской глыбы и ее чехла [Кузьмичев, 2004; Кузьмичев, Ларионов, 2013], которая обусловила зеленосланцевый метаморфизм терригенно-карбонатных отложений.

Гранитизация гнейсов и выплавление плагиогранитов и тоналитов в основании глыбы привели к ее изостатическому всплыванию со сбросовыми смещениями и эрозией перекрывающих толщ. Это хорошо видно на геологической схеме А.Б. Кузьмичева [2004] (рис. 4): легче всего разрушались и смещались вниз серпентинитовые пластины, остатки которых обрамляют по краю основание глыбы. В междуречье Самарты и Улзыты на контакте с доломитами мы наблюдали оталькование подошвы



**Рис. 5. Разновидности кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг — от черного до белоснежного метасоматического кварцита.**

Размеры образцов около 10 см.



**Рис. 6. «Суперкварцит» с порфиroidной структурой, ориентированной вдоль направления скольжения перекрывающей пластины.**

Размер образца около 6 см.

серпентинитов, как и в основании серпентинитовой пластины на руч. Бого-Хонголкой (по сообщению В.Г. Беличенко). Но и в кварцитах, и карбонатах иркутской свиты встречаются многочисленные зеркала скольжения, имеющие падение от центра глыбы. В гнейсах и тоналито-гнейсах основания глыбы также описаны многочисленные зоны бластокатаклаза [Ковач и др., 2005]. Таким образом, как и в случае Чуйского поднятия, мы наблюдаем всплывание основания глыбы, сбросовые смещения перекрывающих пород и катаклаз поверхности автохтона и нижних подразделений аллохтона (см. рис. 1, 4, разрезы). Кроме того, и здесь закартированы прерывистые горизонты межформационных конгломератов с карбонатными и кварцевыми, слабоокатанными гальками в хлорит-карбонатной матрице. По [Беличенко, 1975], они относятся к верхам иркутской свиты и тоже могут быть обусловлены движением тектонических пластин. На Гарганской глыбе картина осложняется, во-первых, внедрением сумсунурских гранитов (790 млн лет), «сшивающих» чехол с основанием. Во-вторых, более тяжелые и легче скользящие серпентинитовые пластины, которые в этом процессе еще и отальковываются, двигаются не по поверхности автохтона, а по подразделениям карбонатно-кварцевой иркутской свиты или вместе с ними. Как и на Чуе, воздействию этих движений подвергаются прежде всего кварциты: они перекристаллизуются и очищаются (рис. 5). Наиболее ценные и чистые «суперкварциты» имеют характерные порфирированные структуры с удлинением крупных зерен, отражающим направление движения (рис. 6). Месторождение Бурал-Сарьдаг и все открытые проявления сверхчистого кварца на западном склоне Гарганской глыбы приурочены к повышенным формам рельефа.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Предыдущие исследователи метасоматически измененных кварцитов иркутской свиты считали, что причиной очистки кварцитов является либо воздействие сумсунурских гранитов [Воробьев и др., 2003], либо проработка водно-углекислотными растворами, отделяющимися при сдвигах [Быдтаева, 2004]. Изучение геохимии сверхчистых кварцитов, которое стало возможным лишь с появлением такого чувствительного метода, как ICP-MS, с определением самых малых концентраций редких элементов, показало, что около массивов гранитов приконтактные разности кварцитов, напротив, загрязнены гранитофильными элементами и окончательно очищаются позже, при движении по ним тектонических пластин (рис. 7) [Федоров и др., 2012]. Спайдер-диаграмма, где редкие элементы гарганских кварцитов нормированы по средним содержаниям их же в обычных кварцитах ольхонской серии, убедительно показывает как чистоту исходных силицитов и «суперкварцитов», так и обогащение кварцитов вблизи контактов гранитов Rb, Ba, Sn, РЗЭ и другими гранитофильными элементами. То же самое в отношении главных элементов видно в табл. 3.

В работах [Вернон, 1980; Попов, 2011] показано, что кварцевые скопления (жильный кварц и кварциты) в условиях длительного динамического стресса легче всего подвергаются грануляции и автолизии под воздействием перехода механической энергии трения в тепловую без участия растворов. Эти явления должны быть характерны для пород, испытывающих преобразования при формировании комплексов, подобных изученным.

Мы рассмотрели тектонические соотношения и состав толщ, вмещающих месторождения и проявления сверхчистого кварца в Прибайкалье. Это Гыйское месторождение в Северном Прибайкалье и Бурал-Сарьдаг в Восточном Саяне. В истории их образования прослеживается несколько необходимых и, возможно, достаточных геологических и тектонических предпосылок.

1. Отложение кварцитов в составе кремнисто-карбонатной толщи без существенной примеси терригенного материала с небольшим количеством толеитовых вулканитов. Такие толщи могут отлагаться в преддуговых бассейнах вдалеке от источника терригенного материала [Геология..., 1987]. Они исходно будут достаточно чисты от примесей, что мы наблюдаем в кварцитах Бурал-Сарьдага и других саянских проявлений чистых кварцитов.

2. Эти толщи либо отлагались, либо были надвинуты вместе с офиолитами в про-

**Рис. 7. Спайдер-диаграмма редкоэлементного состава разновидностей кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг.**

1 — «суперкварциты»; 2 — исходные силициты; 3 — осветленные кварциты; 4 — серые приконтактные кварциты; 5 — темно-серые приконтактные кварциты. Нормированы по среднему составу кварцитов Ольхонского региона (данные В.А. Макрыгиной).

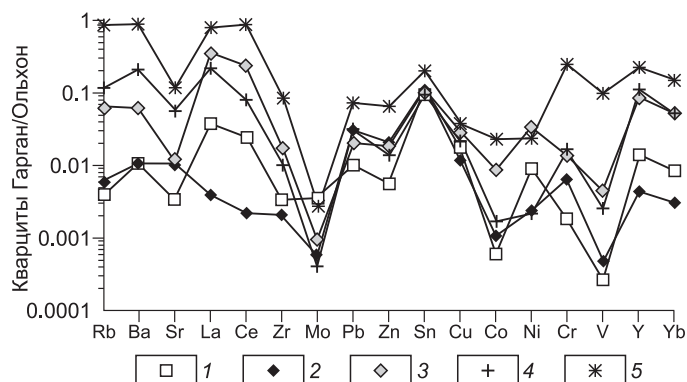


Таблица 3. Состав главных компонентов в разновидностях кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг (г/т)

Компонент	«Суперкварцит»	Кварциты		Силицит		Темно-серый при- контактный кварцит
		светло-серые	черные пластовые	исходный	приконтактный	
	ICP-MS	АЭСА		ICP-MS		
Al	33.00	104	72	41	649	5779
Ti	4.07	15.43	15.00	1.2	20	342
Fe	9.22	92.21	108	24.6	46	596
Mn	0.05	1.10	0.57	1.56	2	2.35
Mg	1.73	56.35	44.26	226	722	239
Ca	2.47	14.84	8.50	455	1374	144
Na	4.95	9.73	12.60	5	11	227
K	6.12	81.37	163	11	243	2033
P	0.69	3.90	4.40	0.60	4	76.33
B	0.17	2.30	1.82	0.16	1	20.72
Сумма	62.00	379	428	765.36	3071	9439
<i>n</i>	8	42	10	4	4	3

Примечание. Анализы выполнены в ИГХ СО РАН методом ICP-MS, аналитики Ю.В. Сокольников, Е.В. Смирнова и атомно-эмиссионным спектральным методом (АЭСА), аналитик И.Е. Васильева. *n* — число проб.

цессе коллизии на более древнее, высокометаморфизованное основание, сложенное, как правило, гранитоидными или ТТГА. При надвигании толщ осуществляется ретроградный метаморфизм основания и низкотемпературный метаморфизм нижних пластов аллохтона (Гарганская глыба).

3. Обогащенное гранитным материалом основание испытывает подъем, изостатическое «всплывание», в результате чего в надвинутых толщах происходят сбросовые смещения по склонам растущего поднятия. Признаки этого явления — развитие катаклазитов, милонитов и брекчий на поверхности автохтона и подошве аллохтона, которые типичны и для структур метаморфических ядер.

4. Процесс механического воздействия при перемещении тектонических пластин приводит к образованию «суперкварцитов» — наилучшего сырья для солнечного кремния, так как выделения тепла при механическом возвратном продвижении аллохтона хватает лишь для перекристаллизации и грануляции кварца, остальные минералы только дробятся и перетираются.

5. Ранее для Гарганской глыбы предполагалось образование сверхчистых кварцитов при воздействии гранитоидов (790 млн лет) [Воробьев и др., 2003] или обдукции офиолитов (900 млн лет) [Федоров и др., 2011]. Но изучение состава примесей в кварцитах показало наличие в них загрязнения гранитофильными элементами из сумсунурских гранитоидов с последующей очисткой осветленных микрокварцитов и «суперкварцитов» в результате коллапса обдукционного режима и смещения вниз по склону перекрывающих основание толщ. Таким образом, формирование «суперкварцитов» должно быть моложе этих двух событий (900 и 790 млн лет) и имеет тектоническую природу.

Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 11-05-00515), интеграционного проекта СО РАН ОНЗ-10.3, интеграционного проекта партнерских фундаментальных исследований СО РАН № 33.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Анисимова И.В., Левицкий И.В., Сальникова Е.Б., Котов А.Б., Левицкий В.И., Резницкий Л.З., Ефремов С.В., Великославинский С.Д., Бараш И.Г., Федосеенко А.М.** Возраст фундамента Гарганской глыбы (Восточный Саян): результаты U-Pb геохронологических исследований // Изотопные системы и время геологических процессов (материалы IV Российской конференции по изотопной геохронологии). Т. 1. СПб., ИГГД РАН, 2009, с. 35—36.

**Беличенко В.Г.** Ара-хонголдойские конгломераты и их аналоги (Тункинские Гольцы Восточного Саяна) // Геология и геофизика, 1975 (5), с. 25—32.

**Беличенко В.Г., Резницкий Л.З., Гелетий Н.К., Бараш И.Г.** Тувино-Монгольский массив (к проблеме микроконтинентов Палеоазиатского океана) // Геология и геофизика, 2003, т. 44 (6), с. 554—565.

**Быдтаева Н.Г., Киселева Р.А., Яшин В.Н.** Геологические особенности формирования нового типа гранулированного кварца Гарганского кварценозного района (Восточный Саян) // Кварц. Кремнезем. Материалы Международного семинара. Сыктывкар, Геопринт, 2004, с. 185—187.



- Вернон Р.Х.** Метаморфические процессы. Реакции и развитие микроструктуры. Пер. с англ. М., Недра, 1980, 227 с.
- Воробьев Е.И., Спиридонов А.М., Непомнящих А.И., Кузьмин М.И.** Сверхчистые кварциты Восточного Саяна (Республика Бурятия, Россия) // ДАН, 2003, т. 390, № 2, с. 219—222.
- Геология** окраинных бассейнов / Под ред. Б.П. Кокелаара, М.Ф. Хауэлса. М., Мир, 1987, 462 с.
- Геология** и метаморфизм Восточного Саяна / В.Г. Беличенко, Ю.П. Бутов, Р.Г. Боос, Н.Л. Добрецов, В.А. Долматов, С.М. Жмодик, Э.Г. Конников, М.И. Кузьмин, В.Н. Медведев, М.Н. Меланина, А.Г. Миронов, Н.А. Немировская, А.М. Огурцов, А.А. Постников, П.А. Рошкетаяев, Е.В. Скляров, А.В. Филимонов, А.А. Шафеев. Новосибирск, Наука, 1988, 192 с.
- Добрецов Н.Л., Картавченко В.Г., Габов Н.Ф.** Метаморфизованная рифейская олистострома в Северном Прибайкалье // Геология и геофизика, 1983 (5), с. 22—32.
- Донская Т.В., Гладкочуб Д.П., Мазукабзов А.М., Пресняков С.Л.** Возраст, петрогенезис и геодинамическая обстановка формирования палеопротерозойских гранитов чуйского и кутимского комплексов (Байкальский краевой выступ фундамента Сибирского кратона) // Геодинамическая эволюция литосферы ЦАСП (от океана к континенту). Материалы совещания. Вып. 8. Иркутск, Изд-во Института географии СО РАН, 2010, с. 95—97.
- Жмодик С.М., Постников А.А., Буслов М.М., Миронов А.Г.** Геодинамика Саяно-Байкало-Муйского аккреционно-коллизийного пояса в неопротерозое—раннем палеозое, закономерности формирования и локализации благороднометалльного оруденения // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (1), с. 183—197.
- Клитин К.А., Павлова Т.Г.** Офиолитовый комплекс Байкальской складчатой области // Докл. АН СССР, 1974, т. 215, № 2, с. 413—418.
- Ковач В.П., Левицкий В.И., Матуков Д.И., Бережная Н.Г., Котов А.Б., Резницкий Л.З., Бараш И.Г., Козаков И.К., Сергеев С.А.** Тоналиты Гарганского блока Тувино-Монгольского массива — возраст, корреляция и аналогии среди древнейших комплексов Присаянья // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Иркутск 10—14 октября 2005 г. Т. 1. Иркутск, Изд-во Института географии СО РАН, 2005, с. 125—128.
- Кузьмичев А.Б.** Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. М., ПРОБЕЛ-2000, 2004, 192 с.
- Кузьмичев А.Б., Ларионов А.Н.** Неопротерозойские островные дуги Восточного Саяна: длительность магматической активности по результатам датирования вулканокластиков по цирконам // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (1), с. 45—57.
- Макрыгина В.А.** Геохимия регионального метаморфизма и ультраметаморфизма умеренных и низких давлений. Новосибирск, Наука, 1981, 199 с.
- Макрыгина В.А.** Геохимия катаклазитов иловирской свиты и их природа // Геохимия, 1991, № 6, с. 878—888.
- Макрыгина В.А., Конева А.А.** Геохимические особенности и происхождение нюрундуканской серии Северного Прибайкалья // Геология и геохронология докембрия Сибирской платформы и ее обрамления. Л., Наука, 1990, с. 104—117.
- Макрыгина В.А., Сандиминова Г.П., Николаев В.М., Пахольченко Ю.А., Литвинцев К.А., Калмычкова Т.Н.** Новые данные о возрасте мигматитов и гранитоидов чуйской серии (Северное Прибайкалье) // Геология и геофизика, 1993, т. 34 (9), с. 31—36.
- Петров Б.В., Макрыгина В.А.** Геохимия метаморфизма и ультраметаморфизма умеренных и низких давлений. Новосибирск, Наука, 1975, 342 с.
- Попов В.А.** О кристаллизации и перекристаллизации в кварцевых телах // Материалы Всероссийского совещания «Современные проблемы изучения и использования минерально-сырьевой базы кварцевого сырья-2011». Миасс, Екатеринбург, УрО РАН, 2011, с. 142—145.
- Рыцк Е.Ю., Шалаев В.С., Ризванова Н.Г., Крымский Р.Ш., Макеев А.Ф., Риле Г.В.** Олокитская зона Байкальской складчатой области: новые изотопно-геохронологические и петрогеохимические данные // Геотектоника, 2002, № 1, с. 29—41.
- Рыцк Е.Ю., Макеев А.Ф., Глебовицкий А.В., Федосеенко А.М.** Гранитоиды фундамента Олокитской зоны (Байкальская складчатая область): новые U-Pb изотопные данные // ДАН, 2006, т. 407, № 6, с. 819—822.
- Скляров Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И.** Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск, Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ СО РАН, 1997, 182 с.
- Тейлор С.Р., Мак-Леннан С.М.** Континентальная кора, ее состав и эволюция. М., Мир, 1988, 379 с.

**Тугаринов А.И., Варламов В.А., Карпенко С.Ф., Ручкин Г.В.** Изотопный состав свинца галени- тов Холоднинского колчеданно-полиметаллического месторождения и вмещающих пород // Геохимия, 1976, № 2, с. 202—210.

**Федоров А.М., Спиридонов А.М., Будяк А.Е., Сокольникова Ю.В., Куликова З.И.** Условия формирования месторождения сверхчистых кварцитов Бурал-Сарьдаг (Восточный Саян) // Изв. Сиб. от- деления Секции наук о Земле РАН, 2011, № 1 (38), с. 94—104.

**Федоров А.М., Макрыгина В.А., Будяк А.Е., Непомнящих А.И.** Новые данные о геохимии и ме- ханизме формирования кварцитов месторождения Бурал-Сарьдаг (Восточный Саян) // ДАН, 2012, т. 442, № 2, с. 244—249.

**Afonin V.P., Finkelstein A.L., Borkhodoev V.J., Gunicheva T.N.** X-ray fluorescence analysis of rocks by fundamental parameter method // X-ray Spectrometry, 1992, v. 21, p. 69—75.

**Bhatia M.R., Crook K.A.W.** Trace element characteristic of graywackes and tectonic setting discrimina- tion of sedimentary basins // Contr. Miner. Petrol., 1986, v. 92, № 2, p. 181—193.

**Geostandards** Newsletters. 1994. V/ XVIII. Spec. Issue. July, 1994.

**Martin H.** Archean grey gneiss and the genesis of continental crust // Archean crustal evolution / Ed. K. C. Condie. Elsevier, Amsterdam, 1994, p. 205—259.

*Рекомендована к печати 23 мая 2013 г.  
Н.Л. Добрецовым*

*Поступила в редакцию  
14 марта 2013 г.*