

## Магматизм, метаморфизм, петрография

УДК 550.40;552.3(571.5)

С.В. Ефремов

### АДАКИТОВЫЙ ГРАНИТОИДНЫЙ МАГМАТИЗМ ВОСТОЧНОГО САЯНА, ГЕНЕТИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ И ИСТОЧНИКИ ВЕЩЕСТВА

*Рассмотрены средние и умеренно кислые разновидности известково-щелочных гранитоидов Гарганского и Мунку-Сардыкского массивов (Восточный Саян). Дана их геохимическая характеристика, предложены модели их формирования. Сделан вывод, что адакиты вряд ли являются продуктом плавления рифей-палеозойского слэба и, скорее всего, связаны с более древним источником. Возраст этого источника по  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  отношениям оценивается цифрами порядка 2500 млн. лет, что противоречит современным геодинамическим построениям, однако хорошо согласуется с классическими представлениями о геологическом строении региона.*

Адакитами называются средние и умеренно кислые разновидности известково-щелочных магматических пород, имеющие своеобразную геохимическую характеристику. Впервые они были выделены в 1978 г. Кэем [1], проводившим исследования на острове Адак (Алеутские острова).

Адакиты заслуживают детального изучения, поскольку с ними связаны промышленные месторождения Au, Cu, Mo и других халькофильных элементов, в том числе меднопорфиrowого типа [6,7,8,9,10]. Особое значение проблема адакитов имеет для анализа рудоносности Восточного Саяна.

Основополагающие сведения по этому типу пород, включающие классификационные признаки и генетические представления, даны в работах Дефанта [2,3], Х. Мартина [4,5]. От близких по кремнекислотности известково-щелочных пород адакиты могут быть отделены только на основе прецизионных геохимических данных, что значительно затрудняет их выделение.

Важной особенностью адакитов является их четкая связь с конкретными геодинамическими процессами. Среди современных магматических пород они встречаются только в пределах островных дуг и

активных континентальных окраин [4].

Генетические представления об образовании пород этого типа довольно выдержаны. Существует три наиболее вероятных механизма образования адакитовых расплавов:

- плавление субдуцировавшей океанической литосферы [1,3,4];
- плавление метабазальтов в подошве мощной континентальной коры [10,11];
- плавление пород мантийного клина, метасоматизированных адакитовым расплавом [12,13,5,14].

Объединяет эти модели то, что первичные адакитовые магмы (1 и 2 модели) и метасоматизирующий агент (3 модель) образуются за счет плавления пород основного состава, в условиях стабильности эклогитовых парагенезисов.

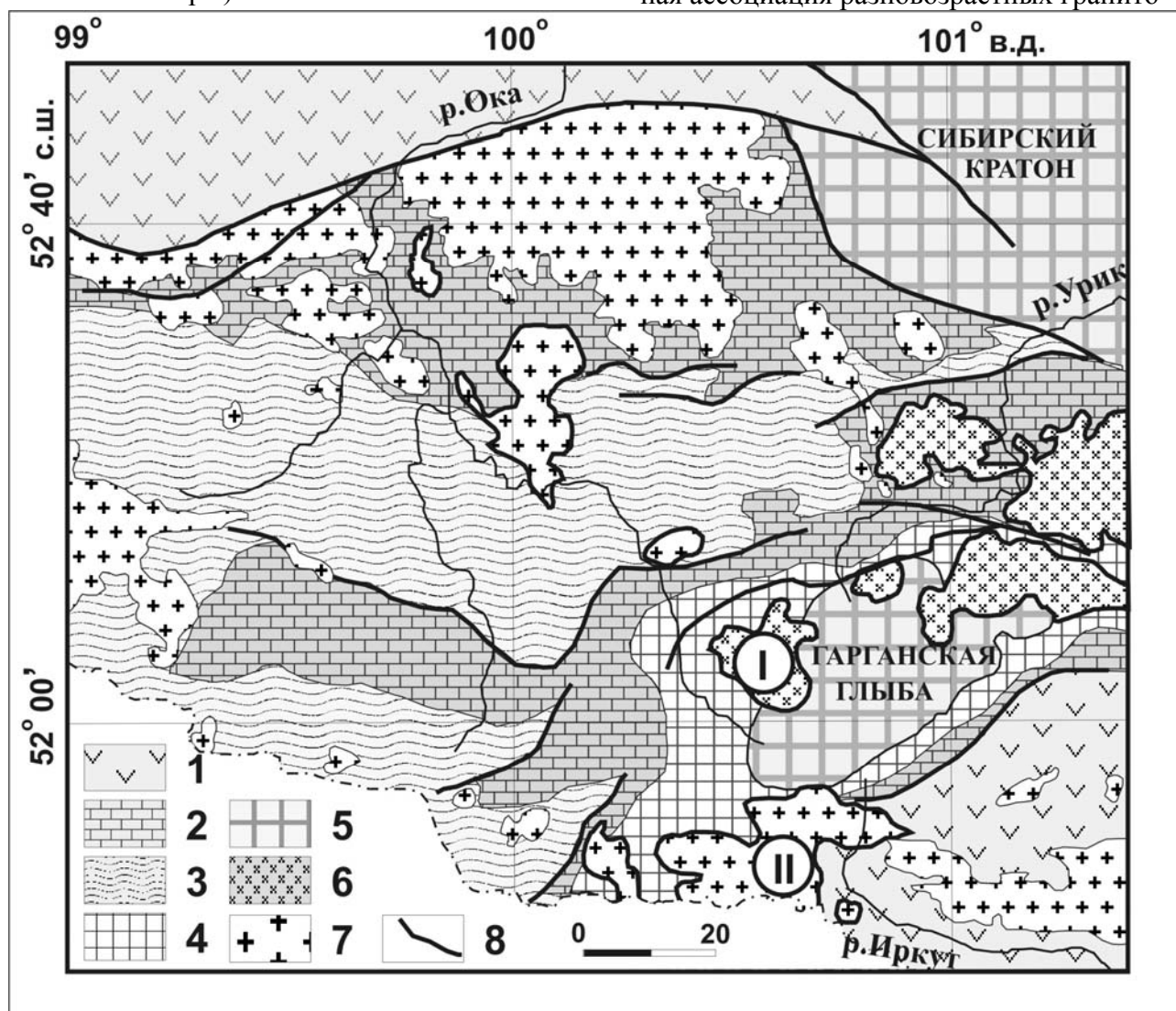
Сочетание условий, необходимых для образования адакитов, встречается довольно редко, что приводит к их незначительной распространенности, в сравнении с другими известково-щелочными гранитоидами, а появление разноуровневого (разновозрастного) адакитового магматизма считается уникальным. Одним из таких уникальных районов является Восточный Саян, где адакиты встречаются среди вендских (сумсунурский комплекс) и раннепалеозойских (сархойский комплекс)

гранитоидов. При этом слабая геохимическая изученность и недостаток изотопных геохронологических данных не позволяют оценить распространенность гранитоидов с адакитовыми вещественными характеристиками. Имеющиеся в нашем распоряжении данные показывают, что они распространены достаточно широко (рис.1). При этом часть гранитоидов можно отнести к «классическим» адакитам, а некоторые из них – к адакитовым гранитам (контaminaция адакитовых магм веществом континентальной коры).

Для объяснения унаследованности геохимических характеристик во времени существует два концептуальных подхода:

- концепция единого геохимического резервуара, генерировавшего адакитовые магмы в периоды мощных тектонических перестроек;
- концепция связи адакитового магматизма с разновозрастными геодинамическими событиями.

Первая концепция кажется наиболее привлекательной, так как пространственная ассоциация разновозрастных гранито-



**Рис.1. Схематическая геологическая карта по [15], с дополнениями автора:**

1 - раннепалеозойские складчатые образования; 2 - отложения платформенного чехла Тувино-Монгольского микроконтинента (V-Є); 3 - верхнерифейские комплексы, нерасчлененные; 4 - платформенный чехол Гарганской глыбы (> 800 млн. лет); 5 - фундамент Гарганской глыбы (AR-PR<sub>1</sub>); 6 - гранитоиды сумсунурского комплекса (R<sub>3</sub>); 7 - гранитоиды сархойского комплекса (O<sub>1</sub>-O<sub>2</sub>); 8 - разломы.

Жирным контуром обведены массивы адакитов и адакитовых гранитов. I - Гарганский массив, II - Мунку-Сардыкский массив. Штрих-пунктирной линией дана граница с Монголией

идов с близкой геохимической спецификой вряд ли является случайной, а с учетом их приуроченности к архейским серогнейсовым толщам, геохимическим аналогам адацитов, кажется вполне обоснованной. Однако эта концепция требует распространения «единого источника» на всю территорию северной части Тувино-Монгольского микроконтинента, что противоречит современным геодинамическим построениям, согласно которым этот регион рассматривается как коллаж разновозрастных террейнов, имеющих разную генетическую природу [15 и др. ссылки в этой работе].

Концепция связи адацитового магматизма с разновозрастными тектоническими событиями также плохо согласуется с современными геодинамическими построениями. Если образование вендских адацитов можно связать с заложением новой зоны субдукции, возникшей после коллизии Гарганского блока и Дунжугурской островной дуги [15], то образование раннепалеозойских адацитов не поддается логичному объяснению. Учитывая современные геодинамические построения, мы должны связать образование этих гранитоидов с процессом коллизии Тувино-Монгольского микроконтинента с Сибирским кратоном. Однако «коллизионные» адакиты в мире неизвестны, единственный пример, описанный в литературе, связан с плавлением оторванного слэба сразу после коллизионного события [16]. Теоретически, образование адацитов в коллизионных зонах возможно по всем трем (см. выше) генетическим моделям, однако этот вопрос требует специального рассмотрения. Существует несколько возможных вариантов. Наиболее вероятными являются:

- плавление слэба в раннепалеозойской зоне субдукции;
- ремобилизация серогнейсового основания при коллизионном событии;
- ремобилизация литосферного источника, образовавшегося на одном из предыдущих этапов геологического развития региона (захороненный слэб, метасоматизи-

рованная адакитовыми расплавами литосферная мантия).

В контексте вышеизложенного материала ключевое значение приобретают данные об источниках вещества для вендских и раннепалеозойских адацитов. Обладая информацией по составу, местоположению и возрасту этих источников, мы можем решить большинство из вышеизложенных проблем. Эти данные можно получить на основе современных генетических моделей с использованием изотопных и геохимических характеристик разновозрастных адацитов. В этой статье мы попытаемся получить необходимую нам информацию на основе анализа геохимических и изотопных данных по вендским и раннепалеозойским адакитам.

В качестве эталонных объектов нами выбраны гранитоиды Гарганского (венд, сумсунурский комплекс) и Мунку-Сардыкского (ранний палеозой, сархойский комплекс) массивов. Выбор объектов обусловлен их наибольшей изученностью и геологическим положением. Они оба приурочены к флангам Гарганской глыбы, на расстоянии один от другого, не превышающем 20 км (см. рис.1), залегают в пределах единых стратиграфических подразделений, что уравнивает влияние состава континентальной коры на вещественные характеристики гранитоидов.

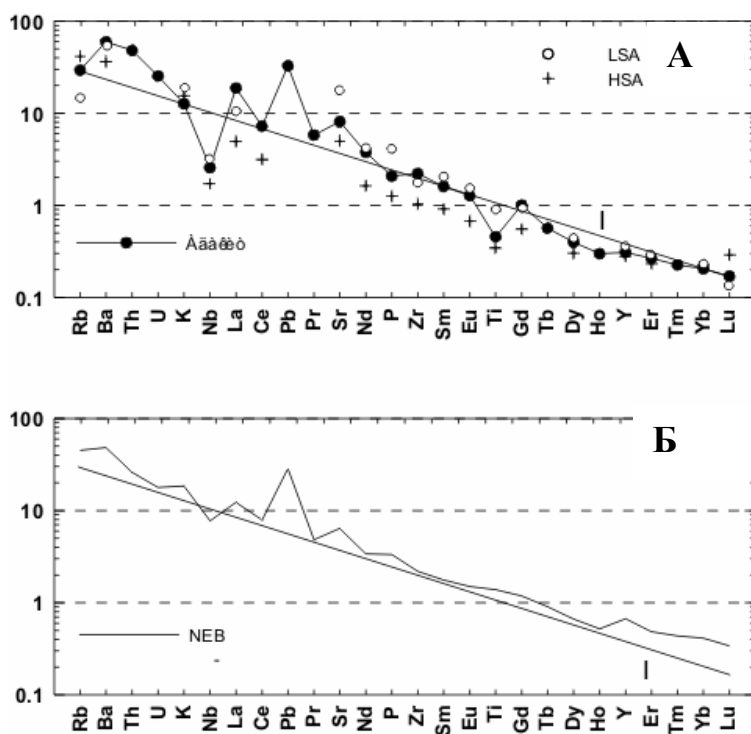
*Массив Мунку-Сардык* имеет изотопный возраст 478 млн. лет [17]. Он сложен генетически единой ассоциацией горных пород NEB (высокониобиевые базиты) – адакиты [18]. Ассоциация адацитов плутона с базитами NEB является наиболее важной генетической предпосылкой. Так как базиты NEB образуются при плавлении литосферного мантийного источника, контаминированного адакитовыми магмами [19, 20], можно уверенно заключить, что магмы, сформировавшие плутон, прошли через мантийный клин и не могут быть продуктом плавления пород нижней континентальной коры. Однако в связи с этим, возникает вопрос, являются ли адакиты первичным продуктом плавления слэба, либо они образовались за счет незначи-

тельной степени плавления специализированного мантийного источника [5].

В качестве ответа на этот вопрос выполним генетические реконструкции с использованием геохимических и изотопных данных по гранитоидам плутона. Для иллюстрации генетических построений расположим на диаграмме химические элементы в порядке убывания их несовместимости и пронормируем по составу N-MORB [23], являющемуся оценкой состава базальтов океанического дна, источника адакитовых магм (рис. 2,А). В идеальных условиях, при плавлении базальта, точки концентрации элемента в образующемся расплаве должны лежать на одной прямой, наклон которой пропорционален степени плавления. Отклонения от этой закономерности обычно обусловлены неомогенностью источника, характером перитектических и реститовых фаз. При анализе диаграммы можно выделить три ассоциации элементов. Наиболее интересна ассоциация, объединяющая элементы, лежащие на прямой линии I, распределение которых может быть объяснено с позиций небольшой степени равновесного плавления базитового источника, что позволяет нам формально рассматривать адакиты массива

Мунку-Сардык в качестве продукта плавления океанической литосферы. Однако, в отличие от «классических» слэбовых магм (HSA, высококремнистые адакиты), они обладают большей основностью и более высокими концентрациями LRE и MRE элементов, что сближает их с низкокремнистыми адакитами (LSA, плавление метасоматизированных пород мантийного клина). Это позволяет нам предполагать, что адакиты массива Мунку-Сардык могут быть продуктом плавления метасоматизированного литосферного мантийного источника.

Чтобы проверить это предположение, рассмотрим распределение редких элементов в базитах NEB, также являющихся продуктом прямого плавления специализированного мантийного источника. Мы видим, что наиболее «примитивный» состав базита фактически повторяет линию I, взятую с диаграммы рис. 2,Б, подчеркивающую «базовые» геохимические особенности адакита. Это свидетельствует о том, что базиты NEB и адакиты генетически связаны, а состав адакита наиболее близок к составу метасоматирующего агента (адакитового расплава), преобразовавшего литосферный источник базитовых



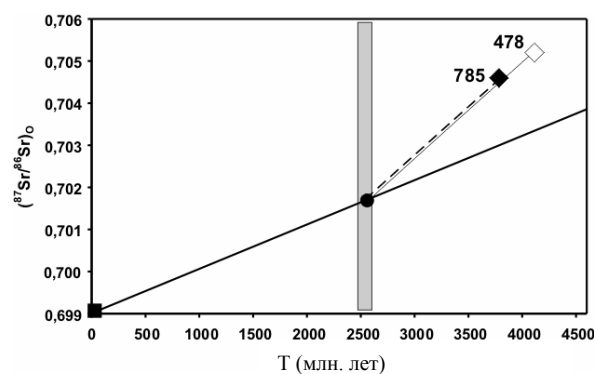
**Рис.2. Геохимические особенности гранитоидов массива Мунку-Сардык:**  
 А – адакиты; Б - базиты NEB.  
 Незалитыми кружками даны содержания элементов по [5] в низкокремнистых (LSA), а крестами – в высококремнистых (HSA) адакитах

магм. При этом адакиты и базиты NEB могут рассматриваться как продукты разной степени плавления единого литосферного источника. Этот вывод хорошо иллюстрируется рис. 2,Б, где видны синхронное снижение концентраций LIL и рост содержаний HRE элементов, при переходе от адакита к «примитивному» и наиболее эволюционированному составам базитов NEB, что обусловлено изменением пропорций между метасоматизирующим компонентом и неизменным литосферным мантийным источником (деплитированная мантия).

Если адакиты плутона являются продуктом плавления слэба, то они должны иметь первичные отношения изотопов Sr, близкие к таковому одновозрастных базальтов океанического дна. Для всех гранитоидов плутона характерно первичное отношение Sr равное 0,7055 [21]. Однако первичное отношение Sr в базальтах, рассчитанное по одностадийной модели эволюции мантии для возраста 478 млн. лет, составило 0,7029, что значительно ниже значения полученного для адакитов. Повидимому, адакиты плутона вряд ли являлись продуктом прямого плавления раннепалеозойского слэба и, скорее всего, были связаны с более радиогенным источником. Таким источником могли быть породы нижней континентальной коры, древний захороненный слэб, либо породы литосферной мантии, метасоматизированные на одном из предыдущих этапов геологического развития региона. Согласно геохимическим данным, приведенным выше, наиболее вероятным источником раннепалеозойских адакитов были метасоматически преобразованные породы мантийной части континентальной литосферы.

С этих позиций важное значение приобретает возраст метасоматических преобразований, так как отражает возраст источника адакитовых магм. Его оценку можно рассчитать на основании величин  $T$ ,  $(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$  и  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  отношений в адакитах. Обусловлено это тем, что величина первичного Sr отношения в источнике ба-

зитов NEB и адакитов, в основном, определяется величинами первичного Sr и Rb/Sr отношений в метасоматизирующем агенте (первичном слэбовом расплаве, оценкой состава которого являются адакиты массива), а также временем, прошедшим от метасоматических преобразований до магмогенерации. Этот временной промежуток можно определить при совместном решении Rb-Sr изохронных уравнений одностадийной эволюции мантии, являвшейся источником базальтов океанического дна и эволюции слэбового расплава (метасоматизирующего агента). Учитывая, что в [21] не приведены изотопные данные для гранитоидов второй фазы, являющихся классическими адакитами, мы рассчитали величину  $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$  на основании среднего Rb/Sr отношения и распространенности изотопов Sr и Rb ( $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0,16$ ). Рассчитанная по этой методике оценка возраста метасоматических преобразований составляет 2550 млн. лет (рис. 3), что значительно древнее всех геодинамических процессов, рассматриваемых современными авторами [15 и ссылки в этой работе].



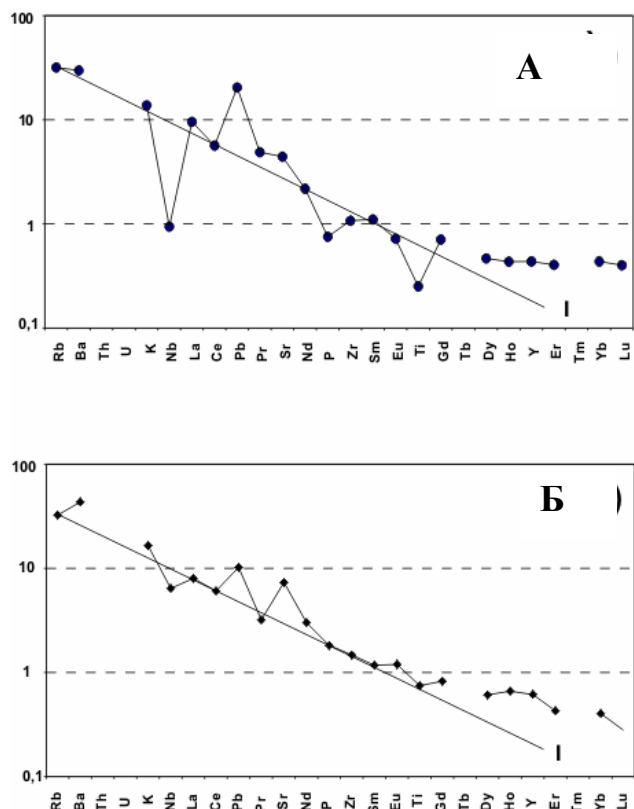
**Рис.3. Возраст источника адакитовых магм.**

Жирной сплошной линией дана эволюция первичного радиогенного Sr в мантии Земли (одностадийная модель). Пунктирная и сплошная тонкие линии показывают накопление радиогенного Sr в течение времени. Залитый квадрат - BABY (0,699) – состояние источника на 785 млн. лет, незалитый – на 478 млн. лет. Серое поле – вариации возраста источника, определены с помощью Nd изотопной систематики [15]

*Гарганский массив* имеет изотопный возраст 785 млн. лет [15]. Он также как гранитоиды Мунку-Сардыкского массива сложен ассоциацией пород NEB – адакиты. Базиты NEB в пределах массива были обнаружены впервые автором этой статьи. Выделяется две фациальных разновидности. Первая представлена массивными интрузивными породами, слагающими раннюю фазу плутона. Выделить ее можно только на основе геохимических данных, ввиду широкого распространения в гранитоидах крупных ксенолитов из Дунжугурского офиолитового покрова. Вторая разновидность слагает послегранитные дайки и тесно ассоциирует с субвулканическими образованиями холбинского комплекса. Анализ литературных данных также подтвердил существование этого типа пород. В [22] дан средний состав послегранитных даек, отвечающих по своим геохимическим особенностям базитам NEB. В [15] приведены составы как интрузивной, так и субвулканической фаций этих базитов.

Ассоциация вендских адакитов с базитами NEB, также как и в первом случае, позволяет заключить, что адакиты прошли через литосферную мантию и не могут быть продуктом плавления нижней континентальной коры. Для проверки, являются ли они продуктом прямого плавления океанической литосферы в зоне субдукции, воспользуемся рассмотренным выше приемом. По геохимическим спектрам адакитов и базитов NEB, пронормированным по среднему составу N-MORB (рис. 4), видно, что, как и в первом случае, базиты NEB и адакиты генетически связаны, и состав адакита можно рассматривать как оценку состава метасоматизирующего агента, преобразовавшего литосферный источник. Однако в отличие от гранитоидов массива Мунку-Сардык, по составу они более отвечают высококремнистым адакитам и, согласно классическим представлениям, могут рассматриваться как продукт плавления слэба.

Имеющиеся в нашем распоряжении изотопные данные [15] позволяют оценить возраст источника гранитоидов плутона.



**Рис.4. Геохимические спектры гранитоидов Гарганского массива, нормированные по среднему составу N-MORB:**

*А – адакиты, Б - базиты NEB*

Первичное отношение Sr в адакитах составляет 0,7046, что несколько выше величины рассчитанной оценки для базальтов океанического дна (0,7025) возрастом 800 млн. лет. Это свидетельствует о том, что адакиты вряд ли являются продуктом плавления одновозрастного слэба и, скорее всего, связаны с более древним источником. Расчет оценки возраста этого источника выполнен по методике, описанной выше. Данные для расчета ( $^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}=0,1524$ ;  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7046$ ;  $T = 785$ ) были взяты из [15]. Полученная оценка возраста протолита адакитовых магм составляет 2500 млн. лет, хорошо согласуется с аналогичной оценкой, полученной на основе Nd изотопной систематики ( $T(\text{DM})=2472-2562$  млн. лет), и практически идентична оценке возраста источника гранитоидных магм массива Мунку-Сардык (см. рис. 3).

Полученные результаты показывают, что в пределах Восточного Саяна существовал древний специализированный источник, ремобилизация которого приводила к разновозрастному адакитовому магматизму. При этом, согласно современным моделям образования высокониобиевых базитов и адакитов, он должен располагаться в литосферной мантии региона. Это исключает возможность образования адакитов за счет ремобилизации серогнейсовых толщ, слагающих Гарганскую глыбу, однако не исключает возможность того, что все гранитоиды адакитового типа (включая серые гнейсы) образовались за счет единого источника вещества.

Вопрос этот довольно сложен и требует более тщательного изучения. Следует учитывать, что выводы о литосферном положении источника основываются только на гипотетических моделях образования того или иного типа пород, которые с течением времени могут быть изменены, однако существование самого источника вполне очевидно. Его положение фиксируется плутонами адакитов и адакитовых гранитов. Теоретически он может быть распространен на всю северную часть Тувино-Монгольского микроконтинента (см. рис. 1).

Возраст источника, а также его распространение указывают на существование единого континентального блока, как минимум начиная с границы архея и протерозоя (2500 млн. лет), что противоречит современным геодинамическим построениям, однако хорошо согласуется с классическими представлениями о геологическом строении региона. Таким образом, полученные результаты указывают на необходимость ревизии имеющихся геологических данных и построения новых схем геодинамического развития региона.

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ, проект № 05-05-64052.*

### Библиографический список

1. Kay R.W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific Ocean

crust. // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 1978. – V. 4. – P. 117–132.

2. Defant M.J., Drummond, M.S., Derivation of some modern arc magmas by melting of young subducted lithosphere // *Nature*, 1990. – V. 347. – P. 662–665.

3. Defant M.J., Richerson P.M., Boer J.Z., Stewart R.H., Mauri R.C., Bellon H., Drummond M.S., Fiegeuson M.D., Jackson T.E. Dacite genesis via both slab melting and differentiation: petrogenesis of La Yeguada Volcanic Complex, Panama // *J. Petrol.*, 1991 – V. 32, № 6. – P. 1101–1142.

4. Martin H. Adakitic magmas: modern analogues of Archaean granitoids // *Lithos*, 1999. – V. 46. – P. 411–429.

5. Martin H., Smithies R.H., Rapp R., Moya J.-F., Champion D. An overview of adakite, tonalite–trondhjemite–granodiorite (TTG), and sanukitoid: relationships and some implications for crustal evolution // *Lithos*, 2005. – V. 79. – P. 1–24.

6. Thieblemont D., Stein G., Lescuyer J.-L. Gisements epithermaux et porphyriques: la connection adakite. // *C.R. Acad. Sci. (Paris)*, 1997. – V. 325. – P. 103–109.

7. Gonzalez-Partida E.G., Levresse G., Carrillo-Chavez A., Cheilletz A., Gasquet D., Jones D. Paleocene adakite Au–Fe bearing rocks, Mezcala, Mexico: evidence from geochemical characteristics // *Journal of Geochemical Exploration*, 2003. – V. 80. – P. 25–40.

8. Hou Z.-Q., Gao Y.-F., Qu X.-M., Rui Z.-Y., Mo X.-X. Origin of adakitic intrusives generated during mid-Miocene east-west extension in southern Tibet // *Earth and Planetary Science Letters*, 2004. – V. 220. – P. 139–155.

9. Hou Z.-Q., Qu X.-M., Li Y.-G. Melt components derived from a subducted slab in late orogenic ore bearing porphyries in the Gangdese copper belt, southern Tibetan plateau // *Lithos*, 2004. – V. 74. – P. 131–148.

10. Wang Q., Jian Ping, Zhi-Wei Bao, Ji-Feng Xu, Chao-Feng Li, Xiao-Lin Xiong, Zhen-Huan Zhao, Jin-Long Ma. Petrogenesis of adakitic porphyries in an extensional tectonic setting, Dexing, South China: implications for the genesis of porphyry copper mineralization

// Journal of Petrology, 2006. – V. 47. – № 1. – P. 119–144.

11. Petford N., Atherton M. Na-rich partial melts from newly underplated basaltic crust: the Cordillera Blanca Batholith, Peru // J. Petrol., 1996. – V. 37, № 6. – P. 1491-1521.

12. Bourdon E., Eissen J-P., Monzier M., Robin C., Martin H., Cotten J., Hall M.L. Adakite-like lavas from Antisana Volcano (Ecuador): Evidence for slab melt metasomatism beneath Andean Northern Volcanic Zone // Journal of Petrology, 2002. – V. 43, № 2. – P. 199–217.

13. Samaniego P., Monzier M., Martin H., Fornari M., Eissen J.P., Robin C., Cotten J. Temporal evolution of magmatism in the Northern Volcanic Zone of the Andes: the geology and petrology of Cayambe volcanic complex (Ecuador) // Journal of Petrology, 2005. – V. 46, № 11. – P. 2225–2252.

14. Bryant J.A., Yogodzinski G.M., Lewicki J.L., Hall M. L., Bailey D.G. Geochemical constraints on the origin of volcanic rocks from the Andean Northern Volcanic Zone, Ecuador // Journal of Petrology, 2006. – V. 47. – P. 1147–1175.

15. Кузьмичев А.Б. Тектоническая история Тувино-Монгольского массива: раннебайкальский, позднебайкальский и раннекаледонский этапы. – М.: Пробел-2000, 2004. – 190 с.

16. Sajona F.G., Mauri R.C., Pubellier M., Leterrier J., Bellon H., Cotten J. Magmatic source enrichment by slab-derived melts in young post-collision setting, central Mindango (Philippines) // Lithos, 2000. – V. 54. – P. 173-206.

17. Бараш И.Г., Резницкий Л.З., Бели-

ченко В.Г., Сальникова Е.Б., Котов А.Б. Мунку-Сардыкский гранитоидный массив как индикаторный комплекс.// Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса. Материалы совещаний по программе фундаментальных исследований. – Иркутск: ИЗК СО РАН, 2005. – Т.1. - С. 23-26.

18. Ефремов С.В. Геохимия и генетические особенности гранитоидов хребта Мунку-Сардык (Восточный Саян) // Геохимия, 2007.

19. Defant M.j., Jackson T.E., Drummond M.S., Boer J.Z., Bellon H., Fiegeinson M.D., Mauri R.C., Stewart R.H. The geochemistry of young volcanism throughout western Panama and southeastern Costa Rica: an overview // J. Geol. Soc. (London), 1992. – V. 149. – P. 569-579.

20. Sajona F.G., Mauri R.C., Bellon H., Cotten J., Defant M. High field strenght element enrichment of Pliocene-Pleistocene island arc basalts, Zambaanga Peninsula, Western Mindango (Philippines) // J.Petrol., 1996. – V.37, № 3. – P. 693-726.

21. Литвинцев К.А., Калмычкова Т.Н. Первый опыт Rb/Sr датирования гранитоидов Мунку-Сардыкского массива (Восточный Саян) // ДАН, 1990. – Т.312. – С. 205-208.

22. Гребенщикова В.И. Коваль П.В. Геохимия тоналитового гранитообразования (Сумсунурский батолит, Восточный Саян). // Петрология, 2004. – Т. 12, № 1. - С. 68-84.

23. Geochemical Earth Reference Model // <http://earthref.org/GERM/>.

Институт геохимии СО РАН  
Рецензент А.Н.Иванов