



THERMOCHRONOLOGY OF GRANITOID BATHOLITHS AND THEIR TRANSFORMATION INTO METAMORPHIC CORE COMPLEXES (EXAMPLE OF SONG-CHAI MASSIF, NORTHERN VIETNAM)

A. G. Vladimirov^{1, 2, 3}, A. V. Travin^{1, 2, 3}, Phan Luu Anh⁴,
N. G. Murzintsev¹, I. Yu. Annikova^{1, 2, 3}, E. I. Mikheev^{1, 2},
Nguyen Anh Duong⁴, Tran Thi Man⁴, Tran Thi Lan⁴

¹V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS, Novosibirsk, Russia

²Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

³Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁴Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam

Abstract: Based on the reconstruction of the thermal evolution of granitoid batholith, represented by the Song-Chai gneiss-granite massif (Northern Vietnam), the long-term existence of granitoid magma at deep levels of the Earth's crust ($H \geq 25$ km, $\Delta t \sim 20$ –50 Ma) is established. The geodynamic analysis of the granitoid batholith and mathematical modeling of its thermal history shows that the magmatic chamber should be considered as a thermal trap at the lower level of the crust, which preserved residual granite melts for a long time. Activation of the magmatic chamber occurs in post-collisional strike-slip fault zones and is accompanied by tectonic exhumation of large crustal segments. As a result, the batholith is transformed into a Cordilleran-type metamorphic core complex, residual rare-metal melts are emplaced, and, commercial deposits are thus formed.

Key words: granitoid batholith; metamorphic core complex; geochronology; thermochronology; mathematical modeling; Vietnam; Song-Chai massif; metallogenic prediction

RESEARCH ARTICLE

Received: December 10, 2018

Revised: February 24, 2019

Accepted: May 23, 2019

For citation: Vladimirov A.G., Travin A.V., Phan Luu Anh, Murzintsev N.G., Annikova I.Yu., Mikheev E.I., Nguyen Anh Duong, Tran Thi Man, Tran Thi Lan, 2019. Thermochronology of granitoid batholiths and their transformation into metamorphic core complexes (example of Song-Chai massif, Northern Vietnam). *Geodynamics & Tectonophysics* 10 (2), 347–373. doi:10.5800/GT-2019-10-2-0418.

ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ ГРАНИТОИДНЫХ БАТОЛИТОВ И ИХ ТРАНСФОРМАЦИЯ В КОМПЛЕКСЫ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ЯДЕР (НА ПРИМЕРЕ МАССИВА ШОНГЧАЙ, СЕВЕРНЫЙ ВЬЕТНАМ)

А. Г. Владимиров^{1,2,3}, А. В. Травин^{1,2,3}, Фан Лыу Ань⁴,
Н. Г. Мурзинцев¹, И. Ю. Анникова^{1,2,3}, Е. И. Михеев^{1,2},
Нгуен Ань Зыонг⁴, Чан Тхи Ман⁴, Чан Тхи Лан⁴

¹ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

² Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

³ Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴ Институт геологических наук, Вьетнамская академия наук и технологий, Ханой, Вьетнам

Аннотация: На основе реконструкции термической эволюции гнейсогранитного массива Шонгчай (Северный Вьетнам) обосновано длительное существование гранитоидной магмы на глубинных уровнях земной коры ($H \geq 25$ км, $\Delta t \sim 20$ –50 млн лет). Геодинамический анализ и математическое моделирование термической истории остывания гранитоидного батолита показывают, что эта магматическая камера представляла собой термолушку на нижнем уровне земной коры, длительное время сохранявшую остаточный гранитный расплав. Выведение этой термолушки из квазистационарного состояния происходит в зонах трансформного скольжения литосферных плит и сопровождается тектоническим экспонированием крупных геоблоков (сегментов земной коры). В конечном итоге это приводит к трансформации батолитов в комплекс метаморфического ядра кордильерского типа, внедрению остаточных расплавов и, как следствие, – к формированию промышленных редкометалльных месторождений.

Ключевые слова: гранитоидный батолит; комплекс метаморфического ядра; геохронология; термохронология; математическое моделирование; Вьетнам; массив Шонгчай; металлогеническое прогнозирование

1. ВВЕДЕНИЕ

Согласно современным представлениям, базирующимся на положениях плейт- и плюм-тектоники, характер гранитоидного магматизма в значительной мере определяется геодинамическими условиями его проявления. Различие геотектонических условий предопределяет доминирование тех или иных геолого-петрологических факторов (состав и степень плавления протолитов, механизмы магмогенерации и закономерности их эволюции – процессы дифференциации, гибридизма, смешения магм и т.д.). Совокупность этих факторов обуславливает геологическую позицию, петрографические и геохимические особенности гранитоидов. Традиционная система взглядов, с детализацией геодинамических обстановок, в которых формируются различные вещественные типы гранитоидов на стадии генерации магматических расплавов, подтверждена многочисленными примерами и продолжает активно развиваться (субдукционные $\Rightarrow$ коллизионные $\Rightarrow$ постколлизионные $\Rightarrow$ внутриплитные граниты).

Однако в последние годы, благодаря массовому прецизионному мультисистемному и мультиминеральному изотопному датированию минералов-геохронометров в гранитоидах, для которых были известны лишь геологические взаимоотношения, начали появляться новые данные о пространственно-временной совмещенности разнотипных гранитоидов, геохимические различия между которыми не могут быть объяснены разной степенью дифференциации единой материнской магмы (Р-Т-условия генерации магм, степень контаминации и т.д.). Под пространственно-временной совмещенностью здесь следует понимать принадлежность гранитоидов различных вещественных типов, развитых в пределах единого магматического очагового ареала, к одному этапу магматизма продолжительностью порядка 5–30 млн лет. Первые противоречия между традиционными взглядами на длительность существования родоначальных гранитных магм и результатами термохронологических исследований возникли после U-Pb и Ar-Ar изотопного датирования одних и тех же геологических объектов и одних и тех же геологических образцов,

когда разница возрастов составила $\Delta t_{\text{zrn-bt}}=20\text{--}150$ млн лет [Travin, 2016; Travin et al., 2018, 2019; Vladimirov et al., 2018a, 2019].

Для решения этой проблемы были предприняты дополнительные геологические и термохронологические исследования, позволившие провести реконструкцию термической истории остывания и кристаллизации гранитоидного батолита-гиганта, который представлен массивом Шонгчай (Северный Вьетнам). Важно подчеркнуть, что в этом случае гранитоидный батолит-гигант преобразован во времени в комплекс метаморфического ядра кордильерского типа (МСС), а его термическая история, установленная по минералам-геотермометрам (U-Th/Pb, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$, трековый метод), охватывает временной интервал от 465 до 20 млн лет.

2. ЦЕЛЬ, ОБЪЕКТ И МЕТОДОЛОГИЯ ИССЛЕДОВАНИЙ

Главная цель статьи: провести термохронологические исследования массива Шонгчай и оценить длительность существования гранитной магмы на глубинном уровне земной коры, на этой основе провести геодинамический анализ и реконструировать динамику трансформации гранитоидного батолита в комплекс метаморфического ядра, наметить перспективы для глубинного металлогенического прогнозирования редкометалльно-гранитных месторождений Северного Вьетнама.

Прежде чем перейти к термохронологическому анализу этого уникального геологического объекта, целесообразно привести общепринятую международную терминологию гранитоидных батолитов и комплексов метаморфических ядер кордильерского типа, кратко охарактеризовать нерешенные вопросы их генезиса.

Гранитоидные батолиты. В геологии традиционно «короткоживущие» очаговые магматические ареалы («петрографические провинции») с существенным преобладанием гранитоидов (>80–90 %) рассматриваются как «гранитоидные батолиты» со среднестатистическими характерными размерами $\sim 30 \times 40 \times 5\text{--}8$ км ($6000\text{--}10000$ км³). Вместе с тем в Центральной Азии сейчас исследуются и геохронологически обоснованы гигантские по масштабам ($S > 10000\text{--}100000$ км², $V > 0.1\text{--}1.0$ млн км³) батолиты в Северо-Западной Монголии [Yarmolyuk, Kovalenko, 2003; Yarmolyuk et al., 2013], Западном Забайкалье [Litvinovsky et al., 1993, 2011; Yarmolyuk, Kovalenko, 2003; Antipin et al., 2006; Tsygankov, 2014; Tsygankov et al., 2007, 2010], Алтае-Саянской области [Shokal'sky et al., 2000; Rudnev et al., 2013], Северо-Западном и Южном Китае [Han et al., 1997; Chen, Jahn, 2004; Wang et al., 2009; Zhao et al., 2008]. В этом спектре

масштабов гнейсогранитный массив Шонгчай занимает промежуточное положение ($S \sim 2500$ км², $V \geq 0.25$ млн км³), однако по геолого-геофизическим данным сходные объекты продолжают на территории Юго-Восточного Китая и вскрыты глубинным бурением на северо-востоке Вьетнама, что позволяет высказать предположение о гигантском гранитном слое, сопоставимом с Ангаро-Витимским ареал-плутоном Забайкалья (Центральная Азия).

Вопросы происхождения «батолитов-гигантов» широко обсуждаются в научной литературе. С одной стороны, выдвигаются предположения о их образовании в результате процессов конвергенции при закрытии Палеоазиатского [Vladimirov et al., 2003] и Монголо-Охотского [Mazukabzov et al., 2010; Donskaya et al., 2013] океанов. С другой стороны, предполагается их связь с активностью мантийных плюмов [Yarmolyuk et al., 2000, 2013; Yarmolyuk, Kovalenko, 2003; Kuzmin et al., 2010], что следует из ассоциации батолитов с рифтовыми зонами в их обрамлении, совместно с которыми они образуют зональные магматические ареалы [Yarmolyuk et al., 2013]. Развиваются также альтернативные представления, предполагающие трансляцию геодинамического режима в ходе формирования полихронных батолитов с коллизионного на внутриплитный [Tsygankov et al., 2007, 2010; Tsygankov, 2014; Vladimirov et al., 2008; Litvinovsky et al., 2011] или субдукционного на трансформный, связанный с мантийным астеносферным диапиризмом в зоне трансформного скольжения литосферных плит [Khanchuk, Ivanov, 1999; Martynov, Khanchuk, 2013].

Очевидно, что проблема формирования «батолитов-гигантов» связана в первую очередь с трансформным растяжением континентальной литосферы (рифтогенез и мантийные термохимические плюмы, астеносферный диапиризм как отклик на трансформное скольжение литосферных плит и отрыв слэба, деламинация мантийной литосферы на посторогенной стадии тектогенеза и т.д.). Вышеперечисленные механизмы растяжения континентальной литосферы противоречивы и остро дискуссионны. Основные причины: 1) недостаточная изученность связей процессов формирования батолитов с рифтогенезом и(или) сдвигово-раздвиговыми деформациями литосферы, протекавшими в регионах одновременно с батолитообразованием; 2) отсутствие полноценных изотопно-геохронологических и изотопно-геохимических баз данных для выяснения природы коровых протолитов и мантийных источников и, как следствие, – декларативный характер моделей корово-мантийного взаимодействия при батолитообразовании без учета механизмов и времени

мантийного и корового диапиризма, синорогенического коллапса тектонических структур. Привлечение методов математического моделирования позволяет перейти от «концептуальных» представлений к реалистическим геологическим сценариям. Важность этого подхода подчеркивается металлогенической специализацией батолитов (Au, Fe, Cu-Mo, Mo-W-Sn, Li-Pb-Cs, Ta-Nb, PЗЭ) и перспективами глубинного металлогенического прогнозирования.

Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа впервые охарактеризованы на западном побережье США [Crittenden et al., 1980]. Детальные исследования позволили обосновать значимость этих специфических геологических структур как прямых индикаторов крупномасштабного растяжения континентальной литосферы в трансформных геодинамических обстановках [Lister, Davis, 1989]. Позднее эти комплексы были обнаружены в разных регионах мира (Альпы, Аляска, Забайкалье, Новая Зеландия и др., см. обзор [Sklyarov et al., 1997]), где для них подтверждена тесная пространственно-временная связь с Калифорнийской (трансформной) геодинамической обстановкой и разработаны структурно-петрологические критерии диагностики. Наиболее дискуссионным остается генезис метаморфических ядер, которые повсеместно имеют гранитный состав, отвечающий эвтектике в гаплогранитной системе «Qz-Ab-Or-H₂O», т.е. магматическое происхождение. Если формирование и последующее тектоническое экспонирование метаморфических ядер на верхние горизонты земной коры происходили с участием гранитной магмы, то встает вопрос о длительности существования крупных объемов гранитных расплавов в земной коре. Традиционно считается, что кремнекислый расплав в магматических камерах, соизмеримых по масштабу с метаморфическими ядрами, отвердевает в первые миллионы лет, однако при этом не учитывается глубина их зарождения и термическая история остывания. Эти вопросы рассматриваются в настоящей статье на примере комплекса метаморфического ядра Шонгчай (Вьетнам).

Методология исследований. В статье предпринята попытка решить проблему пространственно-временной сопряженности гранитоидных батолитов, места и времени появления комплексов метаморфических ядер кордильерского типа, используя два независимых подхода к оценке длительности формирования гранитоидных батолитов и комплексов метаморфических ядер. Первый подход заключается в термохронологическом анализе геологических объектов на основе U/Pb и ⁴⁰Ar/³⁹Ar изотопного датирования [Travin, 2016; Travin et al., 2018, 2019; Vladimirov et al., 2018a, 2018b, 2019].

Второй подход предполагает математическое тестирование выделенных возрастных рубежей на основе модели тепломассообмена в магматической камере, отвечающей гранитоидному батолиту [Murzintsev et al., 2016].

3. ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ И ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Гранитоидный массив Шонгчай является самым крупным во Вьетнаме (S=2500 км²), занимая ключевую позицию в области сочленения раннекаледонских (катазиатских), герцинских и индосинийских структур Юго-Восточной Азии [Dovzhikov et al., 1965; Chan Wan Chi, 1977; Nguen Khoa Son, 2011]. Согласно структурно-петрологическим наблюдениям (рис. 1), этот массив в позднем мезозое – кайнозое был тесно связан с пологозалегающим тектоническим сдвигом (decoulement) и трансрегиональной сдвигово-раздвиговой зоной Сонг Ма – Рэд Ривер (shear zones) [Ponomareva et al., 1997; Roger et al., 2000; Maluski et al., 2001; Chen et al., 2014].

Массив имеет ромбовидную форму, окружен бластомилонитовой каймой и сложен синскладчатыми гранитоидами S-типа (рис. 2, 3), которые имеют гнейсовидную текстуру даже в аплитовых дайках и пегматитах. На отдельных участках отмечаются слабогнейсовидные и массивные породы, в экзоконтакте с ними встречаются роговики. Простирание гнейсовидности совпадает с простиранием контактов, при этом отмечаются черты динамометаморфической природы, выражающиеся в чередовании полос лейкократового и меланократового материала, гранобластовой структуре кварца с зубчатым сочленением и волнистым погасанием и т.д. Динамометаморфизм повсеместно сопровождался полной перекристаллизацией гранитоидов, о чем свидетельствует практически незональный плагиоклаз во всех разновидностях гранитоидов.

Вещественный состав пород варьируется от кварцевых диоритов до лейкогранитов (SiO₂=62.80–78.96 мас. %) (табл. 1, рис. 4). Все гранитоиды являются пералюминиевыми и преимущественно относятся к известково-щелочной серии (ΣPЗЭ=94–410 г/т). Для пород характерны фракционированные спектры распределения PЗЭ с обогащением легкими лантаноидами ((La/Yb)_n=7.13–16.85) и отрицательными Eu-аномалиями (Eu/Eu* = 0.33–0.58), на мультиэлементных спектрах выделяются минимумы по Ba, Nb, Sr, Zr, Ti (рис. 4).

Температура ликвидуса гранитных расплавов была оценена на основе Zr-термометра [Watson, Harrison, 1983], согласно которому отношение циркония в цирконе и циркония в расплаве является функцией от температуры и химического состава

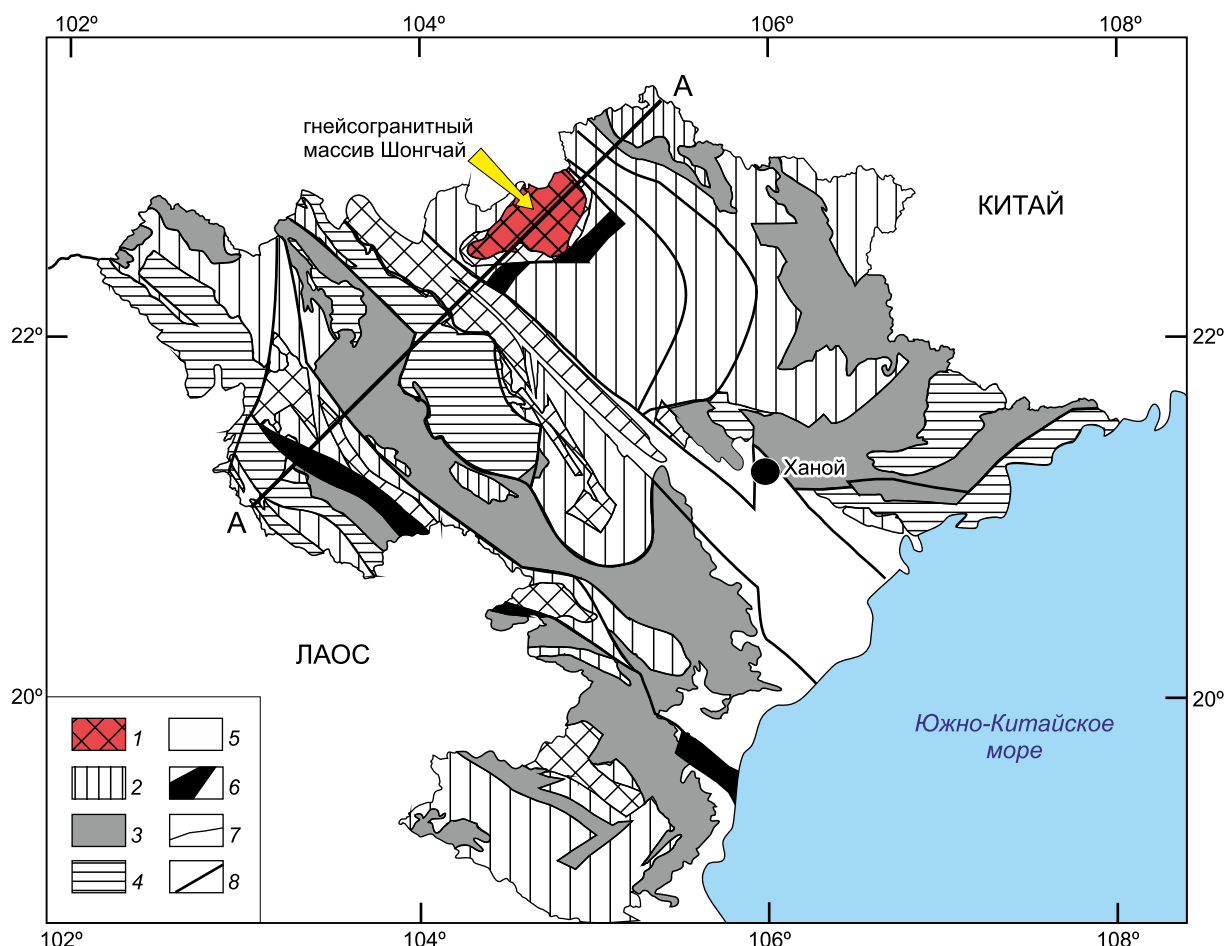


Рис. 1. Тектоническая схема Северного Вьетнама и месторасположение массива Шонгчай ([Vladimirov et al., 2012], с изменениями).

1 – гнейсогранитный массив Шонгчай; структурно-формационные комплексы: 1 – протерозойские, 2 – раннепалеозойские, 3 – позднепалеозойско-раннемезозойские, 4 – позднемезозойские, 5 – кайнозойские, 6 – шовные зоны; 7 – тектонические нарушения, 8 – границы террейнов. Разрез А–А приведен на рис. 14.

Fig. 1. Schematic tectonic map of Northern Vietnam, and the location of the Song-Chai massif (modified after [Vladimirov et al., 2012]).

1 – Song-Chai gneiss-granite massif; structural-formational complexes: 1 – Proterozoic, 2 – Early Paleozoic, 3 – Late Paleozoic – Early Mesozoic, 4 – Late Mesozoic, 5 – Cenozoic, 6 – suture zones; 7 – tectonic faults, 8 – borders of terranes. Cross-section A–A is shown in Fig. 14.

этого расплава. Диапазон температур для изученных образцов гранитов массива Шонгчай составляет 814–708 °C (табл. 1, рис. 5).

Вмещающие породы характеризуются простиранием, грубоконформным с линией контакта, и крутым (80–90°) падением в сторону от контакта. По составу это чередующиеся амфиболовые, биотит-амфиболовые, биотитовые ($\pm$ гранат) сланцы с различным содержанием кварца и плагиоклаза. В биотитовых сланцах встречается мусковит, а вблизи контакта с гранитоидами – фибролит, андалузит, гранат. У самого контакта, а также в ксенолитах среди гранитоидов во всех разновидностях сланцев устанавливается мелкий метасоматический микроклин. Описываемым породам различными исследова-

телями присваивался возраст от верхнего протерозоя до силура [Dovzhikov et al., 1965; Chan Wan Chi, Nguyen Suan Tung, 1977; Nguen Khoa Son, 2011]. Сейчас установлено, что силурийский возраст отвечает пику амфиболитового метаморфизма, наложенному на гранитный массив Шонгчай и его складчатое обрамление (428 $\pm$ 5 млн лет) [Roger et al., 2000]. Термическая история массива Шонгчай рассматривается ниже, здесь же подчеркнем, что в момент внедрения это была междеформационная гранитная залежь абиссальной фации глубинности, типичная для синскладчатых раннепалеозойских батолитов Юго-Восточного Китая и Северного Вьетнама [Chan Wan Chi, 1977]. Структурные исследования бластомилонитового обрамления под-

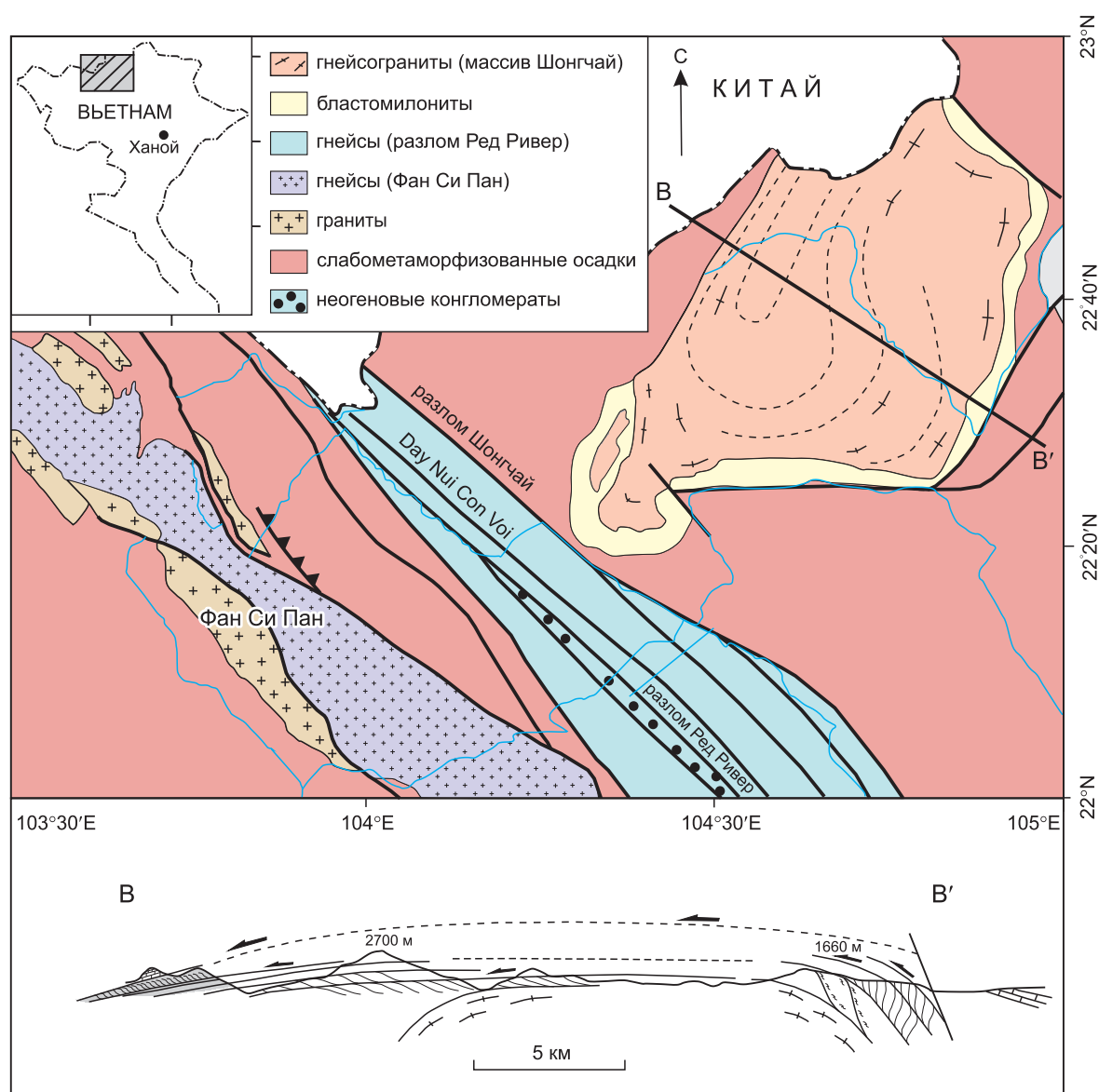


Рис. 2. Тектоническая схема, построенная на основе геологической карты Вьетнама масштаба 1:200000 и разрез через гнейсогранитовый массив Шонгчай ([Maluski et al., 2001], с авторскими изменениями и дополнениями).

Fig. 2. Schematic tectonic map based on the geological map of Vietnam (scale of 1:200000), and a cross-section of the Song-Chai gneiss-granite massif (modified after [Maluski et al., 2001]).

тверждают принадлежность этой геологической структуры к комплексу метаморфического ядра кордильерского типа [Ponomareva et al., 1997; Roger et al., 2000; Maluski et al., 2001].

4. ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ

Для массива Шонгчай характерно многостадийное развитие магматических и тектонических процессов на длительном временном интервале (табл. 2). В этой связи изотопные даты для минералов и систем с различной устойчивостью могут быть распределены во временной шкале в зависимости от

характера термической истории, интенсивности наложенных воздействий [Hodges, 2003; Davis, 2010]. Событиям большей интенсивности, амплитуды (наложенный прогрев, резкое падение температуры и т.д.) должно соответствовать большее число датировок, поскольку повышается вероятность полного омоложения, закрытия системы. Совпадение датировок различных минералов, изотопных систем повышает вероятность того, что они соответствуют возрасту реального геологического события [Shanin, 1979; Morozova, Rublev, 1987; Travin, 2016].

Ордовик – силур (465–420 млн лет). Классическим U/Pb методом по навеске циркона (призматический, без ядер, бесцветный, прозрачный) из наи-

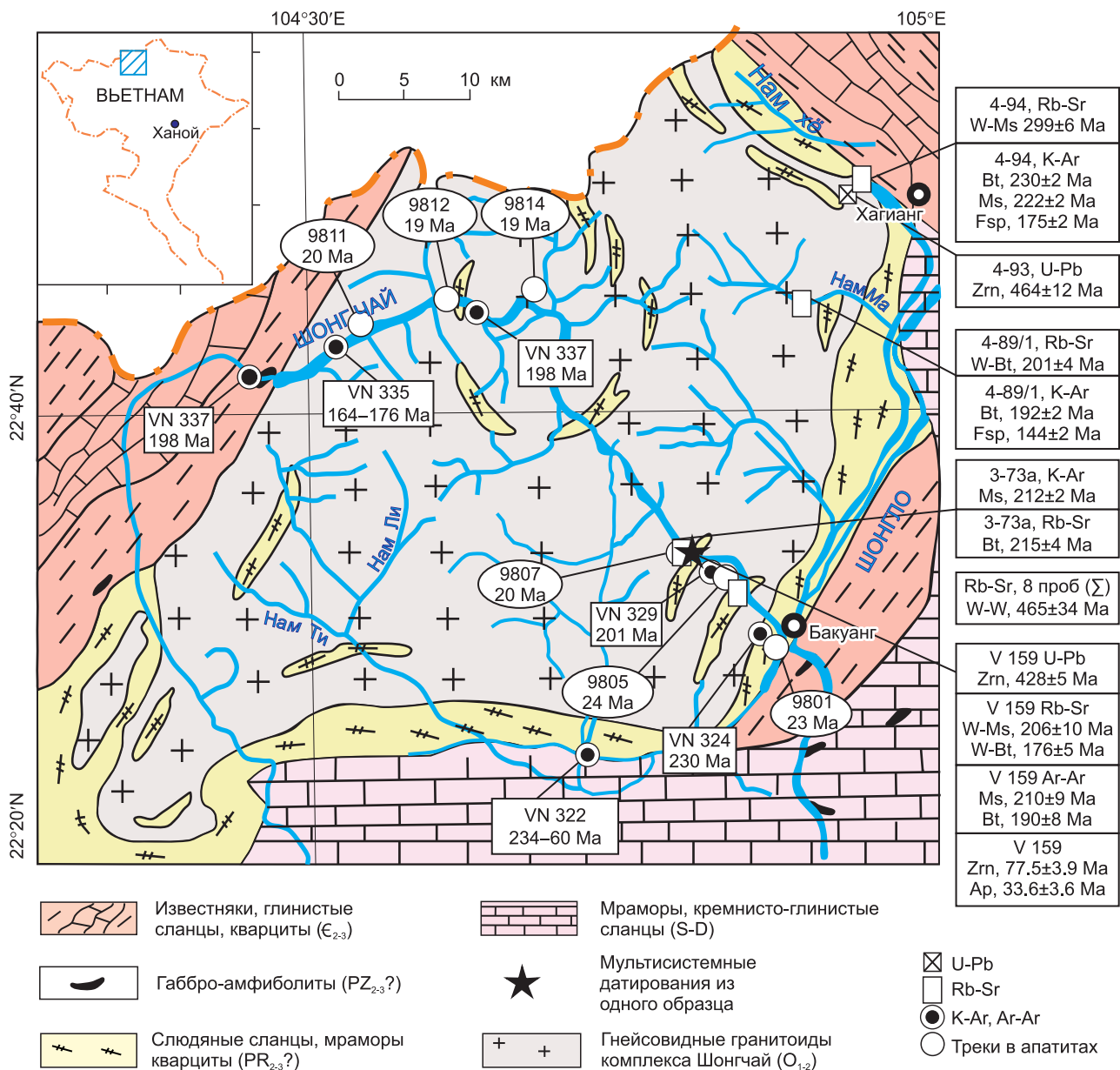


Рис. 3. Геологическая схема и точки геохронологического опробования массива Шонгчай, Северный Вьетнам.

Fig. 3. Schematic geological map of the Song-Chai massif (Northern Vietnam), and geochronological testing points.

менее гнейсовидных, массивных образцов гранитоидов и Rb/Sr изохронным методом по семи образцам валовых проб массива Шонгчай получены согласующиеся между собой оценки возраста 464 ± 12 и 465 ± 34 млн лет соответственно [Ponomareva et al., 1997]. На этом основании можно предположить, что возрастной рубеж 464 ± 12 млн лет отвечает времени консолидации гранитного расплава (табл. 2, рис. 6, а).

Заметно более молодые значения возраста (табл. 2, рис. 6, а, 428 ± 5 , 424 ± 12 млн лет) получены по циркону из гнейсогранитов классическим U/Pb методом [Roger et al., 2000], методом SHRIMP [Carter et al., 2001]. Близкие датировки получены методом

SHRIMP по включениям монацита в гранате из гранат-слюдяного сланца [Gilley et al., 2003].

Наличие в гнейсогранитном массиве Шонгчай большого количества синтектонических гранит-лейкогранитных жил [Ponomareva et al., 1997; Roger et al., 2000], а также оценки P-T-условий на основе гранат-биотитового и гранат-биотит-плагиоклазового термобарометров ($T \sim 550$ °C, $P \sim 6$ кбар) по включениям в зерне граната из гранат-слюдяного сланца [Roger et al., 2000] позволяют предположить, что формирование циркона и монацита происходило ~ 420 млн лет назад в процессе динамометаморфизма на глубинах ≥ 20 км, в присутствии гранитного расплава.

Т а б л и ц а 1. Состав представительных проб гранитоидов массива Шонгчай ([*Ponomareva et al., 1997*], с изменениями)Table 1. Compositions of the representative samples of granitoids from the Song-Chai massif (modified after [*Ponomareva et al., 1997*])

Серия/№ обр.	Натриевая		Каликатровая			Калиевая		
	4-99/2	4-95/1	3-73a	3-75d	4-111/2	4-107/1	4-88/1	3-75g
SiO ₂ , мас. %	64.38	71.16	67.66	69.82	72.96	66.36	69.76	72.62
TiO ₂	1.06	0.35	0.66	0.56	0.32	0.64	0.45	0.20
Al ₂ O ₃	15.81	13.83	15.52	14.10	13.54	15.56	14.45	13.42
FeO	6.42	3.65	4.06	3.72	2.52	4.15	3.30	1.90
MnO	0.06	0.04	0.04	0.04	0.05	0.07	0.05	0.03
MgO	2.07	1.18	1.12	0.95	0.65	1.44	1.30	0.41
CaO	3.70	2.72	2.88	2.06	1.29	2.36	1.97	1.23
Na ₂ O	2.57	4.00	3.17	3.81	3.34	2.85	2.90	2.57
K ₂ O	1.79	1.85	3.69	3.01	3.91	5.18	4.43	5.34
P ₂ O ₅	0.21	0.13	0.17	0.19	0.12	0.11	0.16	0.22
п.п.п.	1.40	1.02	0.65	1.57	0.79	1.21	1.17	1.78
Σ	99.47	99.93	99.62	99.83	99.49	99.93	99.94	99.72
K ₂ O/Na ₂ O	0.70	0.46	1.16	0.79	1.17	1.82	1.53	2.08
Qz	27.54	30.77	24.80	28.12	33.26	20.02	27.77	33.14
Crn	3.42	0.61	1.48	1.28	1.76	1.24	1.69	1.70
Or	10.58	10.93	21.81	17.79	23.11	30.61	26.18	31.56
Ab	21.75	33.85	26.82	32.24	28.26	24.12	24.54	21.75
An	16.98	12.65	13.18	8.98	5.62	10.99	8.73	4.67
Нуп	15.31	9.14	9.23	8.35	5.81	10.28	8.65	4.24
Ilm	2.01	0.67	1.25	1.06	0.61	1.22	0.86	0.38
Ap	0.50	0.31	0.40	0.45	0.28	0.26	0.38	0.52
Σ	98.08	98.92	98.98	98.27	98.71	98.73	98.78	97.95
Rb	65	160	135	230	200	154	265	290
Ba	1125	167	941	367	475	950	370	358
Sr	183	83	132	53	58	142	75	53
La	112	50	45	55	45	48	55	21.5
Ce	170	75	93	87	66	90	70	36
Nd	70	30	36	37	30	40	34	18
Sm	15.5	8	9.6	9.1	7.6	9	7.6	4.5
Eu	2.5	1	1.7	0.81	0.95	1.47	0.79	0.74
Gd	18	7	8.3	6.1	6.2	8.6	6.4	4.3
Tb	2.15	1.1	1.6	1.8	1.1	1.4	1.08	0.92
Dy	12	5.5	7.5	10	8.3	9	8.5	6
Tm	0.8	-	0.43	0.5	-	-	-	0.26
Yb	5.5	2.2	3.3	5.2	2.1	3	2.2	1.8
Lu	0.85	0.3	0.43	0.63	0.275	0.48	0.32	0.3
Y	35	16	26	35	22	38	26	15
Th	40	25	27	30	17	25	23	14.5
U	1	3.5	1	10	4	2.5	6.8	10
Zr	180	100	144	110	140	235	95	56
Hf	14	4	7.2	8	4.5	6	4.8	3.8
Nb	2.5	11	12	13	16	15	20	15
Ta	1.5	1.1	1.15	1.7	0.93	0.8	1.3	2.7
ΣP3Э	409.30	180.10	206.86	213.14	167.53	210.95	185.89	94.32
(La/Yb) _n	13.73	15.32	9.19	7.13	14.45	10.79	16.85	8.05
Eu/Eu*	0.46	0.41	0.58	0.33	0.42	0.51	0.35	0.51
T, °C	878.59	737.27	762.58	789.95	740.30	756.85	736.19	712.34

П р и м е ч а н и е. Отношение (La/Yb)_n нормировано по хондриту CI [*Boynton, 1984*].N o t e. Chondrite-normalized ratio (La/Yb)_n (after [*Boynton, 1984*]).

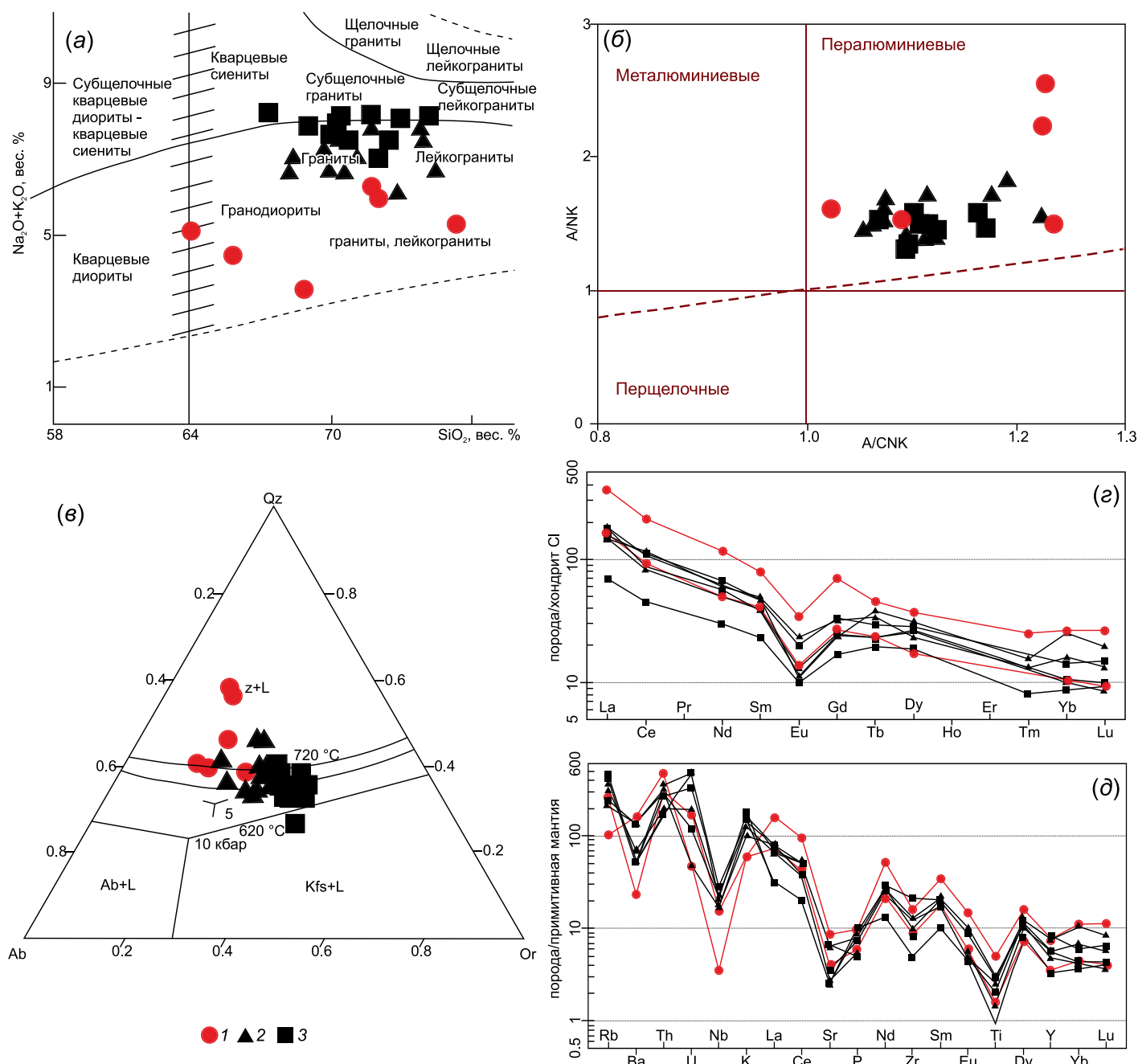


Рис. 4. Геохимические диаграммы для гранитоидов массива Шонгчай (Северный Вьетнам).

(а) – TAS-диаграмма [Bogatikov, 1983]; (б) – диаграмма A/NK–A/CNK [Shand, 1943]; (в) – Qz–Ab–Or [Tuttle, Bowen, 1958]; (г) – РЗЭ-спектр, содержание элементов нормировано по хондриту [Boynnton, 1984]; (д) – мультиэлементный спектр, содержание элементов нормировано по примитивной мантии [Sun, McDonough, 1989]. Типы гранитоидов по [Ponomareva et al., 1997]: 1 – натриевая серия, 2 – каликатовая серия, 3 – калиевая серия.

Fig. 4. Geochemical diagrams for granitoids in the Song-Chai massif (Northern Vietnam).

(а) – TAS diagram [Bogatikov, 1983]; (б) – A/NK–A/CNK diagram [Shand, 1943]; (в) – Qz–Ab–Or [Tuttle, Bowen, 1958]; (г) – RRE spectrum (chondrite-normalized contents) [Boynnton, 1984]; (д) – multi-element spectrum (primitive-mantle-normalized contents) [Sun, McDonough, 1989]. Types of granitoids (after [Ponomareva et al., 1997]), series: 1 – Na, 2 – K–Na, 3 – K.

Триас (250–200 млн лет). Далее, после продолжительного перерыва (~130 млн лет) в геологической истории массива Шонгчай на основании совпадения датировок, полученных методом SHRIMP по монациту из матрицы гранат-слюдистого слан-

ца, K/Ar, $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ методами – по амфиболу, мусковиту и биотиту из гнейсогранитов, а также по паре «вал – биотит» Rb/Sr методом фиксируется активное термальное событие. Температура закрытия U/Pb изотопной системы в монаците более 900 °C,

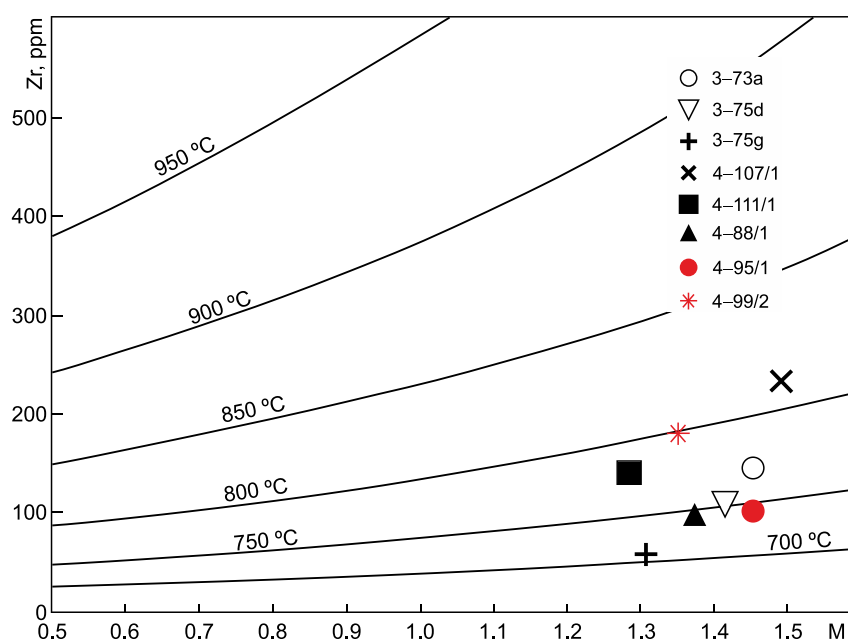


Рис. 5. Диаграмма Zr–M для гранитоидов массива Шонгчай (Северный Вьетнам). Красным цветом обозначены породы натриевой серии, черным – породы объединенных каликатровой и калиевой серий. Температуры насыщения циркона показаны кривыми линиями; $M = (Na + K + 2 \cdot Ca) / (Al \cdot Si)$, в молярных долях элемента от суммы [Watson, Harrison, 1983; Boehnke et al., 2013].

Fig. 5. Zr–M diagram for granitoids of the Song-Chai massif (North Vietnam). Red – rocks of the Na; black – rocks of the combined K–Na and K. Zircon saturation temperatures are shown by curved lines; $M = (Na + K + 2 \cdot Ca) / (Al \cdot Si)$, molar fractions of an element in the sum [Watson, Harrison, 1983; Boehnke et al., 2013].

при этом оценки P–T-условий на основе гранат-биотитового и гранат-биотит-плагиоклазового термобарометров ($T = 575$ °C, $P = 3.8$ кбар) соответствуют амфиболитовой фации, поэтому датировки по монациту отвечают времени его формирования и, следовательно, метаморфического события. На термохронограмме плотности вероятности датировок, полученных методом SHRIMP по монациту, отчетливо выделяются два значимых пика с возрастом 237 ± 2 , 203 ± 5 млн лет (рис. 6, а). Совпадение датировок, полученных с использованием минералов, характеризующихся различной температурой закрытия, свидетельствует о том, что после метаморфического события 237 ± 2 млн лет назад (среднее взвешенное по пяти датировкам монацита) 231 ± 2 млн лет назад произошло охлаждение до температур менее 300 °C (закрытие Rb/Sr изотопной системы в биотите). При геотермическом градиенте 30 °C/км это соответствует подъему пород до глубины менее 10 км.

Юра – мел – кайнозой (200–80–20 млн лет – настоящее время). В дальнейшей термической истории массива Шонгчай на основании наличия кластеров изотопных датировок с различной температурой закрытия выделяется по крайней мере пять активных термических событий с возрастом 198 ± 2 , 169 ± 2 , 143 ± 3 , 80 ± 2 , 20 ± 1 млн лет (рис. 6, а). Прак-

тически все эти события должны были сопровождаться кратковременным повышением температуры и затем быстрым охлаждением. Это связано с требованием сохранности низкотемпературных изотопных систем, закрытие которых произошло во время ранних событий. Исключением может являться последний возрастной рубеж 20 ± 1 млн лет, фиксируемый трековым методом по апатиту (табл. 2, рис. 6, а). Это событие связано с охлаждением ниже 100 °C и, соответственно, подъемом геоструктуры Шонгчай до глубины менее 3 км во время кайнозойской активизации сдвиговой зоны Сонг Ма – Ред Ривер в процессе Индо-Азиатской коллизии [Molnar, Tapponnier, 1975].

Дальнейшая термическая история массива Шонгчай уже не поддается термохронологической реконструкции, но становится очевидной при геоморфологическом анализе региона [Nгуен Khoa Son, 2011]. Характерной особенностью массива Шонгчай является широкое развитие «структурированных глин», отражающих «субплатформенный» режим в новейшей истории Северного Вьетнама, когда происходила дезинтеграция гнейсогранитов массива Шонгчай и их трансформация в коры тропического выветривания (рис. 7). Сейчас этот период закончился (≤ 20 тыс. лет), появились глубокие речные врезы, свидетельствующие о

Т а б л и ц а 2. Сводка термохронологических данных, массив Шонгчай, Северный Вьетнам

T a b l e 2. Summary of thermochronological data on the Song-Chai massif (Northern Vietnam)

n/n	Проба	Порода	Метод датирования	Возраст/минерал/источник	Закрытие изотопной системы T, °C
1	4-93	Массивный к/з Bt-Ms K-Na гранит	U-Pb, Zrn	464±12 Ma [Ponomareva et al., 1997]	
2	W-W	Массивные/огнейсованные к/з Bt-Ms K-Na граниты	Rb-Sr, 8 проб	465±34 Ma [Ponomareva et al., 1997]	> 900
3	V159	Массивный к/з Bt-Ms гнейсогранит	U-Pb, Zrn	428±5 Ma [Roger et al., 2000]	~ 800
4	V101	Гнейсогранит	U-Pb, Zrn	424±12 Ma [Carter et al., 2001]	
5	V-160	Гранат-слюдистый сланец	U-Pb, Mon	419±3 Ma [Gilley et al., 2003]	
6				380±17 Ma [Gilley et al., 2003]	
7				255±14 Ma [Gilley et al., 2003]	
8				246±8 Ma [Gilley et al., 2003]	
9				240±3 Ma [Gilley et al., 2003]	
10				230±5 Ma [Gilley et al., 2003]	
11				224±7 Ma [Gilley et al., 2003]	
12				216±40 Ma [Gilley et al., 2003]	
13				203±5 Ma [Gilley et al., 2003]	
14	DL-1 – DL-5	Гранитоидный, милонит, амфиболовый милонит – комплекс метаморфического ядра	U-Pb, Zrn Среднее по 4 образцам	402±10 Ma [Yan et al., 2006]	
15	4-94	Кр/з Bt-Ms K-Na гнейсогранит	Rb-Sr, W-Ms	299±6 Ma [Ponomareva et al., 1997]	316±30
16	4-94		K-Ar, Bt	230±2 Ma [Ponomareva et al., 1997]	340±30
17	4-94		K-Ar, Ms	222±2 Ma [Ponomareva et al., 1997]	366±30
18	4-94		K-Ar, Fsp	175±2 Ma [Ponomareva et al., 1997]	230±20
19	3-73a	Кр/з Bt-Ms K-Na гнейсогранит	K-Ar, Ms	212±2 Ma [Ponomareva et al., 1997]	390±30
20	VN 324	Кр/з Bt-Ms K-Na гнейсогранит	Ar-Ar, Ms	230±2 Ma [Maluski et al., 2001]	390±30
21	VN 322		Ar-Ar, Ms(st)	234 -60 Ma [Maluski et al., 2001]	390±30
22	V159	Массивный к/з Bt-Ms гнейсогранит	Rb-Sr, W-Ms	206±10 Ma [Roger et al., 2000]	316±30
23	V159		Rb-Sr, W-Bt	176±5 Ma [Roger et al., 2000]	299±20
24	V159		Ar-Ar, Ms	210±9 Ma [Roger et al., 2000]	390±30
25	V159		Ar-Ar, Bt	190±8 Ma [Roger et al., 2000]	340±30

Примечания: Bt – биотит, Fsp – калиевый полевой шпат, Ms – мусковит, Ms(st) – синтетический мусковит, Ar – апатит, Zrn – циркон, Mon – монацит. Оценки температур закрытия изотопных систем на основе кинетических данных, полученных в лабораторных экспериментах (сводка [Hodges, 2004]).

Note: Bt – biotite, Fsp – potassium feldspar, Ms – muscovite, Ms(st) – synthetic muscovite, Ar – apatite, Zrn – zircon, Mon – monazite. The temperatures of opening of isotopic systems are estimated from the kinetic data obtained in laboratory experiments (summary in [Hodges, 2003]).

Т а б л и ц а 2 (окончание)

T a b l e 2 (end)

n/n	Проба	Порода	Метод датирования	Возраст/минерал/источник	Закрепление изотопной системы T, °C
26	4-89/1	Кр/з Bt-Mu К порфиробластический гнейсогранит	Rb-Sr, W-Bt	201±4 Ma [Ponomareva et al., 1997]	299±20
27	4-89/1		K-Ar, Bt	192±2 Ma [Ponomareva et al., 1997]	340±30
28	4-89/1		K-Ar, Fsp	144±2 Ma [Ponomareva et al., 1997]	230±20
29	VN 329	Кр/з порфиробластический гнейсогранит Милонитизированный гнейсогранит	Ar-Ar, Ms(st)	201±2 Ma [Maluski et al., 2001]	390±30
30	VN 337		Ar-Ar, Ms(st)	198±2 Ma [Maluski et al., 2001]	
31	VN 335		Ar-Ar, Ms(st)	176–164 Ma [Maluski et al., 2001]	
32	DL-5	Амфиболовый милонит, гранитоидный, милонит из комплекса метаморфического ядра южнее массива Шонгчай	Ar-Ar, Amf	237±5 Ma [Gilley et al., 2003]	550±30
33	DL-4		Ar-Ar, Bt	116±10 Ma [Gilley et al., 2003]	340±30
34	DL-3		Ar-Ar, Ms	140±2 Ma [Gilley et al., 2003]	390±30
35	DL-2		Ar-Ar, Ms	144±2 Ma [Gilley et al., 2003]	390±30
36	DL-1		Ar-Ar, Bt	84±1 Ma [Gilley et al., 2003]	340±30
37	V159	Трековый метод, массивный к/з Bt-Ms гнейсогранит	Zrn	77.5±3.9 Ma [Roger et al., 2000]	227±20
38	V159		Ap	33.6±3.6 Ma [Roger et al., 2000]	110±10
39	9811	Треки в апатитах из гнейсогранитов массива Шонгчай и его бластомилонитового обрамления		20 Ma [Maluski et al., 2001]	
40	9812			19 Ma [Maluski et al., 2001]	
41	9814			19 Ma [Maluski et al., 2001]	110±10
42	9807			20 Ma [Maluski et al., 2001]	
43	9805			24 Ma [Maluski et al., 2001]	
44	9801			23 Ma [Maluski et al., 2001]	

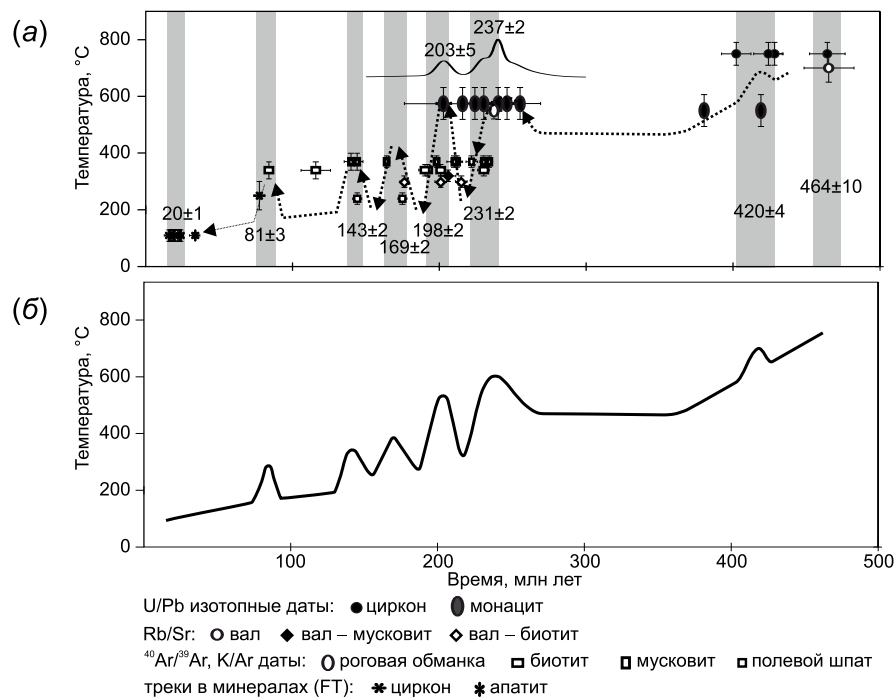


Рис. 6. Термохронограмма гнейсогранитного массива Шонгчай, преобразованного в комплекс метаморфического ядра кордильерского типа (на основе таблицы 2). (а) – статистически достоверные геохронологические оценки возрастов; (б) – термическая история гнейсогранитного массива Шонгчай (пояснения в тексте).

Fig. 6. Thermochronogram of the Song-Chai gneiss-granite massif transformed into a Cordilleran type metamorphic core complex (based on Table 2). (a) – statistically reliable geochronological age; (b) – thermal history of the Song-Chai gneiss-granite massif (explained in the text).

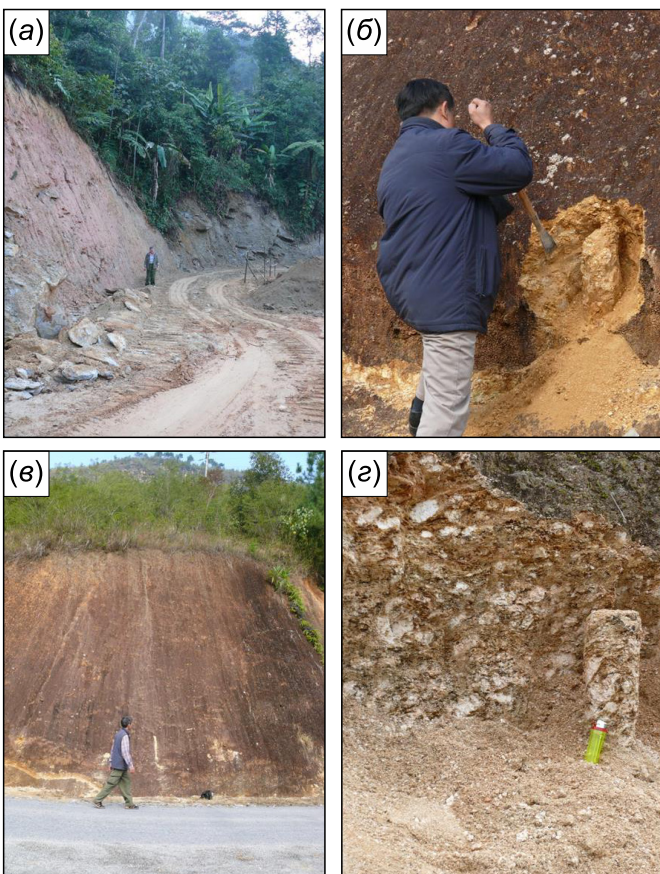


Рис. 7. Общий вид и масштабы (а), (б) «структурированных глин», в которые преобразованы гнейсограниты в условиях тропического климата массива Шонгчай. Характерны теневые текстуры и структуры гнейсогранитов, замещенные глинистым материалом (в), (г). Автор фото: М.Л. Куйбида.

Fig. 7. General view and scales of 'structured clays' (a), (b) resulting from the gneiss-granite transformation in the tropical climate of the Song-Chai massif. Note the shadow textures and structures of gneiss-granites replaced with clayey material (c), (d). Photo courtesy of M.L. Kuybida.

возобновившихся процессах подъема территории и, как следствие, эрозии гнейсогранитного массива Шонгчай (рис. 7).

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исходные предпосылки для тестирования термической истории массива Шонгчай. Анализ термической кривой, построенной на основе минералов-геотермохронометров, отражает общий тренд спада температуры и остывания массива Шонгчай. В отличие от классической модели М. Додсона [Dodson, 1973] здесь отмечаются температурные всплески, при которых породы повторно разогревались, в том числе достигая суб-солидусных температур обводненной гранитной эвтектики (≥ 650 – 700 °C). Эти особенности поставили четыре кардинальных вопроса: 1) с чем связано повышение температурного градиента в земной коре? 2) как оценить длительность существования гранитной магмы на глубинных уровнях земной коры? 3) какая роль отводится тектоническим движениям в земной коре, ответственным за снятие общего литостатического давления ($P_{\text{общ.}}$), что неизбежно приводит к затвердеванию гранитного расплава? 4) какая роль отводится плюм-тектонике, вызывающей повышение температурного градиента в земной коре? В принципе типы поведения гранитной магмы давно известны и отражены в классических экспериментах, однако до сих пор не было попыток привязать диаграммы «плавкости – кристаллизации гранитов» к конкретным геологическим телам, в данном случае – к гранитному батолиту Шонгчай, который в конечном итоге был преобразован в МСС.

Алгоритм математического моделирования. С целью реконструкции истории консолидации и остывания гранитоидного массива Шонгчай на основании возрастных рубежей, фиксируемых изотопными методами, нами использован математический алгоритм. Алгоритм основан на модели кристаллизационной дифференциации и динамики тепломассообмена в магматической камере, отвечающей гранитоидному батолиту [Murzintsev et al., 2016, 2018, 2019; Vladimirov et al., 2019].

Для моделирования численным методом было выбрано поле расчета в цилиндрических координатах – область земной коры дискообразной формы радиусом 120 км, что в несколько раз превышает поперечный размер массива Шонгчай (см. рис. 1, 2). Это позволяет избежать влияния границ при расчете. В глубину расчетное поле занимало 40 км. Температура на границах расчетной области считалась

постоянной во времени. Геотермальный градиент соответствовал стандартному (30 °C/км). Температура поверхности принималась равной 17 °C. Термодинамические параметры пород рассчитывались, согласно их минеральным составам, как сумма удельных вкладов от каждого минерала в соответствии с их собственными термодинамическими свойствами и содержанием в породе (табл. 3, 4). При этом в модели массив сверху был перекрыт осадочными толщами состава: кальцит 20 %, плагиоклаз 30 %, КПШ 15 %, кварц 20 %, амфибол 15 %. В качестве состава внедренных пород принимался усредненный нормативный состав пород Шонгчая (см. табл. 1).

Массив Шонгчай принят в расчетах в виде дискообразной пластины (таблетки) с начальной глубиной залегания 20 км, мощностью 10 км и диаметром 40 км, что соответствует ~ 12600 км³. В качестве начальных условий принималось стационарное распределение температуры в земной коре, содержащей кларковые концентрации деющих элементов (K, U, Th). Начальная температура расплава полагалась 780 °C по данным цирконометрии (см. рис. 5). Температура консолидации определялась согласно зависимости от давления для случая водонасыщенного гранита. Температура ликвидуса бралась также для обводненного гранита и определялась смещением данной зависимости по температуре. Кристаллизационная дифференциация гранитного расплава определялась согласно доле рассчитанного остаточного расплава, приведенного к объему камеры, благодаря чему обеспечивалось скольжение точек кристаллизации и плавления остаточных расплавов по кривым ликвидуса и солидуса. Максимальная степень плавления полагалась равной 0.5. Вторичное тепловое воздействие, выявленное на термохронограмме (см. рис. 6) (Эймешанский плюм напрямую либо астеносферный диапир, порожденный плюмом [Polyansky et al., 2016]), моделировалось повышением температуры на глубине 40 км до 1200–1300 °C (что согласуется с оценками типичной температуры верхней конвектирующей мантии [McKenzie, Bickle, 1988], а также с зависимостью температуры плюма в цилиндрическом столбе от внешней температуры ($T_{\text{вн}} \pm 440$ °C для 100 км) в модели, приведенной в работе [Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A., 2016] на примере плюмов Северной Азии), в результате чего происходит переустановка температурного режима в земной коре и реактивация гранитной камеры – переплавление и куполообразование, а затем, согласно выявленным по термохронограмме температурным импульсам, предполагается серия событий эксгумации–погружения. Постепенное погружение массива происходит за счет осадко-

Т а б л и ц а 3. Средний приведенный состав пород массива Шонгчай и вклад минералов в свойства пород

Table 3. Average reduced composition of rocks in the Song-Chai massif, and the contribution of minerals to the rock properties

Минерал	Содержание	Параметры для минерала			Вклад минерала в свойства породы		
		Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, г/м³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, г/м³
кварц	28.26857	7.99	750	2.6	2.258659	212.0143	0.7349
корунд	1.394286	34.6	711	4	0.482423	9.913371	0.0557
ортотлаз	23.14143	2.31	628	2.56	0.534567	145.3282	0.5924
альбит	27.36857	2.31	711	2.65	0.632214	194.5905	0.7252
анортит	9.26	1.7	711	2.75	0.15742	65.8386	0.2546
гиперстен	7.957143	4.39	-	3.2	0.349319	-	0.2546
ильменит	0.864286	-	-	4.72	-	-	0.0407
апатит	0.371429	-	-	3.3	-	-	0.0122
Вся порода	98.62571	-	-	-	4.414601	627.685	2.6707

П р и м е ч а н и е. Физико-химические параметры минералов заимствованы из работы [Dortman et al., 1984].

Note. The physico-chemical parameters of minerals were taken from [Dortman et al., 1984].

Т а б л и ц а 4. Средний приведенный состав вмещающих пород массива Шонгчай и вклад минералов в свойства пород

Table 4. Average reduced composition of the host rocks of the Song-Chai massif, and the contribution of minerals to the rock properties

Минерал	Содержание	Параметры для минерала			Вклад минерала в свойства породы		
		Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, г/м³	Теплопроводность, Вт/(м·К)	Теплоемкость, Дж/(кг·К)	Плотность, г/м³
кварц	20.00	7.99	750.00	2.60	1.60	150.00	0.52
ортотлаз	15.00	2.31	628.00	2.56	0.35	94.20	0.38
альбит	30.00	2.31	711.00	2.65	0.69	213.30	0.80
амфибол	15.00	2.25	1100	3.45	0.34	165.00	0.52
кальцит	20.00	2.37	897	2.72	0.47	179.40	0.54
Вся порода	100.00	-	-	-	3.45	801.90	2.76

П р и м е ч а н и е. Физико-химические параметры минералов заимствованы из работы [Dortman et al., 1984].

Note. The physico-chemical parameters of minerals were taken from [Dortman et al., 1984].

накопления, а эксгумация – за счет тектонического импульсного экспонирования на верхние уровни земной коры в соответствии с полученной термической кривой либо постепенного поднятия вследствие эрозии дневной поверхности (наблюдается на завершающем этапе термохронограммы 0–40 млн лет) (см. рис. 6).

Результаты численного моделирования приведены в таблице 5, а их графическая интерпретация – на рисунках 8–11.

Термическая история и динамика трансформации гранитоидного батолита в комплекс метаморфического ядра кордильерского типа (465–20 млн лет). Для массива Шонгчай характерно многостадийное развитие магматических и тектонических процессов на длительном временном интервале. В этой связи изотопные даты для минералов и систем с различной устойчивостью могут быть распределены во временной шкале в зависимости от характера термической истории, интенсивности наложенных воздействий. Совпадение датировок различных минералов, изотопных систем увеличивает вероятность того, что они соответствуют возрасту реального геологического события. В термической истории гранитоидов массива Шонгчай можно выделить следующие этапы, привязанные к наиболее важным геодинамическим обстановкам в истории Юго-Восточной Азии (рис. 12). Их развернутая характеристика выходит за рамки настоящей статьи и является предметом для будущих исследований. Ключевым моментом является предположение о роли Эмейшаньского плюма или порожденного им мантийного диапира в повышении температуры в подошве земной коры и, как следствие, переплавлении магматической камеры – термолувушки (≥ 15 –20 км). В пользу этой гипотезы свидетельствует пространственно-временная сопряженность Эмейшаньской LIP и Шонгчай – MCC (рис. 13), а также детальные петролого-геохимические и геохронологические исследования, проведенные для габбро-гранитной серии Нуйчуа – Пиабик (P₂/T₃), отражающей мантийное воздействие Эмейшаньского плюма на глубинные уровни земной коры Северного Вьетнама (см. обзор [Vladimirov et al., 2012; Tran et al., 2016]).

Оценка длительности существования гранитной магмы. Вышеприведенный термохронологический анализ массива Шонгчай и его математическое моделирование позволяют с высокой долей вероятности предположить, что в ходе становления глубинного гранитоидного батолита (≥ 20 км) происходила чрезвычайно медленная кристаллизация расплава, способного длительное время существовать при стандартном температурном градиенте в земной коре (30 °C/км). Для проверки этой гипотезы был применен математический алгоритм,

Т а б л и ц а 5. Результаты численного моделирования термической истории гранитного массива Шонгчай, Северный Вьетнам
T a b l e 5. The thermal history of the Song-Chai granite massif (Northern Vietnam). Numerical modeling results

Характеристика	Гранитоидный батолит мезоабиссальной фации глубинности				Переплавление батолита			Комплекс метаморфического ядра									
	Каледонский орогенез, 30 °C/км				ПКО, 30 °C/км	Вторичный тепловой импульс		Постколлизийное скольжение литосферных плит									
Геодинамическая обстановка	465	463	458	451	359	271	253	235	235	234	232	231	228	224	161	84	Н/вр.
Возраст, млн лет	20	20	20	20	20	20	20	20	20	15	15	15	15	15	11	10.7	0
Глубина кровли батолита (Н, км)	0	1.8	6.7	14	106.4	194	212	230	230	230	231	234	237	241	304	381	465
Шаг расчета (Δt, млн лет)	100.00	53.51	22.48	20.00	20.00	20.00	49.58	100.00	100	66.91	42.63	36.40	26.57	23.23	0	0	0
Доля остаточного расплава (L _R , %)																	

П р и м е ч а н и е. Условные обозначения, принятые в таблице и на рисунках: ПКО – пассивная континентальная окраина, ТКО – трансформная континентальная окраина, АКО – активная континентальная окраина, ВКР – внутриконтинентальные разломы, связанные с Индо-Евразийской коллизией, н/вр – настоящее время.
N o t e. Legend: ПКО – passive continental margin, ТКО – transform continental margin, АКО – active continental margin, ВКР – intra-continental faults associated with the Indo-Eurasian collision, н/вр – present time.

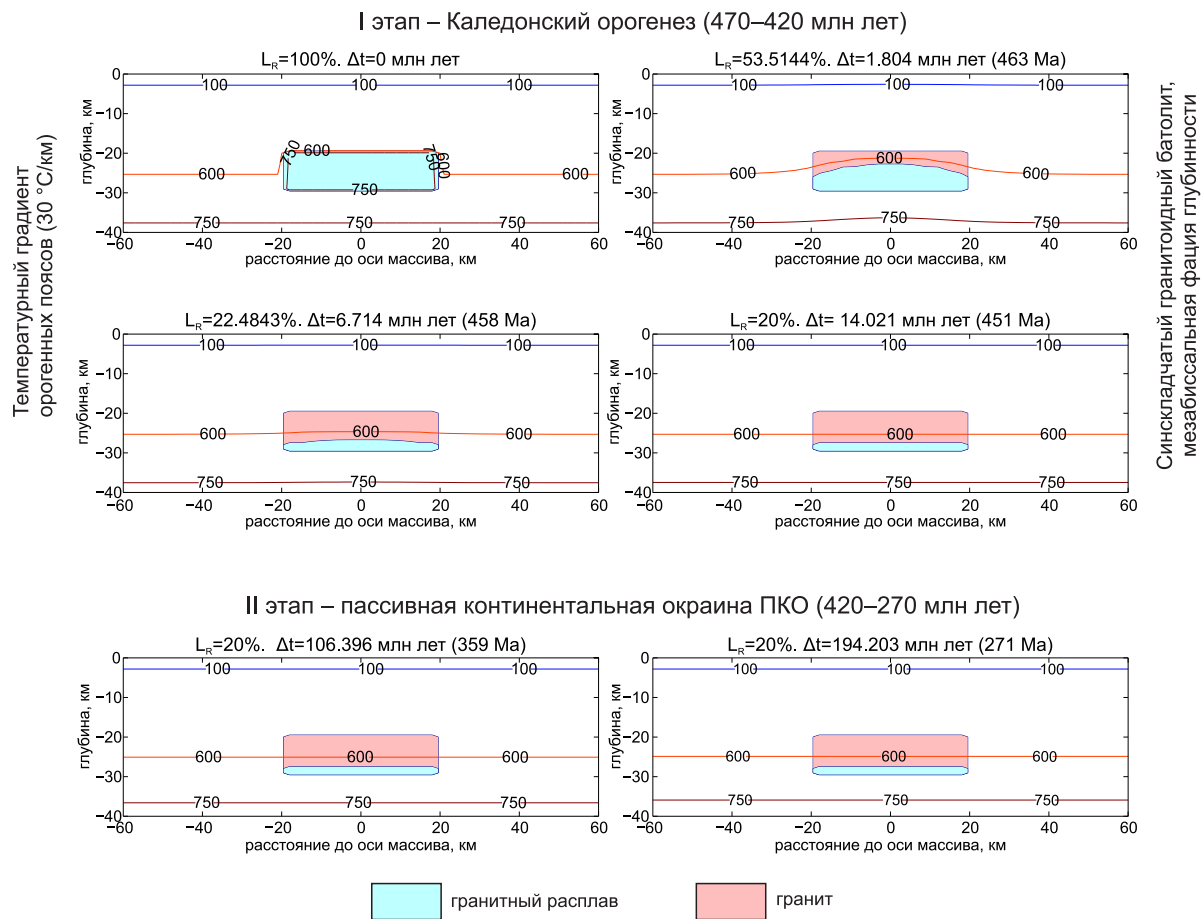


Рис. 8. Результаты численного моделирования динамики остывания гранитной магмы на раннекаледонском этапе орогенеза (протолит комплекса метаморфического ядра Шонгчай, Северный Вьетнам).

Fig. 8. The dynamics of the granite magma cooling at the early Caledonian stage of orogenesis (protolith of the Song-Chai metamorphic core complex (Northern Vietnam). Numerical modeling results.

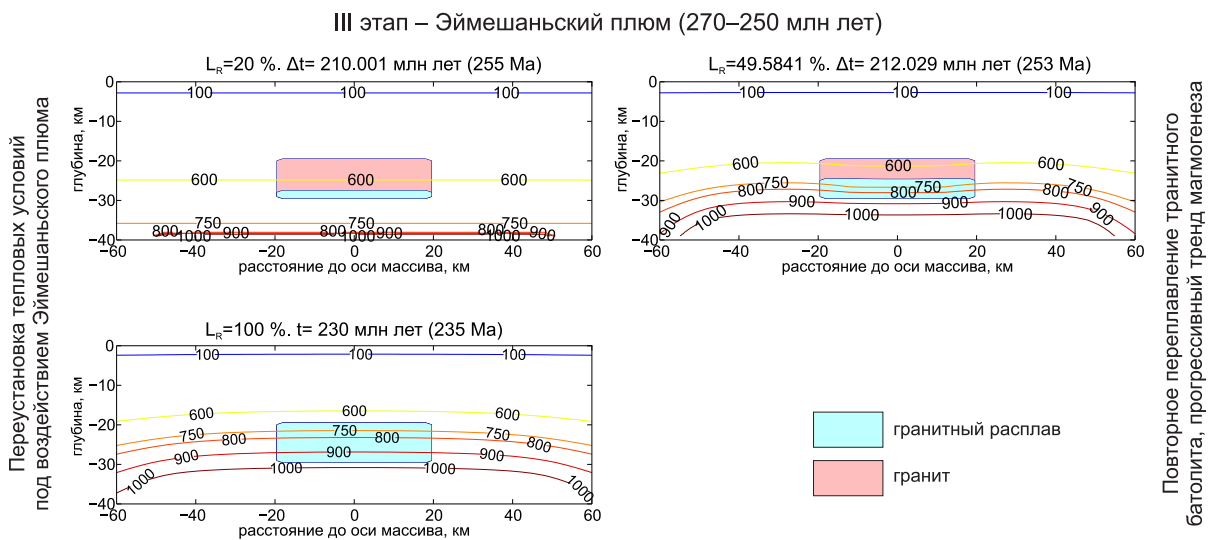
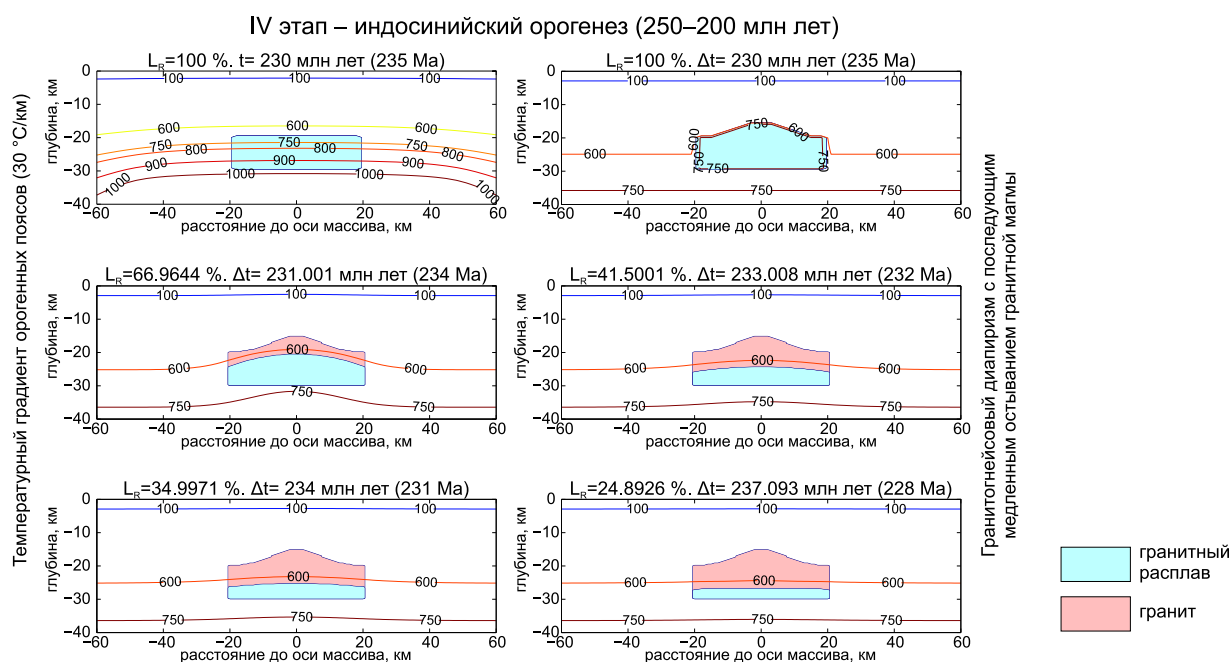


Рис. 9. Результаты численного моделирования динамики повторного переплавления гранитоидного батолита под воздействием Эймешанского плюма.

Fig. 9. The dynamics of the granitoid batholith re-melting due to the influence of the Emeishan plume. Numerical modeling results.



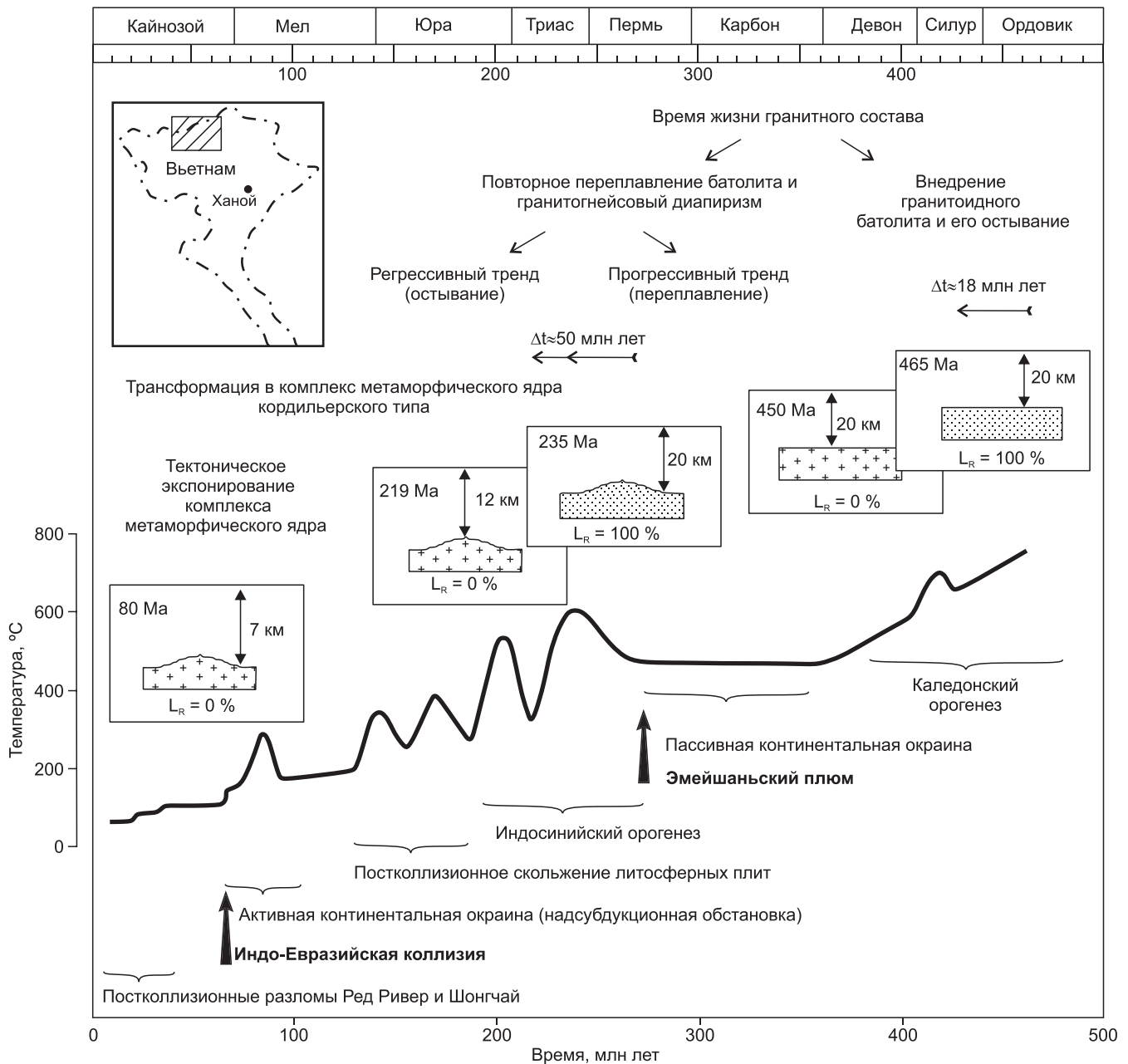


Рис. 12. Термическая кривая гранитоидного батолита Шонгчай (Северный Вьетнам) и его трансформация в комплекс метаморфического ядра кордильерского типа. На врезках – результаты численного моделирования, где $L_R(\%)$ – доля оставшегося расплава в глубинной магматической камере. Остальные пояснения в тексте.

Fig. 12. Thermal curve of the Song-Chai granitoid batholith (Northern Vietnam), and its transformation into a Cordilleran-type metamorphic core complex. Numerical simulation results are shown in insets. $L_R(\%)$ – amount of the melt remaining in the deep magmatic chamber. Other explanations in the text.

описывающий динамику теплообмена в магматической камере, отвечающей по размеру гранитоидному батолиту на разноточных уровнях земной коры. Результаты численных расчетов (табл. 5, рис. 8–12) показывают, что после заложения магматической камеры начинает образовываться корка у кровли будущего массива, причем система «расплав – порода», в рамках модели, практически переходит в квазистационарное состояние с высокой долей остаточного расплава и с высокой

степенью дифференциации на глубинах 28–30 км ($L_R=20\%$ со степенью плавления в жидкой фазе 0.5). При этом стоит отметить, что, так как в модели не закладывалась трещиноватость остывания, в природе этого могло и не произойти, вследствие того, что данный остаточный расплав, в силу падения вязкости из-за насыщения флюидом, при дифференциации был бы выдавлен в трещины и образовал бы дайковые тела. Но это не гарантирует полного расхода такого объема остаточного расплава.

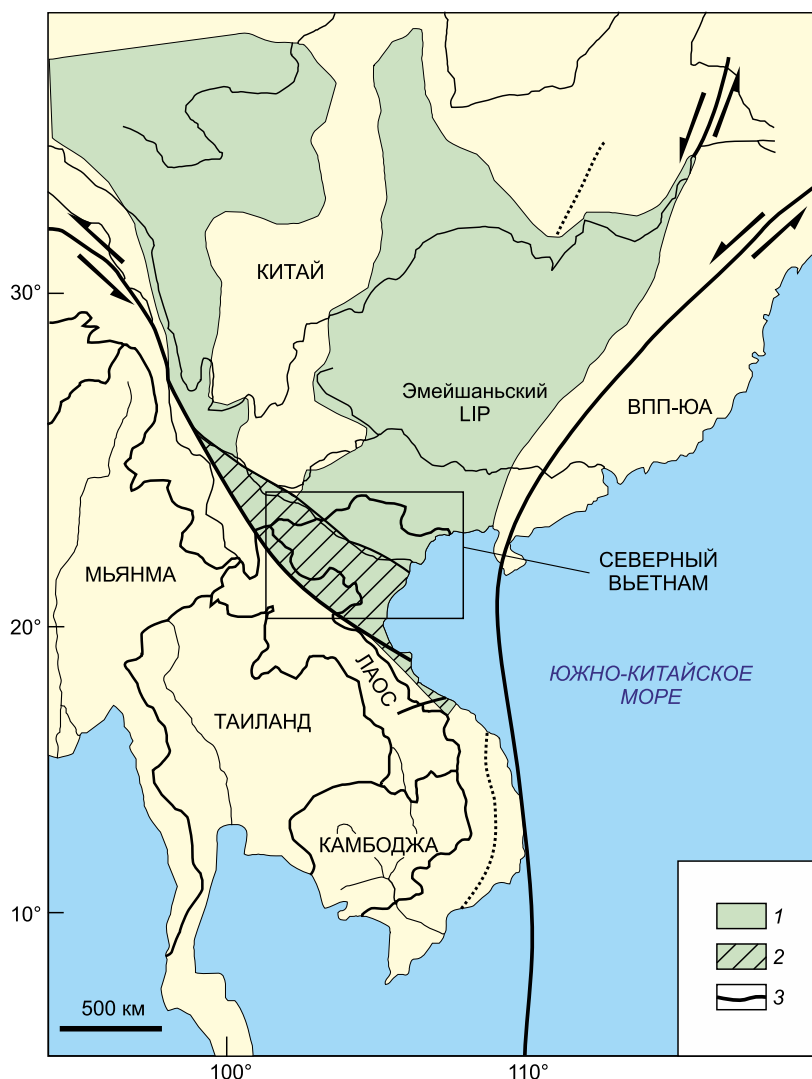


Рис. 13. Тектоническая схема Северного Вьетнама. 1 – траппы P₂-T₁; 2 – габбро-гранитные интрузивные серии P₂-T₁; 3 – трансрегиональные разломы.

Fig. 13. Tectonic scheme of Northern Vietnam. 1 – trappes P₂-T₁; 2 – gabbro-granite intrusive series P₂-T₁; 3 – transregional faults.

Для вывода этой системы из квазистационарного состояния необходимо либо тектонически вывести гранитоидный батолит на верхние уровни, либо изменить тепловой режим в земной коре. Если предположение о тепловом влиянии Эмейшаньского плюма непосредственно или же мантийного диапира достоверно, то батолит повторно переплавляется и гомогенизируется, а затем испытывает гранитогнейсовый диапиризм. В дальнейшем происходит тектоническое экспонирование гранитоидного батолита как метаморфического ядра кордильерского типа (рис. 13). Таким образом, гранитоидная магма в истории формирования массива Шонгчай существовала в жидком (полужидком) состоянии по крайней мере два раза, в соответствии с термохронограммой (см. рис. 6). Первый этап был связан с историей зарождения гранитной магмы и формированием гигантской магматической камеры, остывание которой при стандартном температурном градиенте в земной коре (30 °C/км) произошло за 13–20 млн лет (465–445 млн лет) с кристаллизацией большей ее части.

Второй этап связан с воздействием Эмейшаньского плюма (250–200 млн лет); этот временной интервал, согласно математическим расчетам, включал прогрессивную и регрессивную (плавление – кристаллизация) стадии, протекавшие в условиях конвергентности Эмейшаньского плюма и Индосинийского орогенеза ($\Delta t \approx 50$ млн лет).

Важно подчеркнуть, что существование гранитного слоя, еще сохранившего остатки расплава, вероятнее всего, являлось необходимой и достаточной предпосылкой (в силу низких вязкопластичных свойств) к началу формирования пологозалегающего срыва (decollement) и, как следствие, комплекса метаморфического ядра кордильерского типа. В пользу этого заключения, кроме термохронологических данных, свидетельствует событийная корреляция массива Шонгчай с формированием впадины Туле, сложенной преимущественно кислыми вулканитами и имеющей все структурно-геологические признаки одновременного формирования с гранитогнейсовым куполом и синкinemатической впадиной (система МСС), что харак-

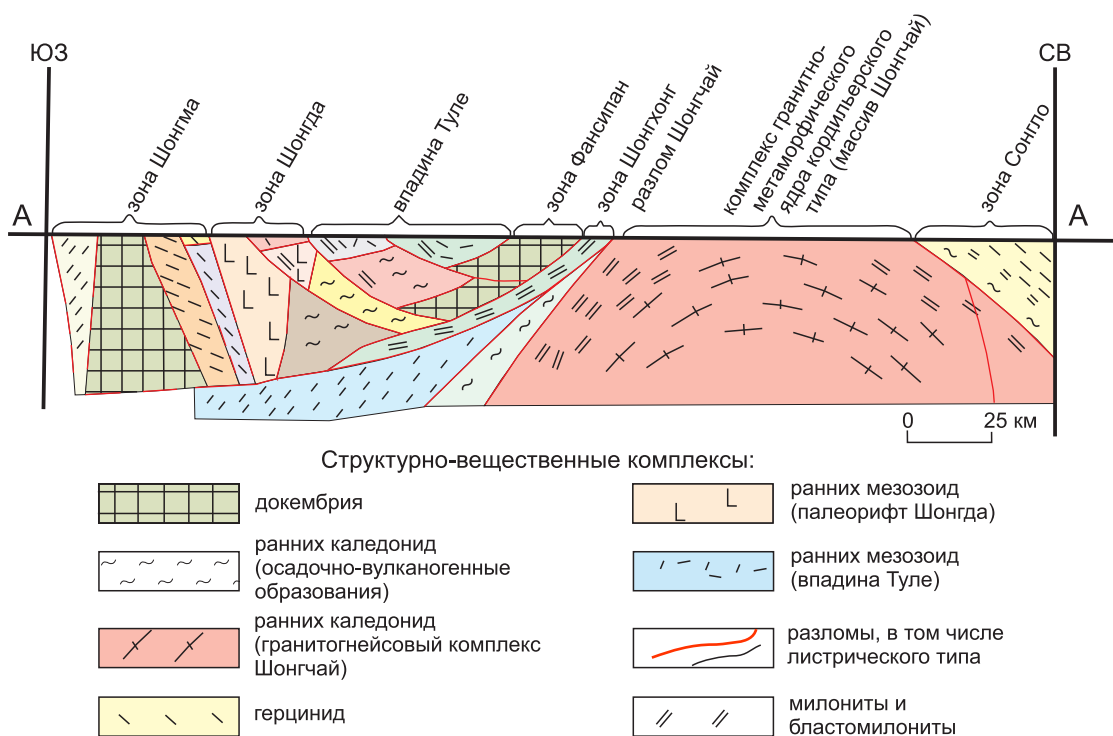


Рис. 14. Структурно–геологическая схема Северного Вьетнама, отражающая взаимосвязь комплекса метаморфического ядра Шонгчай и впадины Туле ([Ponomareva et al., 1997], с изменениями).

Fig. 14. Schematic structural geological map of Northern Vietnam. It shows an interrelation between the Song-Chai metamorphic core complex and the Thule depression (modified after [Ponomareva et al., 1997]).

терно для геодинамической обстановки калифорнийского типа (рис. 14).

В заключение необходимо подчеркнуть, что проведенный термохронологический анализ массива Шонгчай позволяет поставить вопрос о геодинамической природе редкометалльно-гранитных месторождений (Sn-W, In) Северного Вьетнама, предпосылкой для формирования которых могли быть остаточные расплавы лейкогранитного состава в возрастном интервале от триаса до мела включительно (например, Sn-месторождения Пиа-Оак и др. [Phan et al., 2010; Vladimirov et al., 2012]).

6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкция термической истории массива Шонгчай и математическое тестирование возрастных рубежей (465–20 млн лет) позволили обосновать динамику трансформации гранитоидного батолита в комплекс метаморфического ядра кордильерского типа. Впервые показано, что зарождение и последующее остывание гранитоидного батолита Шонгчай произошли в период каледонской орогении (465–445 млн лет, $\Delta t \approx 18$ млн лет), а затем произошло повторное переплавление магматической камеры (термолушки) под воздействием

Эмешаньского плюма или мантийного диапира, приведших к изменению теплового режима в коре (250–230 млн лет). Длительность существования гранитного расплава в виде «полумамерзшего» гранитного слоя (магматической камеры, ареал-плутон) оценивается в ~50 млн лет и совпадает с Индосинийской орогенией в Юго-Восточной Азии. На постколлизивной стадии Индосинийского орогенеза в условиях крупномасштабного растяжения континентальной литосферы и трансформного скольжения литосферных плит произошел полого-залегающий срыв в земной коре (decollement) и трансформация гранитоидного батолита в комплекс метаморфического ядра, впоследствии испытавшего многократные импульсивные подвижки и последовательное тектоническое экспонирование гранитоидного купола на верхние горизонты земной коры вплоть до его вывода на современную эрозионную поверхность: $198 \pm 2 \Rightarrow 169 \pm 2 \Rightarrow 143 \pm 2 \Rightarrow 81 \pm 2 \Rightarrow 20 \pm 1 \Rightarrow$ настоящее время (млн лет). Длительное существование гранитной магмы, испытавшей дифференциацию ($\Delta t \sim 20$ –50 млн лет), позволяет пересмотреть принципы глубинного прогнозирования редкометалльно-гранитных месторождений, основываясь на термохронологических исследованиях и их интерпретации (заявка на патент находится в стадии подготовки).

7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы выражают искреннюю благодарность за многолетнее обсуждение поднятых проблем и критические замечания к статье академику А.И. Ханчуку, д.г.-м.н. Н.Н. Круку, д.г.-м.н. В.А. Пономарчуку, а также за участие в совместных экспедиционных работах и авторские результаты исследований к.г.-м.н. М.Л. Куйбиде, к.г.-м.н. Ngo Thi Phuong (ИГС, ВАНТ, г. Ханой, Вьетнам).

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН, а также в рамках планов НИР Новосибирского и Томского государственных универ-

ситетов, при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 5.1688.2017/ПЧ, экспедиционные работы), Правительства Российской Федерации (гранты № 220, № 14.Y26.31.0012, 14.Y26.31.0018, аналитические работы), РФФИ (проекты № 16-05-00128а, 17-05-00936а, № 17-55-540001, VAST.HTQT.NGA.06/17-18, обработка материалов и оформление статьи).

Термохронологические исследования выполнены в ЦКП «Многоэлементные и изотопные исследования СО РАН» (г. Новосибирск).

8. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Antipin V.S., Makrygina V.A., Petrova Z.I., 2006. Comparative geochemistry of granitoids and metamorphic country rocks in the western Angara-Vitim batholith, western Baikal area. *Geochemistry International* 44 (3), 258–273. <https://doi.org/10.1134/S0016702906030049>.
- Boehnke P., Watson E.B., Trail D., Harrison T.M., Schmitt A.K., 2013. Zircon saturation rerevisited. *Chemical Geology* 351, 324–334. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.05.028>.
- Bogatikov O.A. (Ed.), 1983. Igneous rocks. Vol. 1. Classification, Nomenclature, Petrography. Nauka, Moscow, 368 p. (in Russian) [Магматические горные породы. Т. 1. Классификация, номенклатура, петрография / Ред. О.А. Богатиков. М.: Наука, 1983. 368 с.].
- Boynton W.V., 1984. Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies. In: P. Henderson (Ed.), Rare earth element geochemistry. Elsevier, Amsterdam, p. 63–114.
- Carter A., Roques D., Bristlow C., Kinny P., 2001. Understanding Mesozoic accretion in Southeast Asia: significance of Triassic thermotectonism (Indosinian orogeny) on Vietnam. *Geology* 29 (3), 211–214. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2001\)029<0211:UMISA>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2001)029<0211:UMISA>2.0.CO;2).
- Chan Wan Chi, Nguyen Suan Tung (Eds.), 1977. Geological map of the northern part of Vietnam. Scale 1:1000000. Hanoi [Геологическая карта северной части Вьетнама. М-б 1:1000000 / Ред. Чан Ван Чи, Нгуен Суан Тунг. Ханой, 1977].
- Chen B., Jahn B.M., 2004. Genesis of post-collisional granitoids and basement nature of the Junggar Terrane, NW China: Nd–Sr isotope and trace element evidence. *Journal of Asian Earth Sciences* 23 (5), 691–703. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(03\)00118-4](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(03)00118-4).
- Chen Z., Lin W., Faure M., Lepvrier C., Van Vuong N., Van Tich V., 2014. Geochronology and isotope analysis of the Late Paleozoic to Mesozoic granitoids from northeastern Vietnam and implications for the evolution of the South China block. *Journal of Asian Earth Sciences* 86, 131–150. <https://dx.doi.org/10.1016/j.jseae.2013.07.039>.
- Crittenden Jr. M.D., Coney P.J., Davis G.H., 1980. Cordilleran Metamorphic Core Complexes. Geological Society of America Memoirs, vol. 153, 486 p. <https://doi.org/10.1130/MEM153>.
- Davis J.W., 2010. Thermochronology and Cooling Histories of Plutons: Implications for Incremental Pluton Assembly. University of North Carolina at Chapel Hill, 118 p.
- Dodson M.H., 1973. Closure temperature in cooling geochronological and petrological systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 40 (3), 259–274. <https://doi.org/10.1007/BF00373790>.
- Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Mazukabzov A.M., Ivanov A.V., 2013. Late Paleozoic – Mesozoic subduction-related magmatism at the southern margin of the Siberian continent and the 150 million-year history. *Journal of Asian Earth Sciences* 62, 79–97. <https://doi.org/10.1016/j.jseae.2012.07.023>.
- Dortman N.B. (Ed.), 1984. Physical Properties of Rocks and Minerals (Petrophysics). Handbook of Geophysics. Nedra, Moscow, 455 p. (in Russian) [Физические свойства горных пород и полезных ископаемых (петрофизика). Справочник геофизика / Ред. Н.Б. Дортман. М.: Недра, 1984. 455 с.].
- Dovzhikov A.E., Bui Fu Mi, Vasilevskaya E.D., Zhamoyda A.I., Ivanov G.V., Izokh E.P., Le Dinh Xiu, Mareichev A.M., Nguyen Van Tien, Nguyen Tyong Tri, Tran Dic Luong, Pham Van Quang, Pham Dinh Long, 1965. Geology of North Vietnam. Hanoi, Vietnam, Science and Technology, 668 p. (in Russian) [Довжигов А.Е., Буй Фу Ми, Василевская Е.Д., Жамойда А.И., Иванов Г.В., Изох Э.П., Ле Динь Хью, Марейчев А.М., Нгуен Ван Тиен, Нгуен Тьонг Три, Тран Дык Лонг, Фам Ван Куанг, Фам Динь Лонг. Геология Северного Вьетнама. Ханой, Вьетнам: Наука и Техника, 1965, 668 с.].

- Gilley L.D., Harrison T.M., Leloup P.H., Ryerson F.J., Lovera O.M., Wang J.-H., 2003. Direct dating of left-lateral deformation along Red River shear zone, China and Vietnam. *Journal of Geophysical Research* 108 (B2), 2127. <https://doi.org/10.1029/2001JB001726>.
- Han B.F., Wang S.G., Jahn B.M., Hong D.W., Kagami H., Sun Y.L., 1997. Depleted mantle magma source for the Ulungur River A-type granites from north Xinjiang, China: geochemistry and Nd-Sr isotopic evidence, and implication for Phanerozoic crustal growth. *Chemical Geology* 138 (3–4), 135–159. [https://doi.org/10.1016/S0009-2541\(97\)00003-X](https://doi.org/10.1016/S0009-2541(97)00003-X).
- Hodges K.V., 2003. Geochronology and thermochronology in orogenic system. In: H.D. Holland, K.K. Turekian (Eds.), *Treatise on geochemistry*. Elsevier, Oxford, p. 263–292. <https://doi.org/10.1016/B0-08-043751-6/03024-3>.
- Khanchuk A.I., Ivanov V.V., 1999. Meso-Cenozoic geodynamic settings and gold mineralization of Russian Far East. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 40 (11), 1635–1645.
- Kirdyashkin A.G., Kirdyashkin A.A., 2016. Parameters of plumes of North Asia. *Russian Geology and Geophysics* 57 (11), 1535–1550. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.10.002>.
- Kuzmin M.I., Yarmolyuk V.V., Kravchinsky V.A., 2010. Phanerozoic hot spot traces and paleogeographic reconstructions of the Siberian continent based on interaction with the African large low shear velocity province. *Earth-Science Reviews* 102 (1–2), 29–59. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2010.06.004>.
- Lister G.S., Davis G.A., 1989. The origin of metamorphic core complexes and detachment faults formed during Tertiary continental extension in the northern Colorado River region, USA. *Journal of Structural Geology* 11 (1–2), 65–94. [https://doi.org/10.1016/0191-8141\(89\)90036-9](https://doi.org/10.1016/0191-8141(89)90036-9).
- Litvinovsky B.A., Tsygankov A.A., Jahn B.M., Katzir Y., Be'eri-Shlevin Y., 2011. Origin and evolution of overlapping calc-alkaline and alkaline magmas: The Late Palaeozoic post-collisional igneous province of Transbaikalia (Russia). *Lithos* 125 (3–4), 845–874. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2011.04.007>.
- Litvinovsky B.A., Zanzilevich A.N., Alakshin A.N., Podladchikov Yu.Yu., 1993. The Angara-Vitim Batholith – the Largest Granitoid Pluton. UIGGM SB RAS, Novosibirsk, 143 p. (in Russian) [Литвиновский Б.А., Занвилевич А.Н., Алакишин А.М., Подладчиков Ю.Ю. Анггаро-Витимский батолит – крупнейший гранитоидный плутон. ОИГГМ СО РАН, Новосибирск, 1993. 143 с.].
- Maluski H., Lepvrier C., Jolivet L., Carter A., Roques D., Beyssac O., Ta Trong Tange, Nguyen Duc Thangf, Avigadd D., 2001. Ar-Ar and fission-track ages in the Song Chay Massif: Early Triassic and Cenozoic tectonics in northern Vietnam. *Journal of Asian Earth Sciences* 19 (1–2), 233–248. [https://doi.org/10.1016/S1367-9120\(00\)00038-9](https://doi.org/10.1016/S1367-9120(00)00038-9).
- Martynov Yu.A., Khanchuk A.I., 2013. Cenozoic volcanism of the eastern Sikhote Alin: Petrological studies and outlooks. *Petrology* 21 (1), 85–99. <https://doi.org/10.1134/S0869591113010049>.
- Mazukabzov A.M., Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Paderin I.P., 2010. The Late Paleozoic geodynamics of the West Transbaikalian segment of the Central Asian fold belt. *Russian Geology and Geophysics* 51 (5), 482–491. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.04.008>.
- McKenzie D., Bickle M.J., 1988. The volume and composition of melt generated by extension of the lithosphere. *Journal of Petrology* 29 (3), 625–679. <https://doi.org/10.1093/petrology/29.3.625>.
- Molnar P., Tapponnier P., 1975. Cenozoic tectonics of Asia: effects of a continental collision. *Science* 189 (4201), 419–426. <https://doi.org/10.1126/science.189.4201.419>.
- Morozova I.M., Rublev A.G., 1987. K-Ar isotope systems of polymetamorphic rocks. In: Yu.A. Shukolyukov (Ed.), *Isotopic dating of metamorphism and metasomatism processes*. Nauka, Moscow, p. 19–28. (in Russian) [Морозова И.М., Рублев А.Г. Калий-аргоновые системы полиметаморфических пород // Изотопное датирование процессов метаморфизма и метасоматоза / Ред. Ю.А. Шуколюков. М.: Наука, 1987. С. 19–28].
- Murzintsev N.G., Travin A.V., Kotler P.D., Vladimirov A.G., 2016. Numerical modeling of the thermal history and area of the thermal influence of the granite massif to host rocks and the behavior of K-Ar systems in geochronometer minerals during these processes. In: *Petrology of magmatic and metamorphic complexes. Issue 8. Proceedings of the All-Russian Petrographic Conference with international participation*. Publishing House of Tomsk CSTI, Tomsk, p. 256–259 (in Russian) [Мурзинцев Н.Г., Травин А.В., Котлер П.Д., Владимиров А.Г. Численное моделирование термической истории и ареала термического влияния гранитного массива на вмещающие породы и поведения К-Ар системы в минералах-геохронометрах при этих процессах // Петрология магматических и метаморфических формаций. Вып. 8. Материалы Всероссийской петрографической конференции с международным участием. Томск: Изд-во Томского ЦНТИ, 2016. С. 256–259].
- Murzintsev N.G., Travin A.V., Vladimirov A.G., Tsygankov A.A., 2018. Reconstruction of thermal histories of granitoid batholiths based on multisystem isotopic dating and numerical modeling of cooling and crystallization of granitoid melts. In: *Methods and geological results of studying isotopic geochronometric systems of minerals and rocks. Russian conference on isotope geochronology (Moscow, June 5–7, 2018)*. IGEM RAS, Moscow, p. 224–227 (in Russian) [Мурзинцев Н.Г., Травин А.В., Владимиров А.Г., Цыганков А.А. Реконструкция термических историй гранитоидных батолитов на основе мультисистемного изотопного датирования и численного моделирования остывания и кристаллизации гранитоидных расплавов // Методы и геологические результаты изу-

- чения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. Российская конференция по изотопной геохронологии (5–7 июня 2018 г., г. Москва). М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 224–227].
- Nguyen Khoa Son (Ed.), 2011. *Geology and Earth Resources of Viet Nam*. Publishing House for Science and Technology, Hanoi, 645 p.
- Phan L.A., Vladimirov A.G., Kruk N.N., Polyakov G.V., Ponomarchuk V.A., Khoa Ch.Ch., Phuong N.T., Kuybida M.L., Annikova I.Yu., Pavlova G.G., Kiseleva V.Yu., 2010. Stanniferous granites of Vietnam: Rb–Zr and Ar–Ar isotope age, composition, sources, and geodynamic formation conditions. *Doklady Earth Sciences* 432 (2), 839–845. <https://doi.org/10.1134/S1028334X10060280>.
- Polyansky O.P., Reverdatto V.V., Babichev A.V., Sverdlova V.G., 2016. The mechanism of magma ascent through the solid lithosphere and relation between mantle and crustal diapirism: numerical modeling and natural examples. *Russian Geology and Geophysics* 57 (6), 843–857. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.05.002>.
- Ponomareva A.P., Vladimirov A.G., Fan Luu An, Rudnev S.N., Kruk N.N., Ponomarchuk V.A., Bibikova E.V., Zhuravlev D.Z., 1997. The Shong-Chai high-alumina granite massif in Northern Vietnam: Substantiation of the Ordovician age, petrogenesis, and tectonic position. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 38 (11), 1792–1806.
- Roger F., Leloup P.H., Jolivet M., Lacassin R., Trinh P.T., Brunel M., Seward D., 2000. Long and complex thermal history of the Song Chay metamorphic dome (Northern Vietnam) by multi-system geochronology. *Tectonophysics* 321 (4), 449–466. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00085-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00085-8).
- Rudnev S.N., Kovach V.P., Ponomarchuk V.A., 2013. Vendian – Early Cambrian island-arc plagiogranitoid magmatism in the Altai–Sayan folded area and in the Lake Zone of western Mongolia (geochronological, geochemical, and isotope data). *Russian Geology and Geophysics* 54 (10), 1272–1287. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.09.010>.
- Shand S.J., 1943. *The Eruptive Rocks*. 2nd edition, John Wiley, New York, 444 p.
- Shanin L.L., 1979. Reliability criteria and possible causes of the radiological dating distortions. In: O.A. Kharnas (Ed.), *Reliability criteria for radiological dating methods*. Nauka, Moscow, p. 6–13 (in Russian) [Шанин Л.Л. Критерии надежности и возможные причины искажения радиологических датировок // Критерии надежности методов радиологического датирования / Ред. О.А. Харнас. М.: Наука, 1979. С. 6–13].
- Shokalsky S.P., Babin G.A., Vladimirov A.G., Borisov S.M., 2000. Correlation of magmatic and Metamorphic Complexes of the Western Part of the Altai-Sayan Folded Area. Publishing House of SB RAS, Novosibirsk, 187 p. (in Russian) [Шокальский С.П., Бабин Г.А., Владимиров А.Г., Борисов С.М. Корреляция магматических и метаморфических комплексов западной части Алтае-Саянской складчатой области. Новосибирск: Изд-во СО РАН, филиал «Гео», 2000. 187 с.].
- Sklyarov E.V., Mazukabzov A.M., Mel'nikov A.I., 1997. Metamorphic Cores Complexes of Cordilleran-Type. UIGGM SB RAS, Novosibirsk, 182 p. (in Russian) [Скляр Е.В., Мазукабзов А.М., Мельников А.И. Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа. Новосибирск: Изд-во СО РАН, НИЦ ОИГГМ, 1997. 182 с.].
- Sobolev A.V., Sobolev S.V., Kuz'min D.V., Malitch K.N., Petrunin A.G., 2009. Siberian meimechites: origin and relation to flood basalts and kimberlites. *Russian Geology and Geophysics* 50 (12), 993–1033. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.11.002>.
- Sun S.-S., McDonough W.F., 1989. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes. In: A.D. Saunders, M.J. Norry (Eds.), *Magmatism in the ocean basins*. Geological Society, London, Special Publications, vol. 42, p. 313–345. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.1989.042.01.19>.
- Tran T.-H., Polyakov G.V., Tran T.-A., Borisenko A.S., Izokh A.E., Balykin P.A., Ngo T.-P., Pham T.-D., 2016. Intraplate Magmatism and Metallogeny of North Vietnam. Springer International Publishing Switzerland, 372 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-25235-3>.
- Travin A.V., 2016. Thermochronology of Early Paleozoic collisional and subduction-collisional structures of Central Asia. *Russian Geology and Geophysics* 57 (3), 434–450. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2016.03.006>.
- Travin A.V., Vladimirov A.G., Tsygankov A.A., Annikova I.Yu., Murzintsev N.G., Mikheev E.I., Khubanov V.B., 2018. Thermochronology of the Central Asian Orogenic Belt granitoid batholiths. In: *Methods and geological results of studying isotopic geochronometric systems of minerals and rocks*. Russian conference on isotope geochronology (Moscow, 5–7 June 2018). ИГЕМ РАН, Moscow, p. 356–358 (in Russian) [Травин А.В., Владимиров А.Г., Цыганков А.А., Анникова И.Ю., Мурзинцев Н.Г., Михеев Е.И., Хубанов В.Б. Термохронология гранитоидных батолитов Центрально-Азиатского складчатого пояса // Методы и геологические результаты изучения изотопных геохронометрических систем минералов и пород. Российская конференция по изотопной геохронологии (5–7 июня 2018 г., г. Москва). М.: ИГЕМ РАН, 2018. С. 356–358].
- Travin A.V., Vladimirov A.G., Tsygankov A.A., Murzintsev N.G., Mikheev E.I., Khubanov V.B., 2019. Long existence of granitic magma inferred from investigation of the Angaro-Vitim batholith, Russia. *Nature* (in press).
- Tsygankov A.A., 2014. Late Paleozoic granitoids in western Transbaikalia: sequence of formation, sources of magmas, and geodynamics. *Russian Geology and Geophysics* 55 (2), 153–176. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2014.01.004>.

- Tsygankov A.A., Litvinovsky B.A., Jahn B.M., Reichow M.K., Liu D.Y., Larionov A.N., Presnyakov S.L., Lepekhina Ye.N., Sergeev S.A., 2010. Sequence of magmatic events in the Late Paleozoic of Transbaikalia, Russia (U-Pb isotope data). *Russian Geology and Geophysics* 51 (9), 972–994. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2010.08.007>.
- Tsygankov A.A., Matukov D.I., Berezhnaya N.G., Larionov A.N., Posokhov V.F., Tsyrenov B.T., Khromov A.A., Sergeev S.A., 2007. Late Paleozoic granitoids of western Transbaikalia: magma sources and stages of formation. *Russian Geology and Geophysics* 48 (1), 120–140. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2006.12.011>.
- Tuttle O.F., Bowen N.L., 1958. Origin of Granite in the Light of Experimental Studies in the System $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$ - KAlSi_3O_8 - SiO_2 - H_2O . Geological Society of America Memoirs, vol. 74, 153 p. <https://doi.org/10.1130/MEM74>.
- Vladimirov A.G., Annikova I.Yu., Murzintsev N.G., Travin A.V., Sokolova E.N., Smirnov S.Z., Gavryushkina O.A., Oitseva T.A., 2019. Age stages and duration of formation the Kalguta molybdenum-tungsten ore-magmatic system (Altai Mountains): thermochronology and mathematical modeling. *Russian Geology and Geophysics* (in press).
- Vladimirov A.G., Kruk N.N., Khromykh S.V., Polyansky O.P., Chervov V.V., Vladimirov V.G., Travin A.V., Babin G.A., Kuibida M.L., Khomyakov V.D., 2008. Permian magmatism and lithospheric deformation in the Altai caused by crustal and mantle thermal processes. *Russian Geology and Geophysics* 49 (7), 468–479. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2008.06.006>.
- Vladimirov A.G., Kruk N.N., Rudnev S.N., Khromykh S.V., 2003. Geodynamics and granitoid magmatism of collision orogens. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 44 (12), 1321–1338.
- Vladimirov A.G., Phan Luu Anh, Kruk N.N., Smirnov S.Z., Annikova I.Yu., Pavlova G.G., Kuibida M.L., Moroz E.N., Sokolova E.N., Astrelina E.I., 2012. Petrology of the tin-bearing granite-leucogranites of the Piaoak Massif, Northern Vietnam. *Petrology* 20 (6), 545–566. <https://doi.org/10.1134/S0869591112050074>.
- Vladimirov A.G., Travin A.V., Murzintsev N.G., Fan Luu Anh, Tsygankov A.A., Murzintsev N.G., Mikheev E.I., Miryasova T.V., 2018b. Thermal histories of granitoid batholiths at the deep levels of the Earth's crust and their transformation into complexes of metamorphic core complexes in settings of large-scale continental lithosphere extension (example of Central and Southeast Asia). In: *Geology, Minerals and Geoecology of Bashkortostan, The Urals and adjacent territories. Proceedings of the XII Interregional Scientific and Practical Conference. IG UFRC RAS, Ufa*, p. 7–13 (in Russian) [Владимиров А.Г., Травин А.В., Мурзинцев Н.Г., Фан Лью Ань, Цыганков А.А., Мурзинцев Н.Г., Михеев Е.И., Мирясова Т.В. Термические истории гранитоидных батолитов на глубинных уровнях земной коры и их трансформация в комплексы метаморфических ядер при крупномасштабном растяжении континентальной литосферы (на примере Центральной и Юго-Восточной Азии) // Геология, полезные ископаемые и проблемы геоэкологии Башкортостана, Урала и сопредельных территорий: Материалы XII Межрегиональной научно-практической конференции. Уфа: ИГ УФИЦ РАН, 2018. С. 7–13].
- Vladimirov A.G., Travin A.V., Phan Luu Anh, Murzintsev N.G., Mikheev E.I., 2018a. Thermal history (U/Pb, Ar/Ar) and the transformation dynamics of the Song Chai granitoid batholith (North Vietnam). In: *Correlation of the altaides and uralides: deep structure of lithosphere, stratigraphy, magmatism, metamorphism, geodynamics and metallogeny. Materials of the 4th International scientific conference (Novosibirsk, 2–6 April, 2018). Publishing House of SB RAS, Novosibirsk*, p. 22–24 (in Russian) [Владимиров А.Г., Травин А.В., Фан Лью Ань, Мурзинцев Н.Г., Михеев Е.И. Термическая история (U/Pb, Ar/Ar) и динамика трансформации глубинного гранитоидного батолита Шонгчай (Северный Вьетнам) // Корреляция алтаид и уралид: магматизм, метаморфизм, стратиграфия, геохронология, геодинамика и металлогения: Материалы IV международной научной конференции (2–6 апреля 2018 г., г. Новосибирск). Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2018. С. 22–24].
- Wang Bo, Cluzel D., Shu L., Faure M., Charvet J., Yan Chen, Meffre S., de Jong K., 2009. Evolution of calc-alkaline to alkaline magmatism through Carboniferous convergence to Permian transcurrent tectonics, western Chinese Tianshan. *International Journal of Earth Sciences* 98, 1275–1298. <https://doi.org/10.1007/s00531-008-0408-y>.
- Watson E.B., Harrison T.M., 1983. Zircon saturation revisited: temperature and composition effects in a variety of crustal magma types. *Earth and Planetary Science Letters* 64 (2), 295–304. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(83\)90211-X](https://doi.org/10.1016/0012-821X(83)90211-X).
- Yan D.-P., Zhou M.-Fu, Wang C.Y., Xia B., 2006. Structural and geochronological constraints on the tectonic evolution of the Dulong-Song Chay tectonic dome in Yunnan province, SW Chins. *Journal of Asian Earth Science* 28 (4–6), 332–353. <https://doi.org/10.1016/j.jseas.2005.10.011>.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., 2003. Batholiths and geodynamics of batholith formation in the Central Asian fold belt. *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 44 (12), 1260–1274.
- Yarmolyuk V.V., Kovalenko V.I., Kuz'min M.I., 2000. North Asian superplume activity in the Phanerozoic: magmatism and geodynamics. *Geotectonics* 34 (5), 343–366.
- Yarmolyuk V.V., Kuzmin M.I., Kozlovsky A.M., 2013. Late Paleozoic – Early Mesozoic within-plate magmatism in North Asia: traps, rifts, giant batholiths, and the geodynamics of their origin. *Petrology* 21 (2), 101–126. <https://doi.org/10.1134/S0869591113010062>.
- Zhao X.-F., Zhou M.L., Li J.-W., Wu F.-Y., 2008. Association of Neoproterozoic A-type and I-type granites in South China: implications for generation of A-type granites in a subduction-related environment. *Chemical Geology* 257 (1–2), 1–15. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2008.07.018>.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ | INFORMATION ABOUT AUTHORS

Александр Геннадьевич Владимиров

докт. геол.-мин. наук, профессор

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина, 50, Россия

✉ e-mail: vladimir@igm.nsc.ru

 <https://orcid.org/0000-0001-7884-2601>

Aleksander G. Vladimirov

Doctor of Geology and Mineralogy, Professor

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia

Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia

Tomsk State University
50 Lenin ave., Tomsk 634050, Russia

Алексей Валентинович Травин

докт. геол.-мин. наук

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина, 50, Россия

e-mail: travin@igm.nsc.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-5640-4560>

Aleksei V. Travin

Doctor of Geology and Mineralogy

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia

Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia

Tomsk State University
50 Lenin ave., Tomsk 634050, Russia

Фан Лыу Ань

канд. геол.-мин. наук

Institute of Geological Sciences,
Vietnam Academy of Science and Technology
84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam

e-mail: luuanh_phan@yahoo.com

Phan Luu Anh

Candidate of Geology and Mineralogy

Institute of Geological Sciences,
Vietnam Academy of Science and Technology
84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam

Николай Геннадьевич Мурзинцев

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

e-mail: murzintsevng@gmail.com

Nikolai G. Murzintsev

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia

Ирина Юрьевна Анникова

канд. геол.-мин. наук

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

Томский государственный университет
634050, Томск, пр. Ленина, 50, Россия

e-mail: ira99@igm.nsc.ru

 <https://orcid.org/0000-0002-0045-4091>

Irina Yu. Annikova

Candidate of Geology and Mineralogy

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia

Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia

Tomsk State University
50 Lenin ave., Tomsk 634050, Russia

Евгений Игоревич Михеев

Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН
630090, Новосибирск, пр. Академика Коптюга, 3, Россия

Новосибирский национальный исследовательский
государственный университет
630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

e-mail: mikheev@igm.nsc.ru

Evgenii I. Mikheev

V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of RAS
3 Academician Koptug ave., Novosibirsk 630090, Russia

Novosibirsk State University
2 Pirogov street, Novosibirsk 630090, Russia

Нгуен Ань Зыонг

Institute of Geological Sciences,
Vietnam Academy of Science and Technology
84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam

e-mail: luuanh_phan@yahoo.com

Nguyen Anh Duong

Institute of Geological Sciences,
Vietnam Academy of Science and Technology
84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam

Чан Тхи Ман

Institute of Geological Sciences,
Vietnam Academy of Science and Technology
84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam

e-mail: luuanh_phan@yahoo.com

Tran Thi Man

Institute of Geological Sciences,
Vietnam Academy of Science and Technology
84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam

Чан Тхи Лан

Institute of Geological Sciences,
Vietnam Academy of Science and Technology
84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam

e-mail: luuanh_phan@yahoo.com

Tran Thi Lan

Institute of Geological Sciences,
Vietnam Academy of Science and Technology
84 Chua Lang, Dong Da, Hanoi, Vietnam