

ОБЗОР ГЕОЛОГИЧЕСКОГО СТРОЕНИЯ КИТАЙСКОГО АЛТАЯ (*Северо-Западный Китай*) И ЕГО ТЕКТОНИЧЕСКОЙ ЭВОЛЮЦИИ В ПАЛЕОЗОЕ

Кай Кеда, Сун Мин, Ян Чао*, Лонг Хиаопин*, Хиао Венджио.**

Department of Earth Sciences, The University of Hong Kong, Pokfulam Road, Hong Kong, China

** Key Laboratory of Isotope Geochronology and Geochemistry, Guangzhou Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China*

*** State Key Laboratory of Lithospheric Evolution, Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China*

Китайский Алтай — ключевой фрагмент в Центрально-Азиатском складчатом поясе (ЦАСП) преимущественно сложен в различной степени деформированными осадочными и вулканическими породами, и гранитными интрузиями. Тектоническая обстановка его формирования в раннем палеозое различными геологами интерпретировалась как пассивная континентальная окраина, субдукционно-аккреционный комплекс или докембрийский микроконтинент. Соответственно было предложено две конкурирующие модели — «раскрытие—закрытие» и «субдукция—аккреция». Исследования последних лет показывают, что глубокометаморфизованные породы, которые ранее считались фрагментами докембрийского фундамента, имеют U-Pb возраста цирконов (в основном от 466 до 528 млн лет), аналогичные возрастам детритовых цирконов в широко распространенных слабометаморфизованных осадочных породах серии Хабахе. Исследования также показали, что все осадочные породы были преимущественно образованы в раннем палеозое. Кроме того, петрологические данные и геохимические составы пород указывают на то, что они, вероятно, были сформированы в обстановке активной, а не пассивной континентальной окраины, как предполагалось раньше. Детритовые цирконы и цирконы из гранитоидов, включая захваченные (в основном 543—421 млн лет), как правило, дают положительные значения $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$, что указывает на значительный вклад незрелых мантийных источников в состав нижней коры. Модельный расчет, основанный на изотопном составе Hf в цирконах, указывает на то, что до 84 % Китайского Алтая, возможно, сложены «незрелым» палеозойским веществом. Таким образом, имеющиеся данные не подтверждают теорию существования докембрийского фундамента, а, наоборот, указывают на то, что Китайский Алтай представляет собой огромный субдукционно-аккреционный комплекс, образованный в палеозое. Результаты датирования цирконов из гранитоидов U-Pb методом указывают на то, что магматическая деятельность продолжалась с раннего до среднего палеозоя, а наиболее интенсивная магматическая деятельность происходила в девоне, одновременно со значительным изменением Hf изотопных составов цирконов. Данные наблюдения, а также факт существования магматических пород определенных типов и высокотемпературных метаморфических пород в Китайском Алтае можно объяснить взаимодействием спредингового хребта и глубоководного желоба во время аккреционных орогенных процессов.

Субдукционно-аккреционный комплекс, аккреционный орогенез, тектоническая эволюция, субдукция спредингового хребта, Китайский Алтай, Центрально-Азиатский складчатый пояс.

GEOLOGICAL FRAMEWORK AND PALEOZOIC TECTONIC HISTORY OF THE CHINESE ALTAI, NW CHINA: A REVIEW

Keda Cai, Min Sun, Chao Yuan, Xiaoping Long, and Wenjiao Xiao

The Chinese Altai, a key portion of the Central Asian Orogenic Belt (CAOB), is dominated by variably deformed and metamorphosed sedimentary rocks, volcanic rocks, and granitic intrusions. Its Early Paleozoic tectonic setting has been variously considered as a passive continental margin, a subduction-accretion complex, or a Precambrian microcontinent, and two representative competing tectonic models have been proposed, i.e., open-closure versus subduction-accretion. Recent studies demonstrate that the high-grade metamorphic rocks previously considered as fragments of a Precambrian basement have U-Pb zircon ages (predominantly 528 to 466 Ma) similar to those of the widely distributed low-grade metasedimentary rocks named as Habahe Group in the region, and all these metasedimentary rocks were predominantly deposited in the Early Paleozoic. Petrological evidence and geochemical compositions suggest that these metasedimentary rocks were probably deposited on an active, not a passive continental margin as previously proposed. The detrital zircons of sediments and igneous zircons from granitoids including the inherited ones (mainly 543–421 Ma) mostly give positive $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ values, suggesting significant contributions from mantle-derived juvenile materials to the lower crust. A modeling calculation based on zircon Hf isotopic compositions suggests that as much as 84% of the Chinese Altai is possibly made up of “juvenile” Paleozoic materials. Thus, available data do not support the existence of a Precambrian basement but rather indicate that the Chinese Altai is a huge subduction-accretion complex in the Paleozoic. The

U-Pb zircon dating results for granitoids indicate that magmatism was active continuously from Early to Middle Paleozoic, and the strongest magmatic activity took place in the Devonian, coeval with a significant change in zircon Hf isotope compositions. These findings, together with the occurrence of chemically distinctive igneous rocks and the high-temperature metamorphism, can be collectively accounted for by ridge-trench interaction during the accretionary orogenic process.

Chinese Altay, CAOB, subduction-accretion complex, accretionary orogenesis, tectonic evolution, ridge subduction

ВВЕДЕНИЕ

Аккреционные орогены образуются на границах плит между океанами или на конвергентных континентальных границах, где происходит субдукция океанской литосферы [Condie, 2007; Cawood et al., 2009]. Они представляют собой важные области роста молодой континентальной коры [Sengör et al., 1993; Jahn et al., 2000a,b; Jahn, 2004; Xiao et al., 2004; Windley et al., 2007]. Типичный для таких орогенов Центрально-Азиатский складчатый пояс (ЦАСП, иначе называемый Алтаидами, Центрально-Азиатским подвижным поясом или Центрально-Азиатской орогенной системой) является крупнейшим фанерозойским орогенным поясом, расположенным на обширной площади Центральной Азии от Урала на западе до Тихого океана на востоке (рис. 1) [Sengör et al., 1993; Sengör, Natal'in, 1996; Xiao et al., 2003, 2004; Windley et al., 2007; Dobretsov, Buslov, 2007; Xiao et al., 2010; Buslov, 2011]. Образование ЦАСП тесно связано с эволюцией долгоживущего Палеоазиатского океана и характеризуется разнообразием различных тектонических единиц, таких как островные дуги, офиолиты, океанические острова, симаунты, аккреционные призмы, океанские плато и микроконтиненты, которые в итоге были амальгамированы в единый тектонический коллаж орогенного пояса [Sengör et al., 1993; Berzin et al., 1994; Sengör, Natal'in, 1996; Windley et al., 2002, 2007; Buslov et al., 2002; Xiao et al., 2003, 2004, 2008, 2009, 2010; Dobretsov et al., 2003; Kovalenko et al., 2004; Dobretsov, Buslov, 2007; Kröner et al., 2008; Buslov, 2011]. Поэтому крайне важным является определение тектонической природы и истории эволюции каждого блока для того, чтобы понять тектоническую эволюцию всего ЦАСП и его аккреционного орогенеза. Однако, из-за отсутствия точных и достоверных данных о возрасте и систематических геологических корреляций, трудно расшифровать их происхождение, тектоническую обстановку, историю эволюции, что иногда приводит к обманчивым интерпретациям тектонической эволюции ЦАСП и серьезно задерживает наше понимание механизмов аккреционного орогенеза.

Китайский Алтай — общий термин, используемый относительно Китайского сегмента Алтайского орогена, расположенного в центральной части ЦАСП (рис. 2). Данный регион в основном составлен различно деформированными и метаморфизованными осадочными породами, вулканическими породами и гранитными интрузиями [Zou et al., 1988; He et al., 1990, 1994; Qu, Zhang, 1991; Windley et al., 2002; Chen, Jahn, 2002; Xiao et al., 2009]. Однако по тектонической обстановке и истории эволюции Китайского Алтая в палеозое не было достигнуто консенсуса. Он считался различными геологами пассивной континентальной окраиной [He et al., 1990], субдукционно-аккреционным комплексом [Sengör et al., 1993; Sengör, Natal'in, 1996] или докембрийским микроконтинентом (например [Li et al., 2006]). Были предложены две представительные конкурирующие тектонические модели, т.е. «раскрытие—закрытие» и «субдукция—аккреция». Первая предполагает, что в Джунгарской или Джунгарско-Алтайской области существует докембрийский континент, а нижнепалеозойские осадочные породы отлагались в обстановке его пассивной континентальной окраины [Huang et al., 1990; He et al., 1990; Li, Poliyangsi, 2001; Xiao et al., 1992; Li et al., 2006]. В отличие от первой, вторая модель предполагает, что образование Китайского Алтая произошло в результате постоянного субдукционно-аккреционного процесса, а нижнепалеозойские осадочные породы были отложены в обстановке активной окраины со значительным вкладом молодого вещества, связанного с магматической деятельностью [Sengör et al., 1993; Windley et al., 2002; Xiao et al., 2003, 2004; Long et al., 2007, 2010; Sun et al., 2008]. Для восстановления истории эволюции этого ключевого района важно определить его тектоническую природу в палеозое и оценить эти конкретные тектонические модели.

В Китайском Алтае проведено большое количество геохимических, геохронологических и метаморфических исследований и сделан крупный прорыв в U-Pb и Hf изотопных исследованиях осадочных толщ [Long et al., 2007, 2010; Yuan et al., 2007b], глубокометаморфизованных пород [Hu et al., 2002, 2006; Li et al., 2004; Chen et al., 2006; Wei et al., 2007; Zheng et al., 2007a; Sun et al., 2008; Jiang et al., 2010] и гранитных интрузий [Hu et al., 2000; Wang et al., 2006, 2009; Yuan et al., 2007a; Briggs et al., 2007; Sun et al., 2008; Cai et al., 2011a,b]. Однако некоторые статьи, опубликованные на китайском языке, остаются неизвестными для международного геологического сообщества. В данной статье авторы представляют обзор прогресса недавних исследований Китайского Алтая и в значительной степени раскрывают геологическое строение и тектоническую эволюцию данного региона.

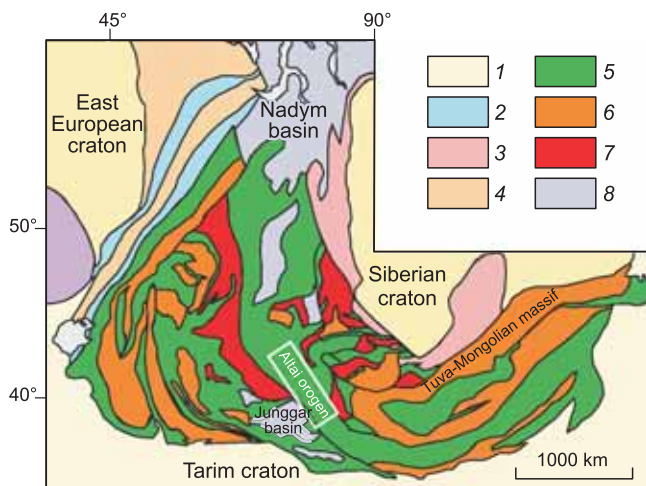


Рис. 1. Схематическая тектоническая карта Центрально-Азиатского складчатого пояса (ЦАСП).

Составлена с использованием работ [Sengör et al., 1993; Sengör, Natal'in, 1996; Xiao et al., 2010]. 1 — кратон, 2 — аккреционные призмы в Уралах, 3 — Байкалиды, 4 — Предуралы, 5 — субдукционно-аккреционный комплекс, 6 — континентальная кора Предалтаидов, 7 — кембрийско-ордовикская дуга, 8 — напряженная континентальная кора.

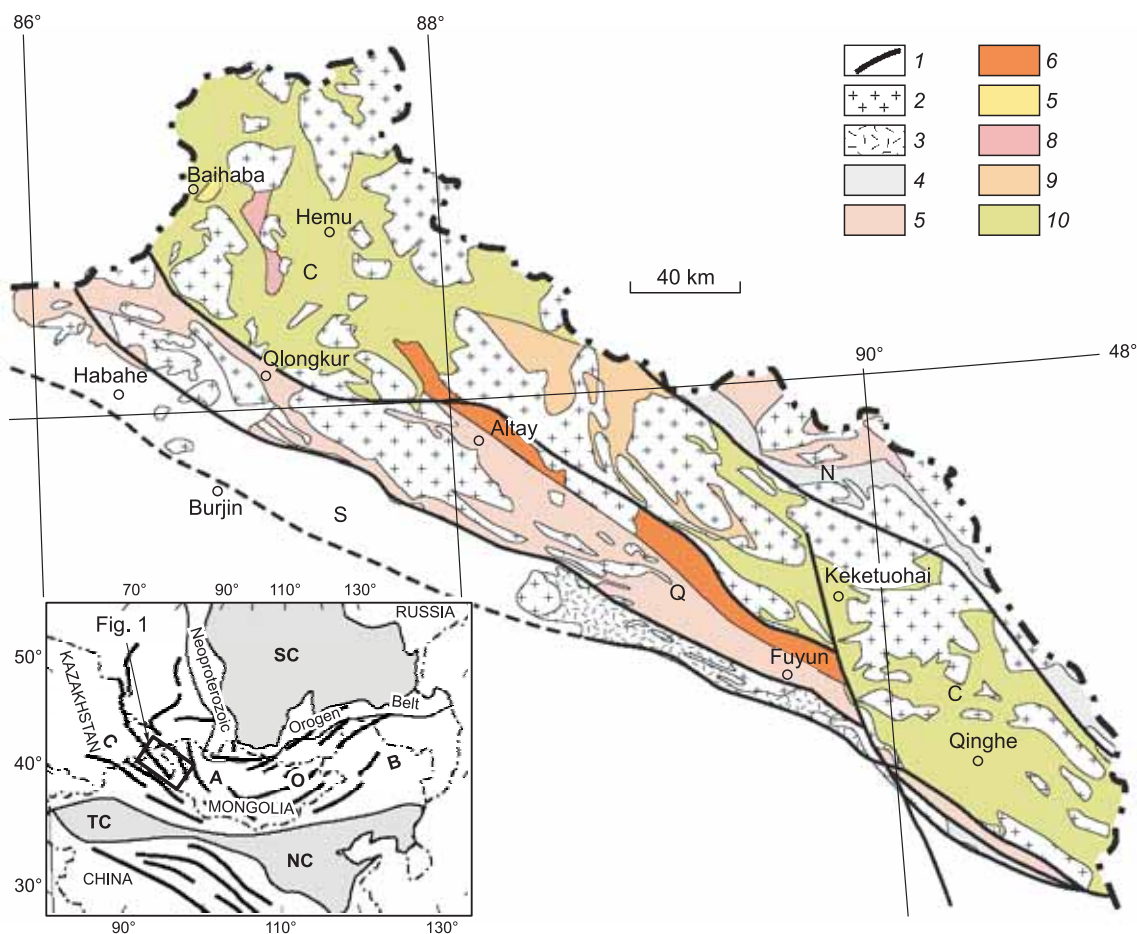


Рис. 2. Упрощенная геологическая карта Китайского Алтая [He et al., 1990; Li et al., 1996; Windley et al., 2002].

N — Северный домен, С — Центральный домен, Q — Кюнджур домен, S — Южный домен. Во вставке прямоугольной фигурой показано положение Китайского Алтая в структуре Азии: SC — Сибирский кратон, TC — Таримский кратон, NC — Северо-Китайский кратон. 1 — разломы, 2 — граниты, 3 — неизмененные гнейсы, 4 — карбон, слиты; 5 — Алтай, 6 — Кангбутьебао, 7 — Байхаба, 8 — Донгелек; 9 — серия Кумулути, 10 — серия Хабахе.

СТРАТИГРАФИЧЕСКИЕ ПОДРАЗДЕЛЕНИЯ

Хотя в Китайском Алтае широко представлены осадочные и вулканогенно-осадочные толщи (см. рис. 2), их корреляция затруднена из-за неоднородного метаморфизма, отсутствия доступных окаменелых останков и отсутствия геохронологических данных. Согласно широко используемой схеме стратиграфических подразделений (BGMRX, 1993), в северо-западной части региона расположены обломочные турбидитовые толщи, а в восточной части — в различной степени метаморфизованные осадочные породы. Общая мощность осадочной толщи возрастает на восток. Ниже представлено описание основных стратиграфических подразделений Китайского Алтая.

Серия Хабахе была впервые выделена в 1957 г. и изначально относилась к толще осадков, широко распространенных на обширной территории северной области Кунгур-Алтай-Фуюн (см. рис. 2). В дальнейшем эту серию относили к наиболее древней осадочной толще Китайского Алтая, которая в северо-западной части сложена преимущественно неметаморфизованными обломочными породами, а в центральной и восточной частях — неоднородно метаморфизованными породами [GCRSX, 1981; BGMRX, 1993; Windley et al., 2002; Long et al., 2007, 2008, 2010]. В северо-западной области типичная последовательность серии Хабахе представлена снизу вверх тремя непрерывными осадочными толщами [Windley et al., 2002]: 1) нижняя часть мощностью 1500—2000 м сложена метапесчаниками, металаевоолитами и тонкими сланцами; 2) средняя часть мощностью 2000 м сложена сланцами, металаевоолитами и в подчиненном количестве метапесчаниками; 3) верхняя часть мощностью 2000 м представлена метапесчаниками, металаевоолитами, глинистыми сланцами, мраморами и кремнистыми породами. В данном районе толща Хабахе несогласно перекрыта кислыми вулканическими породами свиты Донгелек, которая согласно перекрыта турбидитовыми породами свиты Байхаба [Wang, 1983; Peng, 1989; He et al., 1990; Windley et al., 2002; Long et al., 2007, 2010; Wang et al., 2011]. Серия Хабахе распространяется на юг Китайского Алтая, где ее породы метаморфизованы в условиях от зеленосланцевой до амфиболитовой фаций и перекрываются породами серии Кулумути (см. рис. 2).

Серия Хабахе изначально была отнесена к среднему—верхнему ордовику, но позднее ее возраст стали считать от кембрийского до среднеордовикского по находкам микропалеофлоры [GCRSX, 1981]. Авторы работы [Wang, Zhang, 1983] на основе данных по микропалеофлоре предложили отбросить термин «Хабахе» и заменить его термином «серия Ханаси», которая относилась к позднему синию. Также было предложено [Peng, 1989] сохранить название серии Хабахе, но возраст ее определили как синийский. В 1990-х годах исходная серия Хабахе была расчленена на кембрийскую серию Ханаси и нижне-среднеордовикскую серию Куингхе [BGMRX, 1993]. Позже [Windley et al., 2002] в известняках серии на запад от разлома Фуюн были обнаружены окаменелости микрорастений (*Plyoporota obsoleta*, *Lammarites* sp., *Turuchania* sp. и *Trematosphaeridium* sp.). Было сделано предположение, что две расчлененные серии (Ханаси и Куингхе) являются одной и той же осадочной толщей, было возвращено исходное название серии Хабахе и показано, что породы серии формировались от синийского до среднеордовикского времени. В работах [Long et al., 2007, 2010; Yuan et al., 2007b] были опубликованы U-Pb изотопные данные для большого количества детритовых цирконов из пород, отобранных из различных мест распространения серии. Цирконы из северо-западной области в основном имеют возрасты от 500 до 438 млн лет, а цирконы из восточной части Китайского Алтая преимущественно имеют возрасты 540—460 млн лет. Перекрывающие риолиты имеют U-Pb возраст цирконов 411 ± 5 млн лет. Таким образом, возраст отложений серии Хабахе укладывается в интервал 411—438 млн лет [Long et al., 2010].

В работе [Chen, Jahn, 2002] опубликованы валовые Sm-Nd изотопные составы для осадочных пород серии Хабахе, которые дали отрицательные значения $\epsilon_{Nd}(t)$ (–3.4 до –5.0), высокие значения I_{Sr} (0.710—0.712) и протерозойские модельные возрасты T_{DM} (1.5 до 1.8 млрд лет). Авторы предположили, что происхождение раннепалеозойских осадков является комбинацией эволюционировавших континентально-коровых веществ и в подчиненном количестве палеозойских незрелых материалов. Однако в работах [Long et al., 2007, 2010] были выполнены изотопные исследования Hf в детритовых цирконах серии Хабахе, которые дали широкий интервал значений $\epsilon_{Hf}(t)$ (–20...+17, в основном положительные). Большая часть детритовых цирконов характеризуется высокими значениями отношения Th/U (< 0.1), концентрическим строением и аутоморфизмом [Long et al., 2007, 2010], а геохимические составы осадков характеризуются обогащением легкими РЗЭ ($La/Yb_N = 3.2—12.6$) и относительно более низкими значениями CIA (индекс химического выветривания от 49 до 79), чем у среднего постархейского глинистого сланца [Long et al., 2008]. Данные свойства используются для вывода о том, что осадки преимущественно формировались из незрелых источников со значительным вкладом молодого вещества и подчиненным количеством вклада зрелой континентальной коры. Породы серии Хабахе смяты в изоклинальные складки с крутыми падениями осевых плоскостей и имеют ритмичность морского флиша, что указывает на их происхождение в условиях активной континентальной окраины [Windley et al., 2002; Li et al., 2006; Long et al., 2008].

Серия Кулумути несогласно перекрывает серию Хабахе и выходит на поверхность в центре района (см. рис. 2). Она рассматривается как турбидитовая толща силурийского возраста [BGMRX, 1993; Windley et al., 2002]. Данная серия имеет общую мощность около 8000 м и подразделяется на две подсерии в соответствии с различием в литофациях. Верхняя часть сложена метапесчаниками, алевролитами, филлитами, сланцами и гнейсами, а нижняя часть состоит из слюдисто-кварцевых сланцев, мигматизированных гнейсов, в подчиненном количестве из метапесчаников и алевролитов. Хотя возраст осадконакопления данной серии считается силурийским [BGMRX, 1993; Windley et al., 2002], точных геохронологических данных для этих осадков нет. Исходные стратиграфические взаимоотношения скрыты региональным метаморфизмом и деформациями [Windley et al., 2002]. Поэтому область распространения данной серии плохо определена на геологических картах. По данным [Windley et al., 2002], метаморфизм изменил серию Кулумути до двух крупных метаморфических зон с различными показателями давления: 1) зона низкого давления расположена на востоке и распространяется приблизительно на 80 км от Кекетуохай на северо-запад при минералогическом парагенезисе хлорит—биотит—гранат—ставролит—андалузит—силлиманит—кордиерит; 2) зона высокого давления выходит на поверхность в западной и центральной частях Китайского Алтая и распространяется на СЗ—ЮВ на расстояние 50 км с минералогическим парагенезисом гранат—ставролит—кианит—силлиманит.

Свита Донгелек исходно относилась к пачке вулканических пород, распространенных в северо-западной части Китайского Алтая от района Байхаба до Джаденгью (см. рис. 2). Вулканические породы в основном представлены двумя определенными литологическими ассоциациями, включая пачки риолитов и дацит-риолитов [Shan et al., 2005; Wang et al., 2011]. На основе возраста осадконакопления перекрывающей свиты Байхаба и согласным контактом между ними, возраст свиты Донгелек был определен как позднеордовикский. В работе [Wang et al., 2011] опубликованы данные о U-Pb возрасте цирконов из риолитов, который составляет 443 млн лет, в то время как пачка дацит-риолитов имеет более молодой возраст — 411 млн лет, что указывает на то, что в свите действительно представлены вулканические породы различного возраста.

Свита Байхаба согласно залегает на серии Хабахе и сложена пачкой осадочных и вулканических пород, которая имеет ограниченное распространение в области Байхаба (см. рис. 2). В работе [Windley et al., 2002] данная свита разделена на две части: 1) нижняя часть имеет мощность 1150 м и составлена туфами, кремнистыми сланцами, андезитами, андезитовыми конгломератами и андезитовыми брекчиями; 2) верхняя часть имеет мощность 800 м и состоит из глинистых сланцев и известняков. Известняки в верхних отложениях содержат некоторые окаменелости, такие как *Plasmoporella* sp., *Propora* sp., *Palaeophyllum* sp. и *Madiolopsis* sp. [Windley et al., 2002]. Возраст данной свиты считался позднеордовикским. В [Long et al., 2010] выделены детритовые цирконы из сланца свиты Байхаба, группа возрастов которых (514—438 млн лет) аналогична возрасту серии Хабахе, что указывает на то, что они могут иметь общий источник осадочного материала.

Свита Кангбутиебао распространена в области Кионгкуер и залегает на отложениях серии Кулумути. Она сложена вулканическими и пирокластическими породами и была подвержена метаморфизму зеленосланцевой и амфиболитовой фаций [Windley et al., 2002; Chai et al., 2009]. Вулканическая свита содержит много промышленных рудных месторождений, включая Кактал (Pb-Zn), Менгку (железо), Абагонг (железо), Тиемуерте (Pb-Zn) и Кейинбулак (Cu-Zn). Механизм металлогенеза и связь с тектоникой вулканогенно-осадочных пород были изучены в работах [Yu et al., 1993; Zhang et al., 2000; Niu et al., 2006a,b; Long et al., 2007; Chai et al., 2009; Liu et al., 2010]. Хотя в некоторых моделях сделано предположение, что рудные месторождения могут иметь возраст, близкий к возрасту осадконакопления вмещающих вулканогенно-осадочных пород [Windley et al., 2002; Chai et al., 2009]. Валовые Rb-Sr изотопные исследования метавулканических пород дали изохронные возрасты 307 и 286 млн лет [Yu et al., 1993], а некоторые вулканические породы дали K-Ar возрасты в интервале 330—300 млн лет [He et al., 1990]. Однако геологическая значимость данных возрастов неочевидна, поскольку породы свиты Кангбутиебао широко подверглись метаморфизму. Цирконы из метариолитов данной свиты имеют U-Pb возраст от 412 до 400 млн лет, что указывает на то, что кислые вулканические породы были извержены в девонское время [Chai et al., 2009; Liu et al., 2010]. Ассоциация риолитов, туфов и основных вулканических пород в свите Кангбутиебао аналогична ассоциации в активных континентальных окраинах [Cong et al., 2007; Chai et al., 2009; Liu et al., 2010].

Свита Алтай состоит преимущественно из нормальных морских кластических пород и в подчиненном количестве из пиллоу-базальтов, которые широко распространены в районе населенных пунктов Хабахе, Алтай, Фуюн (см. рис. 2). Полная мощность свиты более 2000 м, и она сложена двумя пачками. Верхняя пачка содержит пиллоу-базальты, андезиты и пирокластические породы, а нижняя пачка представлена преимущественно средними—кислыми вулканическими породами (дацитами и андезитами), пирокластическими породами и в подчиненном количестве базальтовыми лавами. Свита Алтай вмещает несколько месторождений золота. В работах [Dong, 2000; Rui et al., 2002] сделано предположение, что

большинство золоторудных месторождений приурочено к крупным разломам, плоскости которых погружаются на северо-восток. В работе [Windley et al., 2002] указано, что часть золота могла сформироваться при эрозии кислых вулканических пород свиты Кангбутьебао и, вероятно, разломы являются шовными зонами между вулканической дугой и более ранней активной континентальной окраиной. Тонкая пачка известняков в этой свите содержит некоторые окаменелые останки (*Cymostrophia* cf. *stephani*, *Cymostrophia* aff. *guadrata*, *Megastrophia* sp., *Stropheodonta* sp., *Euryspirifer* sp., *Acrospirifer* sp., *Brachyprion* sp., *Cyrtospirifer* sp., *Favosites goldfussi*, *Pachyfavosites palymorphus*, *Pachyfavosites yui*, *Pachyfavosites vilvaensis*, *Calceola sandalina* subsp. *sinensis*), которые указывают на среднепозднедевонский возраст осадконакопления [Xiao et al., 1992; BGMRX, 1993; Windley et al., 2002]. В вулканической толще свиты были определены бониниты и адакиты, что указывает на то, что они были образованы в обстановке, связанной с субдукцией [Xu et al., 2003; Niu et al., 2006a,b].

МЕТАМОРФИЗМ И ИССЛЕДОВАНИЯ ФУНДАМЕНТА

В Китайском Алтае выделена серия метаморфических зон, которые на основе их минеральных ассоциаций и *P-T* условий могут быть разделены на два различных типа, включающих кианитовый тип среднего давления и андалузитовый тип низкого давления [Zhuang, 1993; Zhang et al., 2004; Wei et al., 2007; Zheng et al., 2007a]. В обоих типах имеются биотитовые, гранатовые и ставролитовые зоны условий низкого давления с силлиманитом и, локально, гранат-кордиеритовые зоны условий высокого дав-

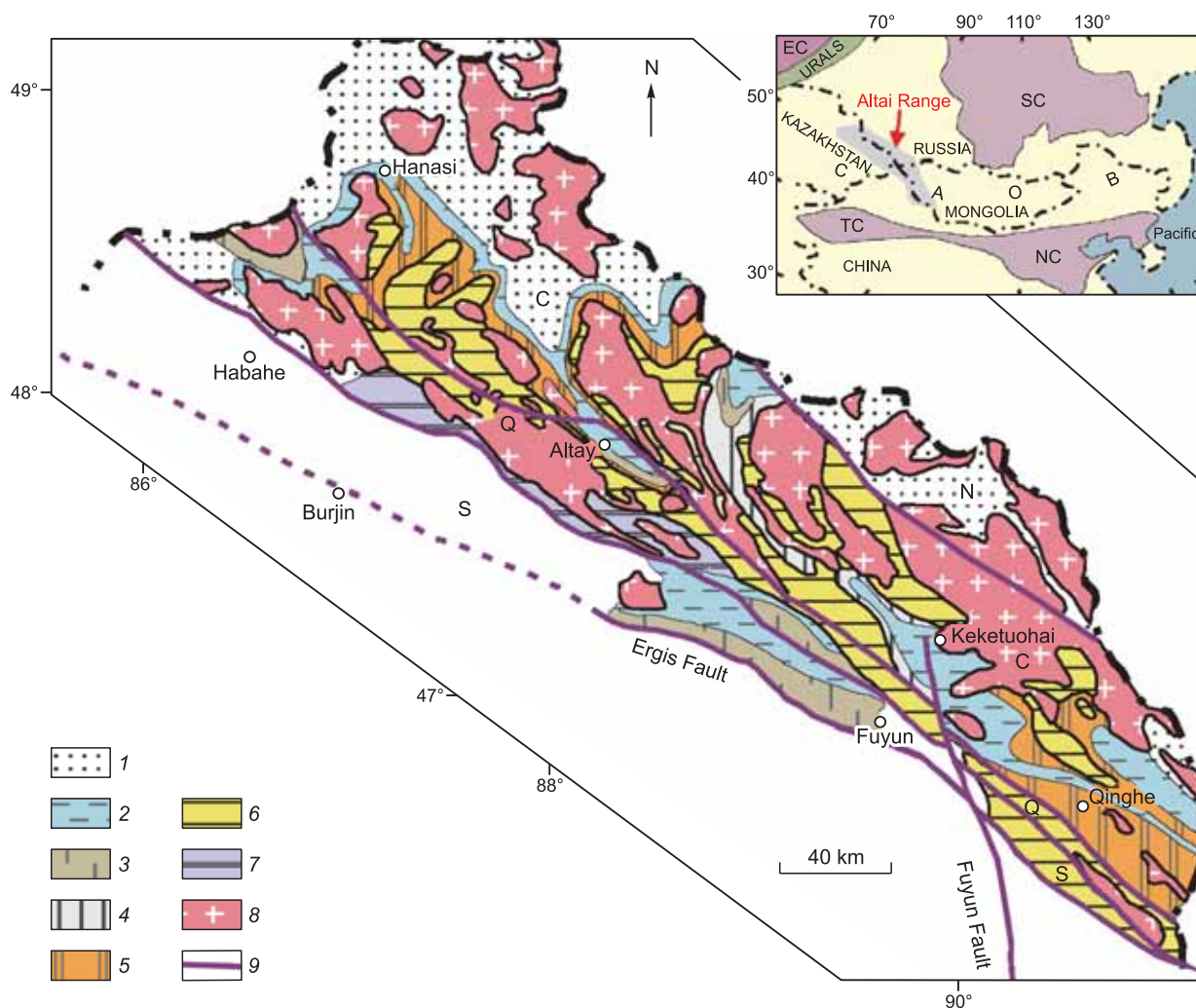


Рис. 3. Схема распространения метаморфических зон Китайского Алтая [Zhang et al., 2004; Wei et al., 2007; Jiang et al., 2010].

Метаморфические зоны: 1 — хлоритовая, 2 — биотитовая, 3 — гранатовая, 4 — кианитовая, 5 — андалузит (кианит)-ставролитовая, 6 — силлиманитовая, 7 — гранат-кордиеритовая, 8 — гранитная интрузия, 9 — разломы.

ления [Wang et al., 2007] (рис. 3). Они отличаются тем, что первая содержит кианитовую зону, в то время как последняя содержит ставролит-андалузит и андалузит-силлиманитовые зоны среднетемпературных условий. По-видимому, распределение зон андалузитового типа более широкое, чем распределение зон кианитового типа (см. рис. 3). Детальные распределения и минеральные ассоциации данных метаморфических зон описаны в работах [Zhuang, 1993; Wei et al., 2007]. На основе полевых исследований в работе [Zhuang, 1993] указано близкое пространственное взаимоотношение между метаморфическими зонами и термальными куполами овальной формы, в ядре которых расположены гранитные интрузии или гранитогнейсы. Однако в работе [Wei et al., 2007] было переосмыслено взаимоотношение минеральных фаз в псевдоразрезах KMnFMASH и KFMASH. Предполагается, что данные метаморфические зоны содержат минеральные ассоциации различных $P-T$ условий, что обусловлено эффектами прогрессивного метаморфизма при погружении и эксгумации пород. Следует заметить, что пиковые условия для пород в гранат-кордиеритовой зоне имеют набор $P-T$ параметров с высоким геотермальным градиентом около $33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{км}$ [Wei et al., 2007] и образовали пелитовые гранулиты с минеральной ассоциацией гранат—кордиерит—калиевый полевой шпат—биотит—силлиманит—плаггиоклаз—кварц, что указывает на следующую оценку $P-T$ параметров: $780\text{--}800\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0.5\text{--}0.6$ кбар [Wang et al., 2009b]. В работе [Li et al., 2004] указаны гранулиты основного состава в виде тектонических линз в силлиманитовой зоне, состоящие из двух видов пироксена, плаггиоклаза, амфибола и биотита, и указывающие на $P-T$ параметры их формирования при $750\text{--}780\text{ }^{\circ}\text{C}$ и $0.6\text{--}0.7$ кбар. Кольца быстрого роста зерен цирконов в амфиболитах и гнейсах из силлиманитовой зоны позволяют по термометру «титана в цирконе» определить температуру в $720\text{ }^{\circ}\text{C}$ [Jiang et al., 2010].

На основе Rb-Sr изохронного валового возраста в 365 млн лет из сильнометаморфизованных сланцев и гнейсов в работе [Zhuang, 1993] указано, что оба типа метаморфизма были одновозрастными; андалузитовый метаморфизм низких давлений происходил в верхних частях термальных куполов, в то время как кианитовый метаморфизм умеренных давлений имел место на флангах. Раннепалеозойский метаморфизм доказан большим количеством колец быстрого роста в зернах цирконов из высокой степени метаморфизованных пород силлиманитовой зоны, которые дали надежные U-Pb возрасты 390 млн лет [Long et al., 2007; Jiang et al., 2010]. С другой стороны, в работе [He et al., 1990] сделано предположе-

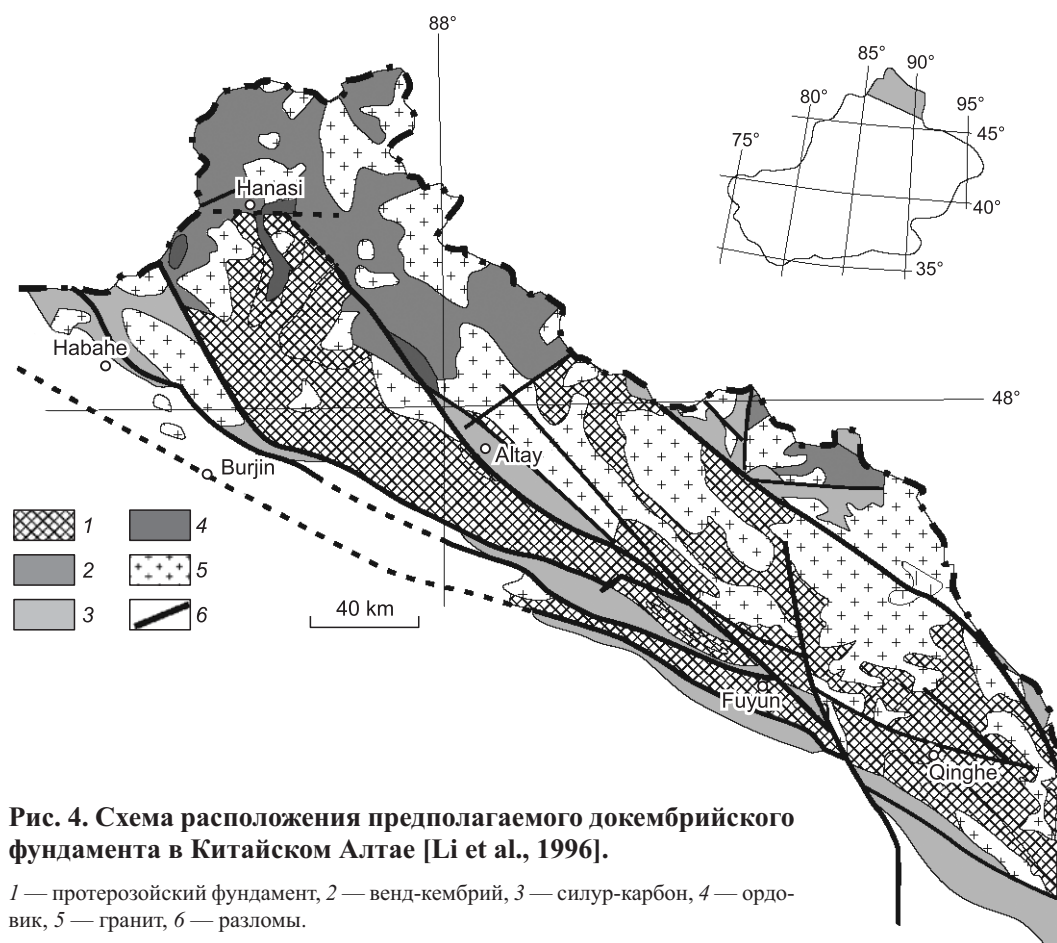


Рис. 4. Схема расположения предполагаемого докембрийского фундамента в Китайском Алтае [Li et al., 1996].

1 — протерозойский фундамент, 2 — венд-кембрий, 3 — силур-карбон, 4 — ордовик, 5 — гранит, 6 — разломы.

ние, что андалузитовый метаморфизм связан с рифтогенным процессом, в то время как кианитовый метаморфизм был связан с последующим сближением плит. В последнее время были получены возрастные оценки $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методом для слюды и амфиболов из сланцев и гнейсов в широком интервале от 275 до 244 млн лет [Laurent-Charvet et al., 2003; Briggs et al., 2007, 2009], а для монацитов из осадочных пород, метаморфизованных в условиях зеленосланцевой до амфиболитовой фаций были получены Th-Pb возрасты методом ионного микрозондирования в интервале от 293 до 254 млн лет [Briggs et al., 2007] и методом СИМЕ — от 268 до 261 млн лет [Zheng et al., 2007a]. В совокупности эти данные указывают на то, что Китайский Алтай претерпел два метаморфических события: одно в раннем, а другое в позднем палеозое.

Породы высокой степени метаморфизма в основном представлены сланцами, гнейсами, мигматитами и амфиболитами, которые широко выходят на поверхность в центральной и южной частях Китайского Алтая (см. рис. 3). Данные породы изначально объединялись в осадочные стратиграфические подразделения (в основном в серию Хабахе), но в дальнейшем были расчленены как докембрийские породы фундамента и названы сериями Кемуки и Фуюн (рис. 4) [Li et al., 1996; Li, Poliyangsi, 2001], на основе «докембрийских» возрастов, указанных ниже. В работе [Qu, Zhang, 1991] были получены оценки Pb модельного возраста для калиевого полевого шпата в интервале 1286—2483 млн лет для мигматитов и гнейсогранитов. В работе [Hu et al., 2000] были указаны валовые Nd модельные возрасты от 900 до 2600 млн лет для 19 образцов пород высокой степени метаморфизма. Для четырех проб гнейсов и одной пробы амфиболитов был получен Sm-Nd изохронный возраст в 1357 ± 52 млн лет [Hu et al., 2002]. Кроме того, в работе [Hu et al., 2000] был описан возраст верхнего пересечения 2349 ± 266 млн лет и нижнего пересечения — 353 ± 285 млн лет для цирконов из гранатсодержащих сланцев в области Фуюн. Однако описанные выше докембрийские возрасты не подтверждаются последними U-Pb результатами для цирконов. Датирование цирконов U-Pb SHRIMP методом из гнейсов толщи Куингхе и гранулитов толщи Фуюн дало возрасты 281 ± 3 и 279 ± 6 млн лет соответственно [Chen et al., 2006; Hu et al., 2006], а U-Pb датирование цирконов *in situ* дало возрасты от 448 до 451 млн лет для некоторых ортогнейсов в области Фуюн рядом с разломом Эркис (см. рис. 2) [Briggs et al., 2007]. Датирование цирконов U-Pb методом для полосчатых парагнейсов в восточной части Китайского Алтая показало преобладающую популяцию возрастов от 466 до 528 млн лет с небольшим количеством докембрийских детритовых зерен цирконов. Гнейсовидные гранитоиды, внедрившиеся в полосчатые парагнейсы, имеют возраст 380—450 млн лет [Sun et al., 2008].

ГРАНИТНЫЕ ИНТРУЗИИ

Гранитные породы занимают как минимум 40 % площади Китайского Алтая [Zou et al., 1988] (см. рис. 2, 3), а некоторые сильнодеформированные и метаморфизованные породы называются ортогнейсами и гнейсовыми гранитами. Опубликованные ранее Rb-Sr, K-Ar и Ar-Ar изотопные данные указывали на мезозойские возрасты [Liu, 1990, 1993; He et al., 1990, 1994; Yu et al., 1993; Zhang et al., 1996; Hu et al., 1997, 2000; Wang et al., 1998], и в работе [Zou et al., 1988] гранитные породы Китайского Алтая были разделены на подгруппы орогенных (408—377 млн лет) и анорогенных (344—290 млн лет). Полученные недавно прецизионные U-Pb данные по цирконам указывают, что большинство гранитных интрузий имеют возраст от раннего до среднего палеозоя [Windley et al., 2002; Wang et al., 2006; Briggs et al., 2007; Yuan et al., 2007a; Sun et al., 2008; Cai et al., 2011a], а становление древнейших гранитных интрузий произошло 479 млн лет назад [Cai et al., 2011a]. На основе преимущественно прецизионных U-Pb возрастов цирконов из шести гнейсогранитных массивов в работе [Wang et al., 2006] делается предположение, что Китайский Алтай развивался в раннем—среднем палеозое, а в интервале 408—375 млн лет произошел «период магматического затишья». Однако в работе [Cai et al., 2011a] собраны данные по опубликованным U-Pb возрастам цирконов из гранитов и показано, что магматизм не прекращался от раннего до среднего палеозоя, а значимых перерывов в магматизме не наблюдается (см. рис. 5, 6). Тем не менее позднепалеозойский и мезозойский магматизм был относительно слабым, с ограниченным распространением. Например, в работе [Yuan et al., 2007a] указан массив гранитов I-типа с возрастом цирконов 318 ± 6 млн лет и сделано предположение, что его становление произошло во время периода затухания магматической активности. Многие небольшие тела гранитов A-типа имеют возрасты становления от около 300 до 270 млн лет, а многие пегматитовые дайки были образованы в интервале от 220 до 198 млн лет [Wang et al., 2004, 2006; Tong et al., 2006; Zhu et al., 2006; Shen et al., 2011].

Гранитные интрузии, имеющие возраст становления древнее 300 млн лет, включают тоналиты, гранодиориты и граниты, которые являются металюминиевыми до пералюминиевыми ($\text{ASI} = 0.8\text{—}1.5$) [Wang et al., 2006; Yuan et al., 2007a; Sun et al., 2008; Cai et al., 2011b]. В статье [Yuan et al., 2007a] указано, что металюминиевые граниты относятся к I-типу и характеризуются относительно низкими содержаниями K и Rb, низкими отношениями Rb/Sr (< 0.6), с отрицательными Eu-аномалиями ($\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0.5\text{—}$

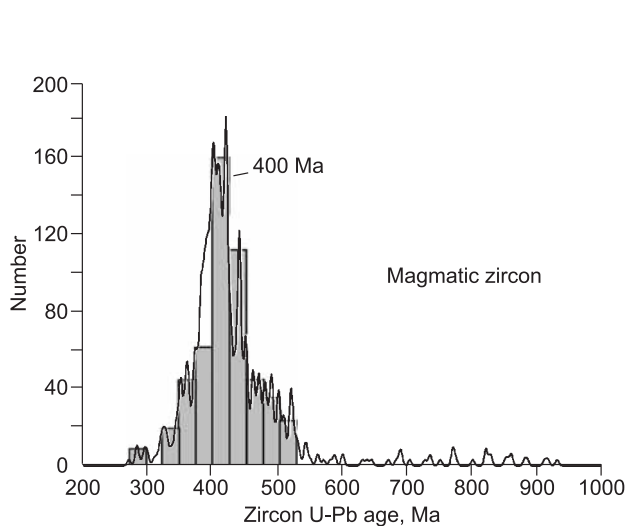


Рис. 5. Гистограмма распределения U-Pb возрастов цирконов магматических пород Китайского Алтая.

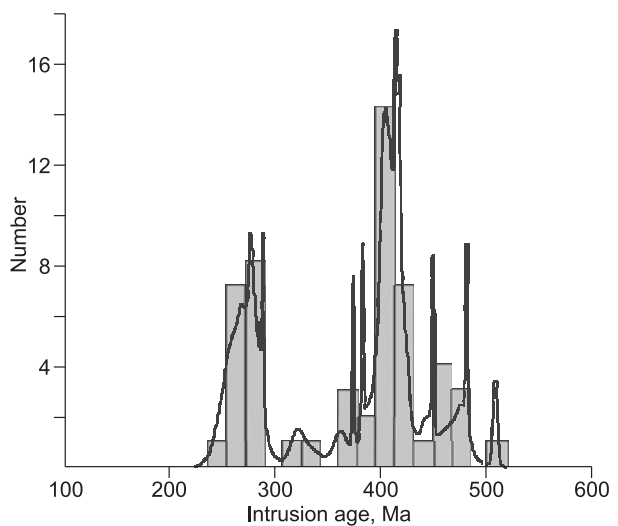


Рис. 6. Гистограмма распределения возрастов интрузивных пород Китайского Алтая.

1.0) или без таковых и слабым фракционированием по тяжелым РЗЭ ($Dy/Yb_N < 1.5$). Авторы предположили, что исходные магмы были образованы дегидратационным плавлением роговообманкового среднекорового источника (выше поля стабильности граната), в котором преобладали основные до средних пород. С другой стороны, в работе [Cai et al., 2011b] на основе высоких значений ASI (в основном 1.01 до 1.46) и соответствующих низких содержаний нормативного корунда (от 0.6 до 5.6 мас. %), сделано предположение, что пералюминиевые граниты являются гранитами *S*-типа и являются продуктами дегидратационного плавления слюдосодержащего верхнекорового источника, в котором преобладали незрелые до зрелых метапелитовые и псаммитовые породы. Геохимические исследования указывают на то, что некоторые магмы, возможно, подвергались составной ассимиляции и процессам фракционной кристаллизации [Liu et al., 1997].

Тела, сложенные гранитами *A*-типа, широко распространены в центральной и юго-восточной частях Китайского Алтая, имеют возраст кристаллизации моложе 300 млн лет, сложены они в основном щелочно-полевошпатовыми гранитами и относятся к типу A_2 . Данные породы были определены как посттектонические гранитоиды [Tong et al., 2006; Shen et al., 2011].

В работах [Zhao et al., 1993; Chen, Jahn, 2002] были проведены Sr-Nd изотопные исследования некоторых гранитных пород и получены значения $\epsilon_{Nd}(t)$ в интервале от +2.1 до -2.3, значения I_{Sr} в интервале от 0.705 до 0.714 и Nd модельные возрасты от 0.7 до 1.6 млрд лет. Авторы предположили, что породы были образованы при плавлении смеси вещества незрелой вулканической дуги и древней континентальной коры. Данная интерпретация была поддержана результатами по другим гранитным интрузиям, которые имеют значения $\epsilon_{Nd}(t)$, близкие к нулю или отрицательные (от -0.67 до -4.41), и высокие исходные Sr изотопные составы ($I_{Sr} = 0.7067$ до 0.7092) [Yuan et al., 2007a]. В плане валовое Nd и Sr изотопное картирование для гранитных интрузий показывает, что значения $\epsilon_{Nd}(t)$ укладываются в интервал от -4 до +2 в Центральном Алтае до +1.4 до +6 в южной части, а соответствующие Nd модельные возрасты (T_{DM}) уменьшаются от 1.6—1.1 млрд лет до 1.0—0.5 млрд лет и I_{Sr} , соответственно, уменьшается от высоких (> 0.705) до низких (< 0.705) значений [Wang et al., 2009a]. Однако приведенные выше вывод и вариации в пространстве не проявляются Hf изотопными данными в цирконах гранитоидных пород. Магматические цирконы имеют положительные значения $\epsilon_{Hf}(t)$ (от 0 до +9), а захваченные зерна цирконов показывают сравнимый интервал значений $\epsilon_{Hf}(t)$ (от +2.5 до +12); что указывает на то, что преобладали незрелые материалы, в то время как древние коровые породы были незначительными в магматическом источнике [Cai et al., 2011a].

ДИСКУССИЯ

Тектоническая обстановка Китайского Алтая в раннем палеозое: пассивная или активная окраина? Выяснение тектонической обстановки является ключевым для установления истории эволюции Китайского Алтая и ЦАСП в целом. Поскольку серия Хабахе является древнейшей, самой мощной и наиболее широко распространенной осадочной толщей в регионе, ее обстановка осадконакопления

может предоставить важнейшую информацию о ранней тектонической эволюции Алтайского орогена. Ранее Китайский Алтай считался микроконтинентом, а нижнепалеозойские осадочные породы — осадками, образовавшимися на пассивной континентальной окраине [He et al., 1990, 1994; Li et al., 1996, 2006; Li, Poliyangsi, 2001; Chen, Jahn, 2002]. Однако возрастающее количество U-Pb данных по цирконам указывает, что в раннем палеозое имел место активный магматизм [Lou, 1997; Windley et al., 2002; Shan et al., 2005; Wang et al., 2006; Sun et al., 2008; Cai et al., 2011a; Wang et al., 2011]. Например, в работе [Cai et al., 2011a] приводятся данные, что становление гнейсогранитной интрузии произошло 479 млн лет назад в северо-западной области. Авторы статьи [Sun et al., 2008] датировали магматические зерна циркона из гнейсогранитов в домене Кионгкур и получили U-Pb возрасты от 380 до 453 млн лет. В работе [Wang et al., 2006] указывается SHRIMP U-Pb возраст циркона 462 млн лет из деформированной гранитной интрузии в южной части Китайского Алтая. Кроме того, кислые вулканические породы также имеют раннепалеозойские возрасты излияния в интервале от 411 до 505 млн лет [Windley et al., 2002; Shan et al., 2005; Wang et al., 2011]. Данные магматические породы являются металюминиевыми и имеют связь с процессами субдукции [Shan et al., 2005; Wang et al., 2006, 2009; Sun et al., 2008]. Захваченные зерна в гранитных породах имеют раннепалеозойские возрасты (543—421 млн лет) и магматическое происхождение, что, возможно, представляет возраст образования материнских пород [Cai et al., 2011a]. Кроме того, несколько наборов признаков указывают на то, что осадочные породы серии Хабахе, вероятно, отлагались в обстановке активной континентальной окраины.

1. В кластических осадках серии Хабахе распространены полевошпатовые песчаники и конгломераты, петрологически идентичные современным грауваккам, образованным на активной континентальной окраине или на островной дуге. Плохая сортировка и окатанность зерен песка указывают на то, что осадки имели короткое время транспортировки и залегают близко к источнику [Li et al., 2006; Long et al., 2007]. Флишевые ритмы толщи указывают на ее происхождение в условиях преддугового прогиба вблизи аккреционной призмы [Long et al., 2007, 2010].

2. Содержания основных элементов в осадочных породах серии Хабахе указывают на относительно низкий уровень выветривания ($CIA = 40—79$), с более высокими значениями $ICV (0.73—1.36)$, чем у среднего постаршейского сланца (PAAS). А распределение в них рассеянных элементов значительно отличается от распределения в зрелых осадках для пассивной континентальной окраины [Li et al., 2006; Long et al., 2008]. Поэтому отложения серии Хабахе были подвержены относительно слабому химическому выветриванию и были преимущественно образованы из незрелого источника, доминированного кислыми—средними магматическими породами, что является типичной особенностью для активной континентальной окраины или островной дуги [Long et al., 2008].

3. Датирование U-Pb методом детритовых цирконов дало стабильное распределение значений, с преобладанием палеозойских возрастов (438—542 млн лет) и с меньшим (< 8 %) количеством более древних (> 1000 млн лет) [Yuan et al., 2007b; Long et al., 2007, 2010]. Данный тренд не соответствует возрасту детритовых цирконов пассивной континентальной окраины, так как не обнаружено древних цирконов, привносимых с континента [Ketchum et al., 2001]. Эти детритовые цирконы с раннепалеозойскими возрастными имеют вторичную зональность и аутоморфную и субаутоморфную форму кристаллов, что указывает на магматический генезис и малое расстояние транспортировки от источника осадконакопления [Yuan et al., 2007b; Long et al., 2007, 2010]. Имеющиеся данные показывают, что в зоне источника для серии Хабахе преобладали раннепалеозойские магматические породы и что ранний палеозой являлся важным эпизодом магматической деятельности, ассоциирующей с субдукцией Палеоазиатского океана [Sengör et al., 1993; Sengör, Natal'in, 1996; Xiao et al., 2004; Windley et al., 2007; Dobretsov, Buslov, 2007; Buslov, 2011].

Таким образом, Китайский Алтай, вероятно, представляет раннепалеозойскую активную континентальную окраину или островную дугу [Wang et al., 2006; Long et al., 2007, 2010; Yuan et al., 2007b; Sun et al., 2008, 2009; Cai et al., 2011a], а не пассивную континентальную окраину, как предполагалось ранее [He et al., 1990; Li, Poliyangsi, 2001; Chen, Jahn, 2002; Li et al., 2006].

Природа Китайского Алтая: микроконтинент или субдукционно-аккреционный комплекс?

На основе Pb модельных возрастов по полевому шпату (1286 до 2483 млн лет) [Qu, Zhang, 1991], валового Sr-Nd изохронного возраста (1357 ± 52 млн лет) [Hu et al., 2002] и Nd модельных возрастов (900 до 2600 млн лет) [Hu et al., 2000], а также возраста верхнего пересечения (2349 ± 226 млн лет) [Hu et al., 2002] по цирконам (U-Pb метод) в работе [Li et al., 2006] сделано предположение, что Китайский Алтай является древним микроконтинентом, простирающимся на юг под Джунгарский бассейн. Эта идея похожа на выдвинутую ранее в работах [Li et al., 1996; Li, Poliyangsi, 2001], в которых глубокометаморфизованные породы Китайского Алтая считаются фрагментами протерозойского фундамента. Однако геохимические исследования гранитоидов и вулканических пород из кернов указывают на то, что Джунгарский бассейн подстилается океанской корой, и не подтверждают предположение о существовании континентального фундамента [Zhou, 1994; Han et al., 1997; Hu, Wei, 2003; Chen, Jahn, 2004; Zheng et al.,

2007b]. В работе [Hu et al., 2002] были переосмыслены описанные выше геохронологические данные и сделан вывод о том, что существование протерозойского фундамента в Китайском Алтае очень спекулятивно и сомнительно, поскольку вышеперечисленные данные могут привести к двусмысленным геологическим выводам. Недавнее датирование U-Pb методом цирконов из гнейсов Куингхе и гранулитов Фуюн, которые ранее считались фрагментами протерозойского фундамента, дало позднепалеозойские возрасты 281 ± 3 и 279 ± 6 млн лет соответственно [Chen et al., 2006; Hu et al., 2006], а по некоторым из них получен интервал возрастов 448—451 млн лет [Briggs et al., 2007]. Эти геохронологические данные не поддерживают теорию о существовании так называемого «докембрийского фундамента» в Юго-Западном Китайском Алтае. Аналогично, полосчатые парагнейсы и ассоциирующие гнейсограниты в северо-западной части Китайского Алтая также были детально изучены. U-Pb датирование детритовых цирконов из полосчатых парагнейсов дало преобладающую возрастную популяцию 466—528 млн лет с незначительным количеством докембрийских возрастов, а гнейсогранитоиды, внедрившиеся в полосчатые парагнейсы, имеют возраст становления от 380 до 450 млн лет [Sun et al., 2008]. Таким образом, данные породы также не являются докембрийским фундаментом, как считалось ранее [He et al., 1990; Li et al., 1996, 2006; Li, Poliyangsi, 2001]. Кроме того, полосчатые парагнейсы имеют популяции U-Pb возрастов цирконов и Hf модельные возрасты, близкие к таковым детритовых цирконов из серии Хабахе (рис. 7), что указывает на то, что высокометаморфизованные парагнейсы, вероятно, являются метаморфическими аналогами серии Хабахе.

Недавно в работах [Windley et al., 2002; Wang et al., 2009] наличие древних цирконов с $^{207}\text{Pb}/^{206}\text{Pb}$ возрастными 1000—1700 млн лет в осадочных и метаморфических породах объяснялось присутствием перекрытого фундамента. Однако многочисленные захваченные цирконы из гранитных пород дают раннепалеозойский (543—421 млн лет), а не докембрийский возраст [Cai et al., 2011a]. Геохимические ха-

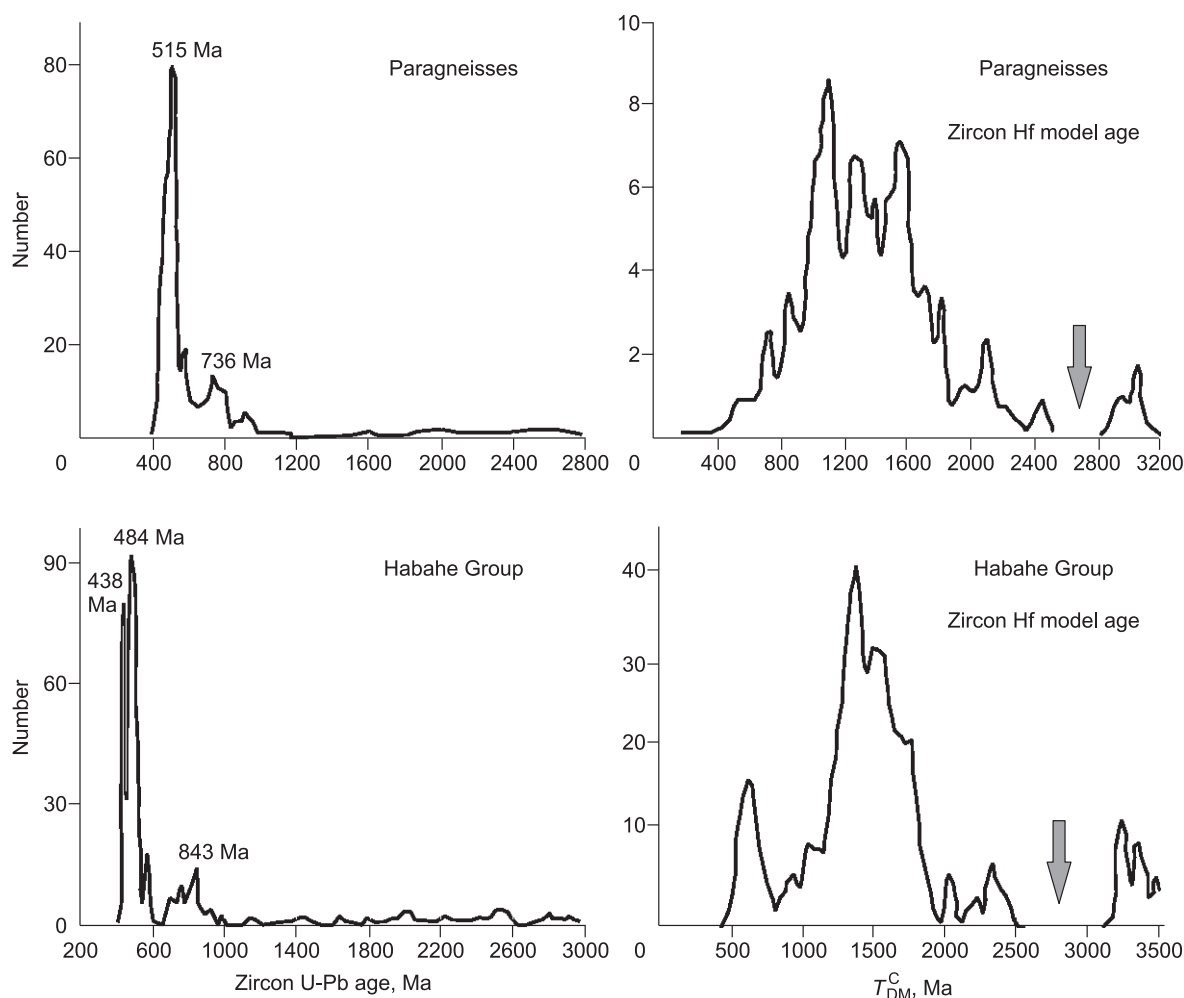


Рис. 7. Гистограмма распределения $\varepsilon_{\text{Hf}}(t)$ значений и T_{DM} модельных возрастов цирконов из отложений группы Хабахи и высокометаморфизованных пород Китайского Алтая.

рактические характеристики указывают на то, что исходная магма для этих гранитных интрузий была получена из незрелых источников, состоящих в основном из пород от мафитовых до средних [Yuan et al., 2007a]. Хотя гранитные интрузии Китайского Алтая представляют широкий интервал валовых значений $\epsilon_{Nd}(t)$ (-2.7...+2.8) [Chen, Jahn, 2002; Wang et al., 2006, 2009a; Yuan et al., 2007a], их значения $\epsilon_{Hf}(t)$ постоянно остаются положительными (от 0 до +9) [Sun et al., 2008, 2009; Cai et al., 2011a]. Различие между валовыми изотопами Nd и Hf, возможно, обусловлено мобилизацией элементов в породах, кроме Hf в цирконах в течение более поздних метаморфических изменений. Таким образом, валовые составы отношения Sr/Nd изотопов вряд ли могут предоставить критерии относительно природы источника [Kemp et al., 2006]. Поскольку докембрийские цирконы присутствуют только в метасадочных породах, мы считаем, что они, вероятно, произошли от существующих неподалеку более древних пород [Sun et al., 2008; Long et al., 2010], и нет необходимости предполагать скрытый докембрийский фундамент в Китайском Алтае.

Таким образом, мы считаем, что Китайский Алтай представляет собой типичный аккреционный орогенный пояс, образованный долгоживущими субдукционно-аккреционными процессами [Sengör et al., 1993; Sengör, Natal'in, 1996; Windley et al., 2002, 2007; Xiao et al., 2004, 2008, 2009, 2010], а не докембрийский микроконтинент [Li et al., 2006; Wang et al., 2006]. Это соответствует геологическим фактам, таким как широкое распространение незрелых осадочных пород серии Хабахе [Li et al., 2006; Yuan et al., 2007b; Long et al., 2007, 2008, 2010], вулканических пород [Chai et al., 2009; Liu et al., 2010; Long et al., 2010; Wang et al., 2011] и наличие крупных гранитных интрузий [Jahn et al., 2000a,b; Chen, Jahn, 2002; Jahn, 2004; Wang et al., 2006, 2009a; Yuan et al., 2007a; Sun et al., 2008, 2009; Cai et al., 2011a,b].

Тектоническая эволюция и рост коры в Китайском Алтае. На основе предположения о едином докембрийском фундаменте под Китайским Алтаем и Джунгарским районом была предложена модель «раскрытие—закрытие» для объяснения палеозойской тектонической эволюции Северного Синьяна [Huang et al., 1990; He et al., 1990, 1994; Xiao et al., 1992; Yuan et al., 1995]. Однако, как было указано выше, исследования последнего времени показывают, что фундамент Джунгарского бассейна был, скорее всего, сложен океанской корой, а не докембрийскими породами [Han et al., 1997; Hu et al., 2000; Hu, Wei, 2003; Zheng et al., 2007b]. Кроме того, также нет доказательств существования такого фундамента в Китайском Алтае. Поэтому модель раскрытие—закрытие не обоснована имеющимися данными.

Модель «субдукция—аккреция» поддерживается U-Pb и Hf изотопными данными по цирконам для серии Хабахе и для многочисленных гранитных интрузий. Геохимические и изотопно-геохимические исследования установили формирование серии Хабахе в раннем палеозое в обстановке активной континентальной окраины. Большинство гранитных интрузий были образованы в период от силура до перми [Lou, 1997; Zhang et al., 2000; Windley et al., 2002; Wang et al., 2006; Briggs et al., 2007; Yuan et al., 2007a; Sun et al., 2008, 2009; Wang et al., 2010; Cai et al., 2011a]. Например, интрузии с возрастом 440—360 млн лет широко распространены и представляют наиболее сильный этап магматической активности [Sun et al., 2009; Wang et al., 2010; Cai et al., 2011a]. Интрузии каменноугольного периода (360—310 млн лет) проявляются спорадически в южной части Китайского Алтая и в основном представлены щелочными гранитами и биотитовыми гранитами [Wang et al., 1998; Tong et al., 2006; Yuan et al., 2007a]. Массивы пермского возраста (290—250 млн лет) распространены широко в центральной части и в районе разлома Эркис и проявляются как малые интрузии [Tong et al., 2007; Sun et al., 2009; Shen et al., 2011]. U-Pb данные для магматических цирконов представляют непрерывный возрастной тренд от раннего кембрия до перми, а 80 % из них имеют возраст в интервале 450—380 млн лет с максимумом на уровне около 400 млн лет (см. рис. 5, 6). Таким образом, Китайский Алтай был в основном образован в раннем [Wang et al., 2006; Yuan et al., 2007a; Long et al., 2007, 2010; Sun et al., 2008, 2009; Cai et al., 2011a], а не в позднем палеозое [He et al., 1990, 1994; Zou et al., 1988; Wang et al., 1998].

Примечательно, что тренд U-Pb возрастов цирконов имеет определенные пики, хотя он постоянен от раннего до позднего палеозоя (см. рис. 5, 6). Наиболее сильное магматическое событие имело место в девоне и должно

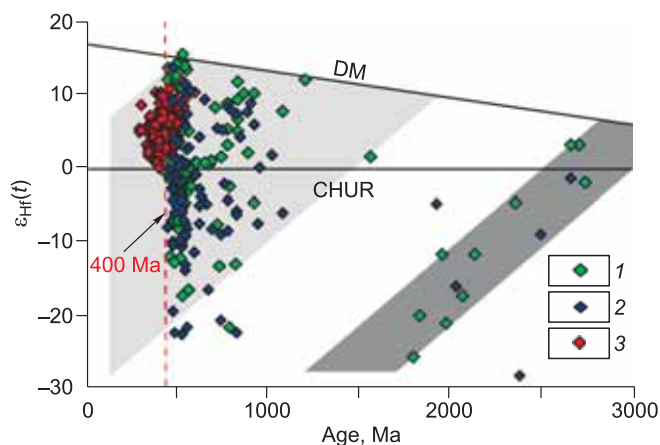


Рис. 8. Диаграмма изменений изотопного состава Hf в осадочных породах, гнейсах и гранитоидах Китайского Алтая [Long et al., 2007, 2010; Sun et al., 2008, 2009; Cai et al., 2011a].

1 — осадочные породы, 2 — гнейсы, 3 — гранитоиды.

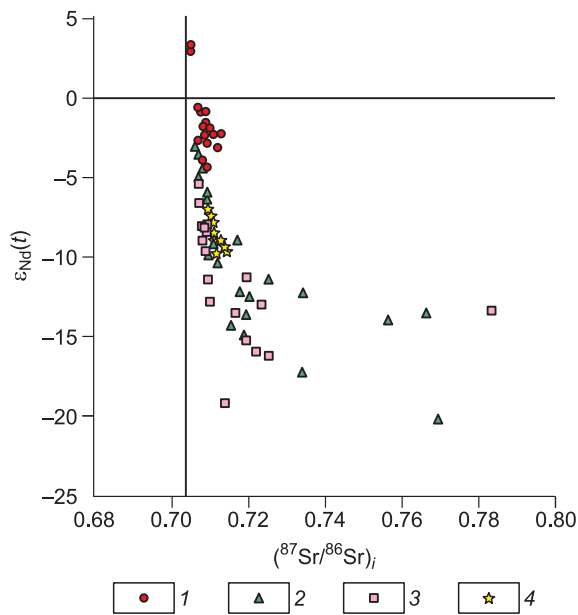


Рис. 9. Диаграмма сравнения соотношений $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ и $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ значений в гранитных интрузиях Китайского Алтая и других аккреционно-коллизийных поясов.

1 — Китайский Алтай, 2 — Канадские Кордильеры [Driver et al., 2000], 3 — Американские Кордильеры [Rämö et al., 2002], 4 — Эгейский задуговой бассейн, Греция [Alther, Sielbel, 2002].

соответствовать важному геодинамическому событию. Мы предлагаем модель субдукции срединно-океанского хребта для объяснения выдающегося магматического события и следующих одновозрастных геологических фактов.

1. Состав Hf в цирконах резко изменяется приблизительно на уровне 400 млн лет от положительных и отрицательных значений $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($-18 \dots +15$) на полностью положительные $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ ($0 \dots +16$) (рис. 8) [Sun et al., 2008, 2009; Cai et al., 2011a], что может указывать, что

незрелые материалы стали доминирующими в источнике магмы в девоне.

2. В этот временной интервал извергались высоко-Mg андезитовые, адакитовые вулканические породы, высоко-Ti и обогащенные Nb базальты, и в большом количестве внедрялись мафитовые интрузии. Геохимические исследования указывают на то, что их образование было ассоциировано с высоким геотермальным градиентом, который, скорее всего, был связан с апвеллингом горячей астеносферы [Xu et al., 2003; Zhang et al., 2003; Niu et al., 2006a,b; Cai et al., 2010; Wong et al., 2010].

3. Одновозрастной этап высокотемпературного метаморфизма низких давлений имел место в районе исследований, оценки P - T параметров указывают на пик условий — 720—800 °C и 0.5—0.7 кбар [Zhuang, 1993; Li et al., 2004; Wei et al., 2007; Zheng et al., 2007a; Wang et al., 2009b; Jiang et al., 2010].

4. По сейсмическим данным нижняя кора Китайского Алтая достигает 30 км и в основном состоит из мафитовых гранулитов и/или мафитовых гранат-гранулитов, в то время как средняя часть коры соответствует по составу диоритам. Поэтому большая часть коры имеет состав от мафитового до среднего [Wang et al., 2003]. Неоднородность земной коры Китайского Алтая, возможно, связана с обширным андерплейтингом и интраплейтингом горячих магм мантийного происхождения в девоне [Wang et al., 2003; Wang et al., 2006; Yuan et al., 2007a; Cai et al., 2010, 2011a].

В совокупности данные геологические свойства характеризуются высоким температурным градиентом и значительными вкладами мантийных материалов, возможно, в результате апвеллинга астеносферы через окно в слэбе, вызванное субдукцией хребта спрединга в девоне, что является обычным тектоническим процессом в развитии аккреционных орогенов, таких как Япония и Аляска [Maruyama, 1997; Sisson et al., 2003; Windley et al., 2007].

По сравнению с широким распространением раннепалеозойских магматических пород интрузии каменноугольного периода имеют ограниченное распространение и обычно малы по объемам [Yuan et al., 2007a]. Геохимические исследования показывают, что эти интрузии имеют различные составы, включая связанные с субдукцией граниты I -типа и посттектонические граниты A -типа [Wang et al., 1998; Tong et al., 2006; Yuan et al., 2007a], что указывает на то, что Китайский Алтай был в переходной обстановке от субдукционной к посттектонической. Многие граниты A -типа и мафические интрузии были образованы в перми, и в этот же этап были образованы крупномасштабные надвиги [Han et al., 1997; Laurent-Charvet et al., 2003; Wang et al., 2003; Tong et al., 2006, 2007; Briggs et al., 2007, 2009; Sun et al., 2009], что указывает на то, что Китайский Алтай, вероятно, находился в посттектонической обстановке.

Считается общепринятым, что Центрально-Азиатский складчатый пояс (ЦАСП) характеризуется значительным приростом континентальной коры путем присоединения незрелой коры только что извлеченной из мантии [Sengör et al., 1993; Sengör, Natal'in, 1996; Jahn et al., 2000a,b; Jahn, 2004; Windley et al., 2007]. Гранитоиды Китайского Алтая имеют резко более высокие значения $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$, чем гранитоиды активных континентальных окраин Кордильер и Анд (рис. 9). Для того чтобы лучше оценить количество незрелых компонентов в Китайском Алтае, мы предполагаем, что цирконы с положительными значениями $\epsilon_{\text{Nd}}(t)$ представляют мантийные незрелые материалы, а их количество пропорционально количеству незрелого вещества. Полная площадь Китайского Алтая приблизительно равна $3.855 \times 10^4 \text{ км}^2$, которую составляют 47 % ($1.81 \times 10^4 \text{ км}^2$) осадочных пород, 10.6 % ($0.41 \times 10^4 \text{ км}^2$) высокометаморфизованных

гнейсов и 42.4 % (1.635×10^4 км²) гранитных пород. Согласно пропорции положительных значений $\epsilon_{\text{Hf}}(t)$ для цирконов в трех типах пород, т.е. 74, 71 и 98 % соответственно [Long et al., 2007, 2010; Sun et al., 2008, 2009; Cai et al., 2011a], мы делаем вывод, что 84 % площади (3.235×10^4 км²) занято «незрелыми» палеозойскими породами.

ВЫВОДЫ

— Китайский Алтай не представляет собой докембрийский микроконтинент, а является палеозойским субдукционно-аккреционным комплексом, состоящим преимущественно из незрелых пород.

— Китайский Алтай в палеозое был, вероятно, активной континентальной окраиной.

— Китайский Алтай был в основном образован в раннем, а не в позднем палеозое, магматическая деятельность была практически непрерывной в течение палеозоя, но с различной интенсивностью.

— Тектоническая эволюция Китайского Алтая была обусловлена субдукционно-аккреционными процессами. В девоне, возможно, имела место субдукция оси спрединга, что вызвало наиболее интенсивный магматизм, изменения в изотопных системах Hf, разнообразие в магматических породах и высокотемпературный метаморфизм.

— Китайский Алтай занят «незрелыми» палеозойскими породами на 84 % площади.

Данное исследование было поддержано Национальной программой фундаментальных исследований Китая (2007CB411308), Советом по исследовательским грантам Гонконга (HKU704307P), Национальным Китайским фондом естественных наук (гранты № 40721063, 40772130, 40803009 и 40725009), Исследовательским грантом HKU CRCG (200711159058) и интеграционным Гонконг-Германским проектом.

ЛИТЕРАТУРА

Берзин Н.А., Колман Р.Г., Добрецов Н.Л., Зоненшайн Л.П., Сяо Сючань, Чанг Э.З. Геодинамическая карта западной части Палеоазиатского океана // Геология и геофизика, 1994, т. 35 (7—8), с. 8—28.

Буслов М.М. Тектоника и геодинамика Центрально-Азиатского складчатого пояса: роль позднепалеозойских крупноамплитудных сдвигов // Геология и геофизика, 2011, т. 52(1), с. 66—90.

Добрецов Н.Л., Буслов М.М. Позднекембрийско-ордовикская тектоника Центральной Азии // Геология и геофизика, 2007, т. 48(1), с. 93—108.

Alther R., Sielbel W. I-type plutonism in a continental back-arc setting: miocene granitoids and monzonites from the central Aegean Sea, Greece // Contrib. Miner. Petrol., 2002, v. 143, p. 397—415.

BGMRX (Bureau of Geology and Mineral Resources of Xinjiang Uygur Autonomous Region), Regional Geology of Xinjiang Uygur Autonomous Region. People's Republic of China, Ministry of Geology and Mineral Resources // Geological Memoirs, 1993, Series 1, № 32. Geological Publishing House, Beijing. 206 p. (in Chinese).

Briggs S.M., Yin A., Manning C.E., Chen Z.L., Wang X.F., Grove M. Late Paleozoic tectonic history of the Ertix Fault in the Chinese Altai and its implications for the development of the Central Asian Orogenic System // Geol. Soc. Amer. Bull., 2007, v. 119, p. 944—960.

Briggs S.M., Yin A., Manning C.E., Chen Z.L., Wang X.F. Tectonic development of the southern Chinese Altai Range as determined by structural geology, thermobarometry, ⁴⁰Ar/³⁹Ar thermochronology, and Th/Pb ion-microprobe monazite geochronology // Geological 645 Soc. Amer. Bull., 2009, v. 121, p. 1381—1393.

Buslov M.M., Watanabe T., Saphonova I.Yu., Iwata K., Travin A., Akiyama M.A. Vendian-Cambrian island arc system of the Siberian continent in Gorny Altay // Gondwana Res., 2002, v. 5 (4), p. 781—800.

Cai K.D., Sun M., Yaun C., Zhao G.C., Xiao W.J., Long X.P., Wu F.Y. Geochronological and geochemical study of mafic dykes from the southwest Chinese Altai: implications for petrogenesis and tectonic evolution // Gond. Res., 2010, v. 18, p. 638—652.

Cai K.D., Sun M., Yaun C., Zhao G.C., Xiao W.J., Long X.P., Wu F.Y. Prolonged magmatism, juvenile nature and tectonic evolution of the Chinese Altai, NW China: evidence from zircon U-Pb and Hf isotopic study of Paleozoic granitoids // J. Asian Earth Sci., 2011a.

Cai K.D., Sun M., Yaun C., Zhao G.C., Xiao W.J., Long X.P. Geochronology, petrogenesis and tectonic implications of peraluminous granites from the Chinese Altai, NW China // Submission to Lithos, 2011b.

Cawood P.A., Kröner A., Collins W.J., Kusky T.M., Mooney W.D., Windley B.F. Accretionary orogens through earth history // Geol. Soc. London, Special Publications, 2009, v. 318, p. 1—36.

Chai F.M., Mao J.W., Dong L.H., Yang F.Q., Liu F., Geng X.X., Zhang Z.X. Geochronology of metarhyolites from the Kangbutiebao Formation in the Kelang basin, Altay Mountains, Xinjiang: implications for the tectonic evolution and metallogeny // *Gond. Res.*, 2009, v. 16, p. 189—200.

Chen B., Jahn B.M. Geochemical and isotopic studies of the sedimentary and granitic rocks of the Altai orogen of NW China and their tectonic implications // *Geol. Mag.*, 2002, v. 139, p. 1—13.

Chen B., Jahn B.M. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd-Sr isotope and trace element evidence // *J. Asian Earth Sci.*, 2004, v. 23, p. 691—703.

Chen H.L., Yang S.F., Li Z.L., Yu X., Xiao W.J., Yuan C., Lin X.B., Li J.L. Zircon SHRIMP U-Pb chronology of Fuyun basic granulite and its tectonic significance in Altaid orogenic belt // *Acta Petrologica Sinica*, 2006, v. 22, p. 1351—1358.

Cong F., Tang H.F., Su Y.P. Geochemistry and tectonic setting of Devonian rhyolites in southern Altay, Xinjiang, northwest China // *Geotectonica et Metallogenia*, 2007, v. 31, p. 359—364 (in Chinese with English abstract).

Condie K.C. Accretionary orogens in space and time. In 4D framework of continental crust / Eds. R. D. Hatcher, Jr., M.P. Carlson, J.H. McBride, J.R. Martínez Catalán // *Geol. Soc. America, Memoir*, 2007, v. 200, p. 145—158.

Dobretsov N.L., Buslov M.M., Vernikovskiy V.A. Neoproterozoic to Early Ordovician evolution of the Paleo-Asian Ocean: implications to the break-up of Rodinia // *Gondwana Res.*, 2003, v. 6(2), p. 143—159.

Dong Y. Distribution of gold deposits related to fault structures in Altay, Xinjiang // *Volcanol. Miner. Resour.*, 2000, v. 21, p. 52—60 (in Chinese with English abstract).

Driver L.A., Creaser R.A., Chacko T., Erdmer P. Petrogenesis of the Cretaceous Cassiar batholith, Yukon-British Columbia, Canada: implications for magmatism in the North American Cordilleran interior // *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 2000, v. 112, № 685, p. 1119—1133.

GCRSX (Group for Compilation of Regional Stratigraphy of Xinjiang) Regional Stratigraphic Table of NW China: Xinjiang Uygur Autonomous Region Fascicule, 1981, p. 7—11, Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).

Han B.F., Wang S.G., Jahn B.M., Hong D.W., Kagami H., Sun Y.L. Depleted-mantle source for the Ulungur River A-type granites from North Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implications for Phanerozoic crustal growth // *Chem. Geol.*, 1997, v. 138, p. 135—159.

He G.Q., Han B.F., Yue Y.J., Wang J.H. Tectonic division and crustal evolution of Altay orogenic belt in China // *Geoscience of Xinjiang*, 1990, v. 2, p. 9—20 (in Chinese with English abstract).

He G.Q., Li M.S., Liu D.Q. Paleozoic crustal evolution and mineralization in Xinjiang, China. Xinjiang People's Publishing House, Urumqi, 1994, p. 1—437 (in Chinese).

Hu A.Q., Wei G.J. A review of ages of basement rocks from Junggar basin in Xinjiang, China—based on studies of geochronology // *Xinjiang Geol.*, 2003, v. 21 (4), p. 389—406.

Hu A.Q., Wang Z.G., Tu G.Z. Geological evolution and metallogenetic regularity in northern Xinjiang. Beijing, Science Press, 1997, p. 52—62 (in Chinese).

Hu A.Q., Jahn B.M., Zhang G., Chen Y., Zhang Q. Crustal evolution and Phanerozoic crustal growth in northern Xinjiang: Nd isotope evidence. 1. Isotopic characterization of basement rocks // *Tectonophysics*, 2000, 328, p. 15—51.

Hu A.Q., Zhang G.X., Zhang Q.F., Li T.D., Zhang J.B. A review on ages of Precambrian metamorphic rocks from Altai orogen in Xinjiang, NW China // *Chinese J. Geol.*, 2002, v. 37, p. 129—142 (in Chinese).

Hu A.Q., Wei G.J., Deng W.F., Chen L.L. SHRIMP zircon U-Pb dating and its significance for gneisses from the southern west area to Qinghe County in the Altai, China // *Acta Petrologica Sinica*, 2006, v. 22, p. 1—10 (in Chinese with English abstract).

Huang J.Q., Jiang C.F., Wang Z.X. On the opening-closing tectonics and accordion movement of plate in Xinjiang and adjacent regions // *Xinjiang Geol.*, 1990, v. 1, p. 3—16 (in Chinese).

Jahn B.M. The Central Asian Orogenic Belt and growth of the continental crust in the Phanerozoic / Eds. J. Malpas, C.J.N. Fletcher, J.R. Ali, J.C. Aitchison. Aspects of the Tectonic Evolution of China, 2004, v. 226. Special Publications, London, p. 73—100.

Jahn B.M., Wu F.Y., Chen B. Massive granitoid generation in Central Asia: Nd isotope evidence and implication for continental growth in the Phanerozoic // *Episodes*, 2000a, v. 23, p. 82—92.

Jahn B.M., Wu F., Chen B. Granitoids of the Central Asian orogenic belt and continental growth in the Phanerozoic // *Transaction of Royal Society of Edinburgh Earth 716*, 2000b, Science 91, p. 181—193.

Jiang Y.D., Sun M., Zhao G.C., Yuan C., Xiao W.J., Xia X.P., Long X.P., Wu F.Y. The ~ 390 Ma high-*T* metamorphism in the Chinese Altai: consequence of ridge-subduction? // *Amer. J. Sci.*, 2010.

Kemp A.I.S., Hawkesworth C.J., Paterson B.A., Kinny P.D. Episodic growth of the Gondwana supercontinent from hafnium and oxygen isotopes in zircon // *Nature*, 2006, v. 439, p. 580—583.

Ketchum J.M.F., Jackson S.E., Culshaw N.G., Barr S.M. Depositional and tectonic setting of the Paleoproterozoic Lower Aillik Group, Makkovik Province, Canada: evolution of a 32 passive margin-foredeep sequence based on petrochemistry and U-Pb (TIMS and LA-ICPMS) geochronology // *Precam. Res.*, 2001, v. 105, p. 331—356.

Kovalenko V.I., Yarmolyuk V.V., Kovach V.P., Kotov A.B., Kozakov I.K., Sal'nikova E.B., Larin A.M. Isotope provinces, mechanisms of generation and sources of the continental crust in the Central Asian Mobile Belt: geological and isotopic evidence // *J. Asian Earth Sci.*, 2004, v. 23 (5), p. 605—627.

Kröner A., Windley B.F., Badarch G., Tomutogoo O., Hegner E., Jahn B.M., Gruschke S., Khain E.V., Wingate M.T. Accretionary growth and crust-formation in the Central Asian Orogenic Belt and comparison with the Arabian-Nubian shield // *Geol. Soc. Amer.*, 2008, Memoir 200, p. 181—209.

Laurent-Charvet S., Charvet J., Monie P., Shu L.S. Late Paleozoic strike-slip shear zones in eastern central Asia (NW China): new structural and geochronological data // *Tectonics*, 2003, v. 22, № 2, p. 1009, doi: 10.1029/2001TC901047.

Li H.J., He G.Q., Wu T.R., Wu B. Confirmation of Altai-Mongolia microcontinent and its implications // *Acta Petrologica Sinica*, 2006, v. 22, p. 1369—1379 (in Chinese).

Li T.D., Qi Z.M., Xiao S.L., Wu B.Q. New improvement of comparative study of geology and mineralization of Altai between China and Kazakhstan // Chinese Geological Society. Thesis Volume of the Symposium of the 8th Five Year Plan of Geoscience for Contribution to 30th IGC. Metallurgical Industrial Publishing House, Beijing, 1996, p. 256—259 (in Chinese).

Li T.D., Poliyangsiji B.H. Tectonics and crustal evolution of Altai in China and Kazakhstan // *Xinjiang Geol.*, 2001, v. 19, p. 27—32 (in Chinese).

Li Z.L., Chen H.L., Santosh M., Yang S.F. Discovery of ultrahigh-*T* spinel-garnet granulite with pure CO₂ fluid inclusions from the Altay orogenic belt, NW China // *J. Zhejiang*, 2004, University-Science, v. 5 (10), p. 1180—1182.

Liu W. Petrogenetic epochs and peculiarities of genetic types of granitoids in the Altai Mts., Xinjiang Uygur Autonomous Region, China // *Geotectonica Metallogenia*, 1990, v. 14, p. 43—56 (in Chinese).

Liu W. Whole rock isochron ages of plutons, crustal movements and evolution of tectonic setting in the Altai Mts., Xinjiang Uygur Autonomous Region // *Geol. Sci. Xinjiang*, 1993, № 4, Beijing, Geological Press, p. 35—50 (in Chinese with English abstract).

Liu W., Liu C.Q., Masuda A. Complex trace-element effects of mixing-fractional crystallization composite processes: applications to the Alaer granite pluton, Altay Mountains, Xinjiang, northwestern China // *Chem. Geol.*, 1997, v. 135, p. 103—124.

Liu W., Liu L.J., Liu X.J., Shang H.J., Zhou G. Age of the Early Devonian Kangbutiebao Formation along the southern Altay Mountains and its northeastern extension // *Acta Petrol. Sinica*, 2010, v. 26 (2), p. 387—400.

Long X.P., Sun M., Yuan C., Xiao W.J., Lin S.F., Wu F.Y., Xia X.P., Cai K.D. U-Pb and Hf isotopic study of zircons from metasedimentary rocks in the Chinese Altai: implications for Early Paleozoic tectonic evolution // *Tectonics*, 2007, doi: 10.1029/2007TC002128.

Long X.P., Sun M., Yuan C., Xiao W.J., Cai K.D. Early Paleozoic sedimentary record of the Chinese Altai: Implications for its tectonic evolution // *Sedim. Geol.*, 2008, v. 208, p. 88—100.

Long X.P., Yuan C., Sun M., Xiao W.J., Zhao G.C., Wang Y.J., Cai K.D. Detrital zircon ages and Hf isotopes of the early Paleozoic Flysch sequence in the Chinese Altai, NW China: new constraints on depositional age, provenance and tectonic evolution // *Tectonophysics*, 2010, v. 480, p. 213—231.

Lou F.S. Characteristics of Late Caledonian granites in the Nuerte area, Altay // *Jiangxi Geol.*, 1997, v. 11, p. 60—66 (in Chinese with English abstract).

Maruyama S. Pacific-type orogeny revisited: miyashiro-type orogeny proposed // *Island Arc*, 1997, v. 6, p. 91—120.

Niu H.C., Sato H., Zhang H.X., Ito J., Nagao T., Yu X.Y., Terada K., Zhang Q. Juxtaposition of adakite, boninite, high-TiO₂ and low-TiO₂ basalts in the Devonian southern Altay Xinjiang NW China // *J. Asian Earth Sci.*, 2006a, v. 28, p. 439—456.

- Niu H.C., Yu X.Y., Xu J.F.** Late Paleozoic volcanism and associated metallogensis in the Altay area, Xinjiang, China // Geol. publishing house, Beijing, 2006b.
- Peng C.W.** Discovery and geological significance of micropaleoflora for the Habahe Group in Bahaba district of Xinjiang // Xinjiang Geol., 1989, v. 7, p. 19—22.
- Qu G.S., Zhang J.J.** Irtysh structural zone // Geoscience Xinjiang, 1991, v. 3, p. 115—131 (in Chinese).
- Rämö O.T., Calzia J.P., Kosunen P.J.** Geochemistry of Mesozoic plutons, southern Death Valley region, California: insights into the origin of Cordilleran interior magmatism // Contrib. Miner. Petrol., 2002, v. 143, p. 416—437.
- Rui Z., Goldbarb R., Qiu Y., Zhou T., Chen R., Pirajno F.** Paleozoic-Early Mesozoic gold deposits of the Xinjiang Autonomous Region, northwestern China // Miner. Deposit., 2002, v. 37, p. 393—418.
- Sengör A.M.C., Natal'in B.A.** Paleotectonics of Asia: fragments of a synthesis / Eds. A. Yin, M. Harrison // The tectonic evolution of Asia. Cambridge University Press, 1996, p. 486—640.
- Sengör A.M.C., Natal'in B.A., Burtman V.S.** Evolution of the Altaid tectonic collage and Paleozoic crustal growth in Asia // Nature, 1993, v. 364, p. 299—307.
- Shan Q., Niu H.C., Yu X.Y., Zhang H.X.** Geochemistry and zircon U-Pb age of volcanic rocks from the Hanasi basin in the northern Xinjiang and their tectonic significance // Geochimica, 2005, v. 34, p. 315—327 (in Chinese with English abstract).
- Shen X.M., Zhang H.X., Wang Q., Wyman D.A., Yang Y.H.** Late Devonian—Early Permian *A*-type granites in the southern Altay Range, Northwest China: petrogenesis and implications for tectonic setting of «*A2*-type» granites // J. Asian Earth Sci., 2011, v. 42, № 5, p. 986—1007.
- Sisson V.B., Pavlis T.L., Roeske S.M., Thorkelson D.J.** Introduction: an overview of ridge-trench interaction in modern and ancient settings / Eds. V.B. Sisson, S.M. Roeske, T.L. Pavlis // Geology of a transpressional orogen developed during ridge-trench interaction along the north Pacific margin. Geological Society of America, special paper, 2003, v. 371, p. 1—18.
- Sun M., Yuan C., Xiao W., Long X., Xia X., Zhao G., Lin S., Wu F., Kröner A.** Zircon U-Pb and Hf isotopic study of gneissic rocks from the Chinese Altai: progressive accretionary history in the early to middle Paleozoic // Chem. Geol., 2008, v. 247, p. 352—383.
- Sun M., Long X.P., Cai K.D., Jiang Y.D., Wang B.Y., Yuan C., Zhao G.C., Xiao W.J., Wu F.Y.** Early Paleozoic ridge subduction in the Chinese Altai: insight from the marked change in Zircon Hf isotopic composition // Science in China, 2009, Series D, v. 52, p. 1345—1358.
- Tong Y., Wang T., Hong D.W., Dai Y.J.** TIMS U-Pb zircon ages of Fuyun post-orogenic linear granite plutons on the southern margin of Altay orogenic belt and their implications // Acta Petrologica et Mineralogica, 2006, v. 29 (6), p. 619—641 (in Chinese with English abstract).
- Tong Y., Wang T., Hong D.W., Dai Y.J., Han B.F., Liu X.M.** Ages and origin of the early Devonian granites from the north part of Chinese Altai Mountains and its tectonic implications // Acta Petrologica Sinica, 2007, v. 23, p. 1933—1944.
- Wang G.Y.** The discovery of Sinian strata in Xinjiang Altay and its significance // Regional Geology of China, 1983, v. 10, p. 117—119.
- Wang T., Zheng Y.D., Li T.B., Gao Y.J.** Mesozoic granitic magmatism in extensional tectonics near the Mongolian border in China and its implications for crustal growth // J. Asian Earth Sci., 2004, v. 23 (5), p. 715—729.
- Wang T., Hong D.W., Jahn B.M., Tong Y., Wang Y.B., Han B.F., Wang X.X.** Timing, petrogenesis, and setting of Palaeozoic synorogenic intrusions from the Altai Mountains, Northwest China: implications for the tectonic evolution of an accretionary orogen // J. Geol., 2006, v. 114, p. 735—751.
- Wang T., Jahn B.M., Kovach V.P., Tong Y., Hong D.W., Han B.F.** Nd-Sr isotopic mapping of the Chinese Altai and implications for continental growth in the Central Asian Orogenic Belt // Lithos, 2009a, v. 110, p. 359—372.
- Wang W., Wei C.J., Wang T., Lou Y.X., Chu H.** Confirmation of pelitic granulite in the Altai orogen and its geological significance // Chinese Sci. Bull., 2009b, v. 54, p. 918—923.
- Wang T., Tong Y., Li S., Zhang J.J., Shi X.J., Li J.Y., Han B.F., Hong D.W.** Spatial and temporal variations of granitoids for tectonic setting and crustal growth: perspectives from Chinese Altai // Acta Petrol. Miner., 2010, v. 29, p. 595—618.
- Wang Y.J., Yuan C., Long X.P., Sun M., Xiao W.J., Zhao G.C., Cai K.D., Jiang Y.D.** Geochemistry, zircon U-Pb ages and Hf isotopes of the Paleozoic volcanic rocks in the northwestern Chinese Altai: petrogenesis and tectonic implications // J. Asian Earth Sci., 2011.

Wang Y.X., Mooney W.D., Yuan X.C., Coleman R.G. The crustal structure from the Altai Mountains to the Altyn Tagh fault, northwest China // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, p. 2322. doi: 10.1029/2001JB000552.

Wang Z.G., Zhao Z.H., Zou T.R. Geochemistry of the granitoids in Altay. Science Press, Beijing, 1998, 152 p. (in Chinese with English abstract).

Wei C.J., Clarke G., Tian W., Qiu L. Transition of metamorphic series from the Kyanite- to andalusite-types in the Altai orogen, Xinjiang, China: evidence from petrography and calculated KFMASH and KFMASH phase relations // *Lithos*, 2007, v. 96 (34), p. 353—374.

Windley B.F., Kröner A., Guo J., Qu G., Li Y., Zhang C. Neoproterozoic to Palaeozoic geology of the Altai orogen, NW China: new zircon age data and tectonic evolution // *J. Geol.*, 2002, v. 110, p. 719—739.

Windley B.F., Alexeiev D., Xiao W., Kroner A., Badarch G. Tectonic models for accretion of the Central Asian Orogenic Belt // *J. Geol. Soc. London*, 2007, v. 164, p. 31—47.

Wong P.W., Sun M., Zhao G.C., Yuan C., Xiao W.J. Geochemical and geochronological studies of the Alegeyayi Ophiolitic Complex and its implication for the evolution of the Chinese Altai // *Gond. Res.*, 2010, v. 18, p. 438—453.

Xiao W.J., Windley B.F., Hao J., Zhai M.G. Accretion leading to collision and the Permian Solonker suture, Inner Mongolia, China: termination of the central Asian orogenic belt // *Tectonics*, 2003, v. 22, p. 1069. doi:10.1029/2002TC001484.

Xiao W.J., Windley B.F., Badarch G., Sun S., Li J., Qin K., Wang Z. Palaeozoic accretionary and convergent tectonics of the southern Altaids: implications for the growth of central Asia // *J. Geol. Soc. London*, 2004, v. 161, p. 1—4.

Xiao W.J., Han C.M., Yuan C., Sun M., Lin S.F., Chen H.L., Li Z.L., Li J.L., Sun S. Middle Cambrian to Permian subduction-related accretionary orogenesis of North Xinjiang, NW China: implications for the tectonic evolution of Central Asia // *J. Asian Earth*, 2008, v. 32, p. 102—117.

Xiao W.J., Windley B.F., Yuan C., Sun M., Han C.M., Lin S.F., Chen H.L., Yan Q.R., Liu D.Y., Qin K.Z., Li J.L., Sun S. Paleozoic multiple subduction-accretion processes of the southern Altaids // *Amer. J. Sci.*, 2009, v. 309, p. 221—270. doi:10.2475/03.2009.02.

Xiao W.J., Huang B.C., Han C.M., Sun S., Li J.L. A review of the western part of the Altaids: a key to understanding the architecture of accretionary orogens // *Gond. Res.*, 2010, v. 18, p. 253—273.

Xiao X.C., Tang Y.Q., Feng Y.M., Zhu B.Q., Li J.Y., Zhao M. Tectonic evolution of the northern Xinjiang and its adjacent region. Beijing, Geological Publishing House, 1992, 180 p. (in Chinese with English abstract).

Xu J.F., Castillo P.R., Chen F.R., Niu H.C., Yu X.Y., Zhen Z.P. Geochemistry of late Paleozoic mafic igneous rocks from the Kuerti area, Xinjiang, northwest China: implications for backarc mantle evolution // *Chem. Geol.*, 2003, v. 193, p. 137—154.

Yu X.Y., Mei H.J., Yang X.C., Wang J.D. Irtysh volcanic rocks and tectonic evolution / Ed. G.Z. Tu // *Progress of solid-earth sciences in Northern Xinjiang, China*. Science Press, Beijing, 1993, p. 185—198 (in Chinese with English Abstract).

Yuan C., Sun M., Xiao W.J., Li X.H., Chen H.L., Lin S.F., Xia X.P., Long X.P. Accretionary orogenesis of the Chinese Altai: insights from Paleozoic granitoids // *Chem. Geol.*, 2007a, v. 242, p. 22—39.

Yuan C., Sun M., Long X.P., Xia X.P., Xiao W.J., Li X.H., Lin S.F., Cai K.D. Constraining the depositional time and tectonic background of the Habahe Group of the Altai // *Acta Petrol. Sinica*, 2007b, v. 23 (7), p. 1635—1644.

Yuan X.C. Remark on structure of China continental basement // *Acta Geophysica Sinica*, 1995, v. 38, p. 448—459 (in Chinese with English abstract).

Zhang C.G., Wei C.J., Qiu L. Evolution of metamorphism and its geologic significance in Altaides, Xinjiang // *Xinjiang Geology*, 2004, v. 22, p. 16—23.

Zhang H.X., Niu H.C., Terada K., Yu X.Y., Sato H., Ito J. Zircon SHRIMP U-Pb dating on plagiogranite from Kuerti ophiolite in Altay, north Xinjiang // *Chinese Sci. Bull.*, 2003, v. 48, p. 2231—2235.

Zhang J.H., Wang J.B., Ding R.F. Characteristics and U-Pb ages of zircon in metavolcanics from the Kangbutiebao Formation in the Altay region, Xinjiang // *Reg. Geol. China*, 2000, v. 19, p. 281—287 (in Chinese with English abstract).

Zhang X., Sui J., Li Z., Liu W., Yang X., Liu S. Evolution of the Erqis structural belt and mineralization. Beijing, Science Press, 1996, 205 p.

Zhao Z.H., Wang Z.G., Zou T.R., Masuda A. The REE, isotopic composition of O, ⁹⁰⁵38 Pb, Sr and Nd and petrogenesis of granitoids in the Altai region // *Progress of solid-earth sciences in northern Xinjiang, China*. Beijing, Science Press, 1993, p. 239—266 (in Chinese with English abstract).

Zheng C.Q., Takenori K., Masaki E., Cuechun X. CHIME monazite ages of metasediments from the Altai orogen in northwestern China: Devonian and Permian ages of metamorphism and their significance // *Island Arc*, 2007a, v. 16, p. 598—604.

Zheng J.P., Sun M., Zhao G.C., Robinson P.T., Wang F.Z. Elemental and Sr-Nd-Pb isotopic geochemistry of Late Paleozoic volcanic rocks beneath the Junggar basin, NW China: implications for the formation and evolution of the basin basement // *J. Asian Earth Sci.*, 2007b, v. 29, p. 778—794.

Zhuang Y. Tectonothermal evolution in space and time and orogenic process of Altaide, China. Jilin scientific and technical press Changchun, China. 1993, p. 402 (in Chinese with English abstract).

Zhou Y.Q. Discussion on the basement property of Juggar BASIN // *Xinjiang Geosci.*, 1994, v. 5, p. 19—27.

Zou T.R., Cao H.Z., Wu B.Q. Orogenic and anorogenic granitoids of Altay Mountains of Xinjiang and their discrimination criteria // *Acta Geol. Sinica*, 1988, v. 2, p. 45—64.

*Поступила в редакцию
30 мая 2011 г.*