

УДК 551.24:550.93

## ТЕРМОХРОНОЛОГИЯ КОМПЛЕКСА МЕТАМОРФИЧЕСКОГО ЯДРА КОРДИЛЬЕРСКОГО ТИПА, МАССИВ ШОНГЧАЙ, СЕВЕРНЫЙ ВЬЕТНАМ

А. Г. Владимиров<sup>1,2,3,\*</sup>, А. В. Травин<sup>1,2,3</sup>, Фан Лыу Ань<sup>4</sup>,  
Н. Г. Мурзинцев<sup>1</sup>, Е. И. Михеев<sup>1,2</sup>

Представлено академиком РАН А.И. Ханчуком 15.02.2019 г.

Поступило 21.02.2019 г.

На основе реконструкции термической эволюции гнейсогранитного массива Шонгчай (Северный Вьетнам) обосновано длительное существование гранитоидной магмы на глубинных уровнях земной коры ( $H = 15–20$  км,  $\Delta t \sim 20\div 50$  млн лет). Геодинамический анализ и математическое моделирование истории консолидации и остывания гранитоидного батолита показывает, что эта магматическая камера представляла собой термолловушку на нижнем уровне земной коры, длительное время сохранявшую остаточный гранитный расплав. Выведение этой термолловушки из квазистационарного состояния происходит в зонах трансформного скольжения литосферных плит и сопровождается тектоническим экспонированием крупных 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, комплексы метаморфических ядер, геохронология, термохронология, математическое моделирование, Вьетнам, массив Шонгчай, металлогеническое прогнозирование.

DOI: <https://doi.org/10.31857/S0869-56524886630-639>

Комплексы метаморфических ядер кордильерского типа впервые охарактеризованы на западном побережье США [1]. Детальные исследования позволили обосновать значимость этих специфических геологических структур как прямых индикаторов крупномасштабного растяжения континентальной литосферы в трансформных геодинамических обстановках. Позднее эти комплексы были обнаружены в разных регионах мира (Альпы, Аляска, Забайкалье, Новая Зеландия, Вьетнам и др.), где для них подтверждена тесная пространственно-временная связь с Калифорнийской (трансформной) геодинамической обстановкой и разработаны структурно-петрологические критерии диагностики [2–8]. Наиболее дискуссионным остаётся генезис метаморфических ядер, которые повсеместно имеют гранитный состав, отвечающий эвтектике в гаплог-

ранитной системе “Qz–Ab–Or–H<sub>2</sub>O”, т.е. – магматическое происхождение. Если формирование и последующее тектоническое экспонирование метаморфических ядер на верхние горизонты земной коры происходило с участием гранитной магмы, то встаёт вопрос о длительности существования крупных объёмов 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 настоящем сообщении на примере комплекса метаморфического ядра Шонгчай (Вьетнам).

### ГЕОЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА

Массив Шонгчай является самым крупным во Вьетнаме ( $S = 2500$  км<sup>2</sup>), занимая ключевую позицию в области сочленения раннекаледонских (катазиатских), герцинских и индосинийских структур Юго-Восточной Азии [10]. Согласно структурно-петрологическим наблюдениям (рис. 1), этот массив в позднем мезозое–кайнозое был тесно связан с пологозалегающим тектоническим сдвигом и трансрегиональной сдвигово-раздвиговой зоной Сонг Ма – Красной Реки [3, 5].

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева  
Сибирского отделения Российской Академии наук,  
Новосибирск

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский  
государственный университет

<sup>3</sup> Национальный исследовательский Томский государственный  
университет

<sup>4</sup> Институт геологических наук Вьетнамской академии наук  
и технологий, Ханой, Вьетнам

\*E-mail: [vladimir@igm.nsc.ru](mailto:vladimir@igm.nsc.ru)

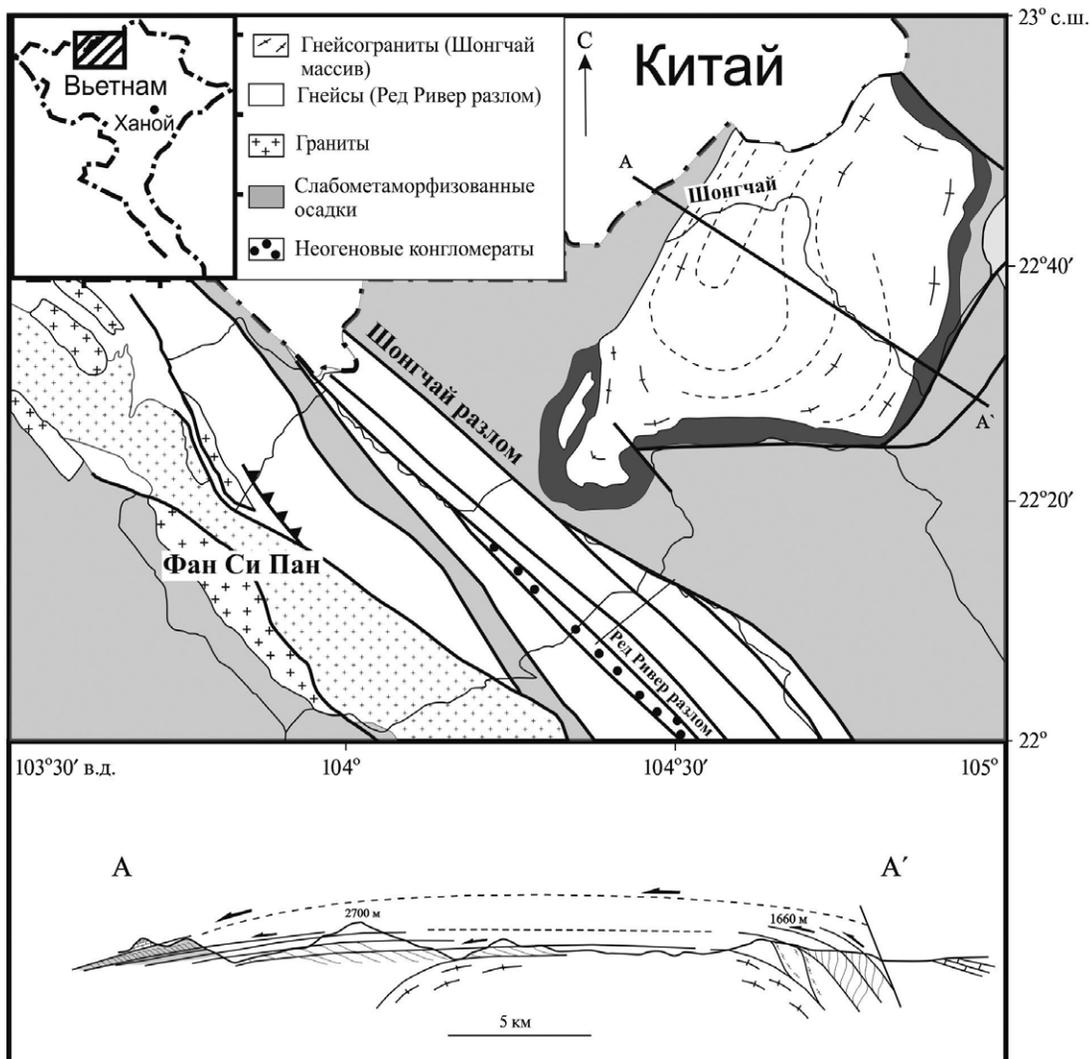


Рис. 1. Структурная схема, построенная на основе геологической карты Вьетнама масштаба 1:200 000 [10] и разрез через гнейсо-гранитовый массив Шонгчай [5] с авторскими изменениями и дополнениями.

Массив имеет ромбовидную форму, окружён бластомилонитовой каймой и сложен гранитоидами (рис. 2), которые повсеместно имеют гнейсовидную текстуру даже в дайках аплитов и пегматитов, лишь на отдельных участках отмечаются слабо-гнейсовидные и массивные породы, в экзоконтакте с ними встречаются роговики.

Гнейсовидность совпадает с простираем контактов, проявлены черты динамометаморфической природы, выражающиеся в чередовании полос лейкократового и меланократового материала, гранобластовой структуре кварца с зубчатым сочленением и волнистым погасанием, грануляции крупных микроклиновых вкрапленников и т.д. Динамометаморфизм сопровождался полной перекристаллизацией гранитоидов, о чём свидетельствует практически незональный плагиоклаз во всех разновидностях гранитоидов [3].

Вмещающие породы характеризуются простираем, грубо конформным с линией контакта, и крутым (80°–90°) падением в сторону от контакта. По составу – это чередующиеся амфиболовые, биотит-амфиболовые, биотитовые (±гранат) сланцы с различным содержанием кварца и плагиоклаза. В биотитовых сланцах встречаются 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. Различными исследователями этим породам присваивался возраст от верхнего протерозоя до силура [10]. Сейчас установлено, что силурийский возраст отвечал пику амфиболитового метаморфизма, наложенному на массив Шонгчай и его складчатое обрамление, 428 ± 5 млн лет [4].

Таблица 1. Состав представительных проб гранитоидов массива Шонгчай

	Натриевая серия		Калинатриевая и калиевая серии					
	4-99/2	4-95/1	3-73a	3-75d	4-111/2	4-107/1	4-88/1	3-75g
SiO <sub>2</sub> , мас. %	64,38	71,16	67,66	69,82	72,96	66,36	69,76	72,62
TiO <sub>2</sub>	1,06	0,35	0,66	0,56	0,32	0,64	0,45	0,20
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	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 <sub>2</sub> O	2,57	4,00	3,17	3,81	3,34	2,85	2,90	2,57
K <sub>2</sub> O	1,79	1,85	3,69	3,01	3,91	5,18	4,43	5,34
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	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 <sub>2</sub> O/Na <sub>2</sub> 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
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
Hyp	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
Crn	3,42	0,61	1,48	1,28	1,76	1,24	1,69	1,70
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
ΣPЗЭ	409,30	180,10	206,86	213,14	167,53	210,95	185,89	94,32
(La/Yb) <sub>n</sub>	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	803	743	773	754	783	814	744	707

**Таблица 2.** Сводка геохронологических данных по массиву Шонгчай, Северный Вьетнам

n/n	Проба	Порода	Метод датирования	Возраст/источник	Закрытие* T, °C
1	W-W	Массивные/огнейсованные к/з Bt-Ms K-Na-граниты	Rb-Sr, 8 проб (вал)	465±34 Ma [3]	~ 800
2	4-93	Массивный к/з Bt-Ms K-Na-гранит	U-Pb, Zrn	464±12 Ma [3]	> 900
3	V159	Массивный к/з Bt-Ms-гнейсогранит	U-Pb, Zrn	428±5 Ma [4]	
4	V101	Гнейсогранит	U-Pb, Zrn	424±12 Ma [6]	
5	V-160	Гранат-слюдистый сланец	U-Pb, Mon	419±3 Ma [7]	
6				380±17 Ma [7]	
7				255±14 Ma [7]	
8				246±8 Ma [7]	
9				240±3 Ma [7]	
10				230±5 Ma [7]	
11				224±7 Ma [7]	
12				216±40 Ma [7]	
13				203±5 Ma [7]	
14	DL-1 – DL-5	Гранитогнейс, милонит, амфиболовый милонит – комплекса метаморф. ядра	U-Pb, Zrn Среднее по 4 образцам	402±10 Ma [8]	
15	4-94	Кр/з Bt-Ms K-Na-гнейсогранит	Rb-Sr, W-Ms	299±6 Ma [3]	316±30
16	4-94		K-Ar, Bt	230±2 Ma [3]	340±30
17	4-94		K-Ar, Ms	222±2 Ma [3]	366±30
18	4-94		K-Ar, Fsp	175±2 Ma [3]	230±20
19	3-73a	Кр/з Bt-Ms K-Na-гнейсогранит	K-Ar, Ms	212±2 Ma [3]	390±30
20	VN 324	Кр/з Bt-Mu K-Na-гнейсогранит	Ar-Ar, Ms	230±2 Ma [5]	390±30
21	VN 322		Ar-Ar, Ms(st)	234–60 Ma [5]	390±30
22	V159	Массивный к/з Bt-Ms-гнейсогранит	Rb-Sr, W-Ms	206±10 Ma [4]	316±30
23	V159		Rb-Sr, W-Bt	176 ±5 Ma [4]	299±20
24	V159		Ar-Ar, Ms	210 ±9 Ma [4]	390±30
25	V159		Ar-Ar, Bt	190 ±8 Ma [4]	340±30
26	4-89/1		Кр/з Bt-Mu K-порфиробластический гнейсогранит	Rb-Sr, W-Bt	201±4 Ma [3]
27	4-89/1	K-Ar, Bt		192±2 Ma [3]	340±30
28	4-89/1	K-Ar, Fsp		144±2 Ma [3]	230±20
29	VN 329	Кр/з порфиробластический гнейсогранит	Ar-Ar, Ms(st)	201 ±2 Ma [5]	390±30
30	VN 337	Милонитизированный гнейсогранит	Ar-Ar, Ms(st)	198 ±2 Ma [5]	
31	VN 335		Ar-Ar, Ms(st)	176–164 Ma [5]	
32	DL-5	Амфиболовый милонит, гранитогнейс, милонит из комплекса метаморфического ядра южнее массива Шонгчай	Ar-Ar, Amf	237±5 Ma [8]	550±30
33	DL-4		Ar-Ar, Bt	116±10 Ma [8]	340±30
34	DL-3		Ar-Ar, Ms	140±2 Ma [8]	390±30
35	DL-2		Ar-Ar, Ms	144±2 Ma [8]	390±30
36	DL-1		Ar-Ar, Bt	84±1 Ma [8]	340±30
37	V159		Трековый метод, массивный к/з Bt-Ms-гнейсогранит	Zrn	77,5±3,9 Ma [4]
38	V159	Ap		33,6±3,6 Ma [4]	110±10
39	9811	Треки в апатитах из гнейсогранитов массива Шонг Чай и его бластоми- лонитового обрамления		20 Ma [5]	110±10
40	9812			19 Ma [5]	
41	9814			19 Ma [5]	
42	9807			20 Ma [5]	
43	9805			24 Ma [5]	
44	9801			23 Ma [5]	

Примечание. Bt – биотит, Fsp – калиевый полевой шпат, Ms – мусковит, Ms(st) – синтетонический мусковит, Ap – апатит, Zrn – циркон, Mon – монацит. \* Оценки температур закрытия различных изотопных систем на основе кинетических данных, полученных К. Ходжесом в лабораторных экспериментах [15].

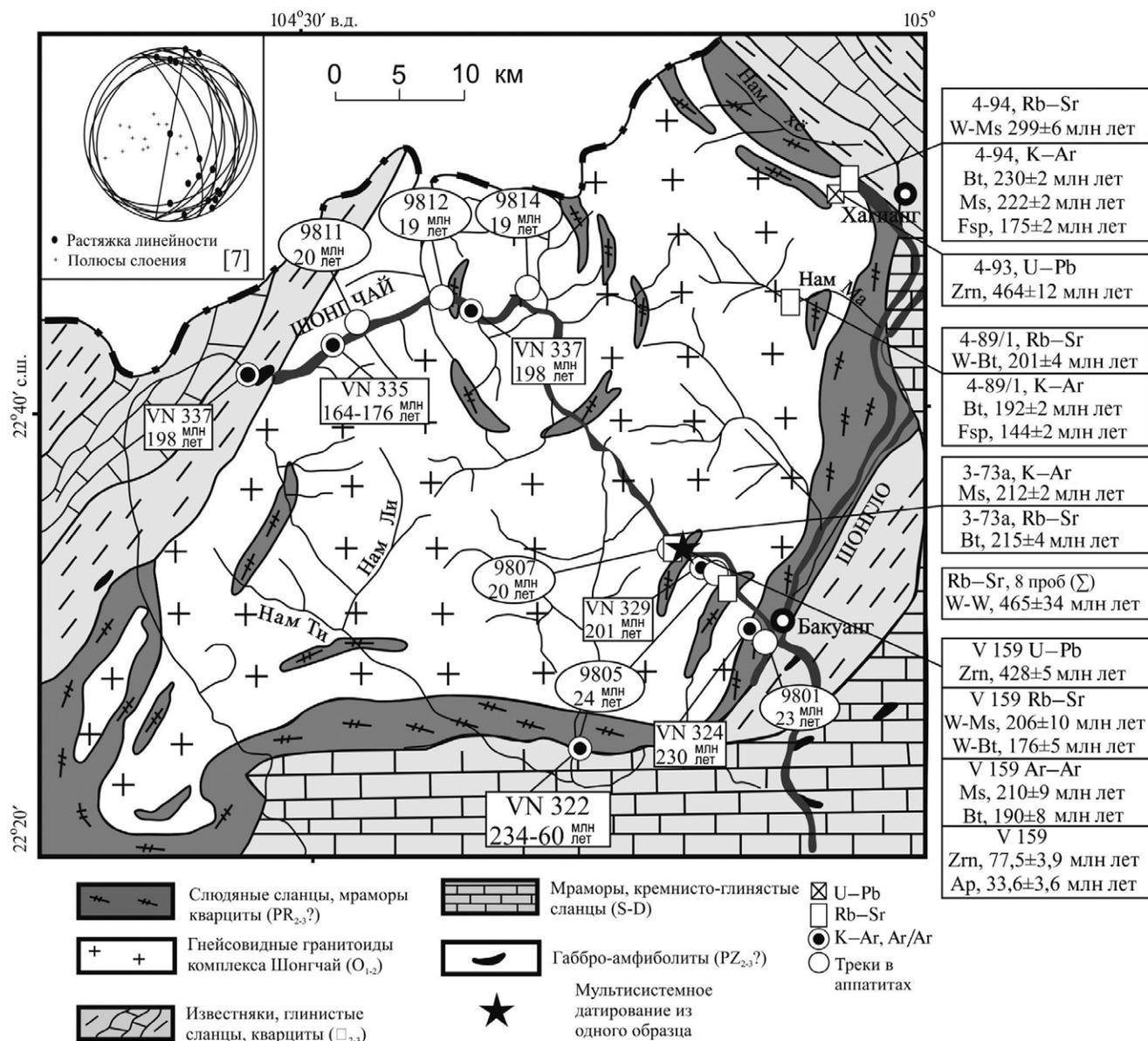


Рис. 2. Геологическая схема и точки геохронологического опробования массива Шонгчай, Северный Вьетнам [3] с изменениями и дополнениями. Структурные наблюдения приведены по [5].

## ВЕЩЕСТВЕННЫЙ СОСТАВ И ВОЗРАСТ

Массив Шонгчай сложен гранитоидами S-типа (табл. 1). Состав меняется от кварцевых диоритов до лейкогранитов ( $SiO_2 = 62,80-78,96$  мас. %). Все гранитоиды являются пералюминиевыми и преимущественно относятся к известково-щелочной серии, для них характерны фракционированные спектры распределения РЗЭ с обогащением лёгкими лантаноидами ( $\Sigma PZЭ = 94-410$  г/т;  $(La/Yb)_n = 7,13-16,85$ ) и отрицательными Eu-аномалиями ( $Eu/Eu^* = 0,33-0,58$ ), выявлены минимумы по Ba, Nb, Sr, Zr, Ti (см. табл. 1). Квазиоднородный характер гранитоидов подтверждён с помощью многомерной статистической дискриминации [9]; при этом установлено, что

главный кластер химических анализов (>90%) отвечает эвтектике в системе "Qz-Ab-Or-H<sub>2</sub>O". Температура кристаллизации гранитной магмы была оценена на основе Zr-термометра [11]. Диапазон субликвидусных температур для изученных образцов составляет 708–814 °C (см. табл. 1).

Завершая геологическую характеристику, подчеркнём, что в момент внедрения батолит Шонгчай представлял собой межформационную гранитную залежь – типичную для синскладчатых раннепалеозойских батолитов Юго-Восточного Китая и Северного Вьетнама [10]. Структурные исследования blastomylonitового обрамления подтверждают принадлежность этой геологической структуры к ком-

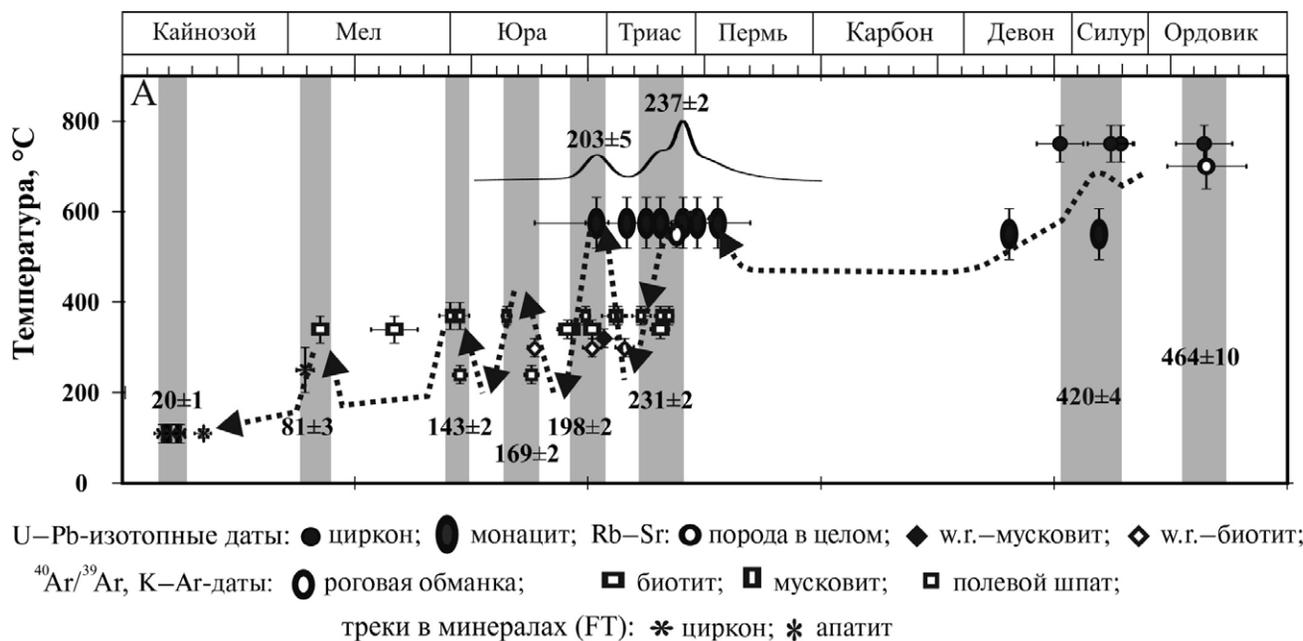


Рис. 3. Термохронограмма комплекса гранитно-метаморфического ядра Шонгчай, построенная на основе табл. 2.

плексу метаморфического ядра кордильерского типа [3, 5–7].

Сводка геохронологических данных приведена в табл. 2, термохронограмма с оценками аналитической погрешности методов датирования – на рис. 3.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

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 (см. рис. 3).

**Ордовик – силур (465–420 млн лет).** Классическим U/Pb-методом по навеске циркона (призматический, без ядер, бесцветный, прозрачный) из наименее гнейсовидных, массивных образцов гранитоидов и Rb/Sr-изохронным методом по 7 образцам валовых проб массива Шонгчай, получены согласующиеся между собой оценки возраста  $464 \pm 12$  и  $465 \pm 34$  млн лет соответственно [3]. На этом основании можно предположить, что возрастной рубеж  $464 \pm 12$  млн

лет соответствует времени консолидации гранитного расплава (см. табл. 2, рис. 3).

Заметно более молодые значения возрастов (см. табл. 2, рис. 3,  $428 \pm 5$ ,  $424 \pm 12$  млн лет) получены по циркону из гнейсогранитов классическим U/Pb-методом [4], методом SHRIMP [6]. Близкие датировки получены методом SHRIMP по включениям монацита в гранате из гранат-сланцевого сланца [7].

Наличие в гнейсогранитном массиве Шонгчай большого количества синтетектонических гранит-лейкогранитных жил [3, 4], а также оценки PT-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-сланцевого сланца [4] позволяют предположить, что формирование циркона и монацита происходило  $\sim 420$  млн лет назад в процессе динамометаморфизма на глубинах  $\geq 20$  км, в присутствии гранитного расплава.

**Триас (250–200 млн лет).** Далее, после продолжительного перерыва ( $\sim 130$  млн лет) в геологической истории массива Шонгчай на основании совпадения датировок, полученных методом SHRIMP по монациту из матрицы гранат-сланцевого сланца, K/Ar-, <sup>40</sup>Ar/<sup>39</sup>Ar-методами по амфиболу, мусковиту и биотиту из гнейсогранитов, а также по паре “вал–биотит” Rb/Sr-методом фиксируется активное термальное событие. Температура закрытия изотопной U/Pb-системы в монаците более 900 °C, при этом оценки PT-условий на основе гранат-биотитового и гранат-биотит-плагиоклазового термобарометров

( $T=575^{\circ}\text{C}$ ,  $P=3,8$  кбар) соответствуют амфиболитовой фации. Поэтому датировки по монациту соответствуют времени его формирования и, соответственно, метаморфического события. На термохронограмме плотности вероятности датировок методом SHRIMP по монациту отчётливо показывают два значимых пика с возрастом  $237 \pm 2$ ,  $203 \pm 5$  млн лет (см. рис. 3). Совпадение датировок, полученных с использованием минералов, изотопных систем, характеризующихся различной температурой закрытия, свидетельствует о том, что после метаморфического события  $237 \pm 2$  млн лет назад (среднее взвешенное по 5 датировкам монацита),  $231 \pm 2$  млн лет назад произошло охлаждение до температур менее  $300^{\circ}\text{C}$  (закрытие изотопной Rb/Sr-системы в биотите). При геотермическом градиенте  $30^{\circ}\text{C}/\text{км}$  это соответствует подъёму 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  $198 \pm 2$ ,  $169 \pm 2$ ,  $143 \pm 3$ ,  $80 \pm 2$ ,  $20 \pm 1$  млн лет (см. рис. 3, табл. 2). Практически 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  $20 \pm 1$  млн лет, фиксируемый трековым методом по апатиту (см. табл. 2, рис. 3). Это событие связано с охлаждением ниже  $100^{\circ}\text{C}$  и, соответственно, подъёмом геоструктуры Шонгчай до глубины менее 3 км во время кайнозойской активизации сдвиговой зоны Сонг Ма – Красной Реки в процессе Инд-Азиатской коллизии.

*Кайнозой (20 млн лет – настоящее время).* Дальнейшая термическая история массива Шонгчай уже не поддаётся термохронологической реконструкции, но становится очевидной при геоморфологическом анализе региона. 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. Сейчас этот период закончился ( $\leq 20$  тыс. лет), появились глубокие речные впадины, свидетельствующие о вновь возобновив-

шихся процессах подъёма территории, и, как следствие, – эрозии гнейсогранитного массива Шонгчай.

## ОЦЕНКА ДЛИТЕЛЬНОСТИ СУЩЕСТВОВАНИЯ ГРАНИТНОЙ МАГМЫ

Термохронологический анализ и математическое моделирование консолидации и остывания магматической камеры массива Шонгчай позволяют с высокой долей вероятности предположить, что в ходе становления глубинного гранитоидного батолита ( $\geq 20$  км) происходила чрезвычайно медленная кристаллизация расплава, способного длительное время существовать при температурном градиенте в земной коре ( $30^{\circ}\text{C}/\text{км}$ ). Для проверки этой гипотезы был применён математический алгоритм, основанный на численном решении уравнения теплопроводности в земной коре и описывающий динамику теплообмена в магматической камере (форма – диск с диаметром 40 км, мощностью 10 км, глубина кровли 20 км), отвечающей по размеру гранитоидному батолиту Шонгчай. В качестве начальных условий принималось стационарное распределение температуры в земной коре, содержащей кларковые концентрации делящихся элементов (K, U, Th). Начальная температура расплава полагалась равной  $780^{\circ}\text{C}$  согласно данным цирконометрии. Температура консолидации определялась согласно зависимости от давления для случая водонасыщенного гранита. Температура ликвидуса бралась также для обводнённого гранита и определялась смещением данной зависимости по температуре. Кристаллизационная дифференциация гранитного расплава определялась согласно доле рассчитанного остаточного расплава относительно исходного объёма магматической камеры.

Результаты численных расчётов показывают, что после заложения магматической камеры начинает образовываться корка у кровли будущего массива и постепенно консолидируется весь объём камеры. При этом время жизни расплава на глубинных уровнях магматической камеры (28–30 км) может составлять продолжительное время. Так, в рамках моделирования остаточный расплав с высокой степенью дифференциации продолжает существовать внутри камеры вплоть до момента плюмового воздействия на глубинах более 28 км ( $L_R = 20\%$  объёма камеры), при этом изотерма релаксирует полностью к моменту времени 13 млн лет (рис. 4).

Тепловое влияние Эмейшаньского плюма приводит к повторному переплавлению батолита, испытывающего затем гранитогнейсовый диапиризм. Плюмовое воздействие моделировалось повышением

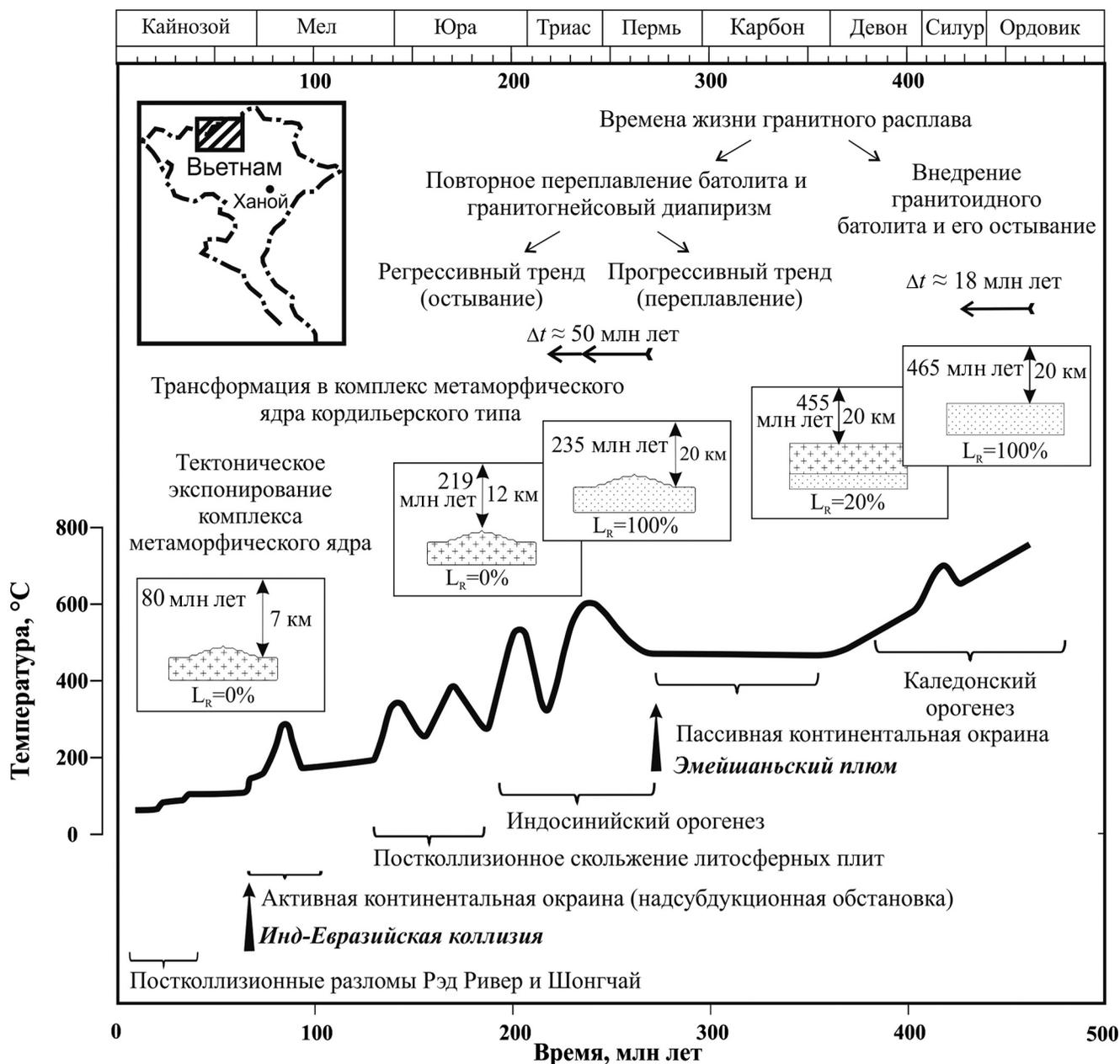


Рис. 4. Термическая кривая гранитоидного батолита Шонгчай (Северный Вьетнам) и его трансформация в комплекс метаморфического ядра кордильерского типа. На врезках – результаты численного моделирования, где  $L_R(\%)$  – доля оставшегося расплава в глубинной магматической камере. Остальные пояснения в тексте.

температуры на глубине 40 км до 1200–1300 °С на 20 млн лет с 255 до 235 млн лет (аналогично появлению на этой глубине базитовой магматической камеры), в результате – происходит реактивация гранитоидной магматической камеры (100–80 об.%), см. рис. 4.

В дальнейшем происходит тектоническое экспонирование гранитоидного батолита как метаморфического ядра кордильерского типа. Таким образом, гранитоидная магма в истории формирования массива Шонгчай существовала в жидком (полузамёр-

зшем) состоянии, по крайней мере, два раза в соответствии с термохронограммой. Первый этап был связан с историей зарождения гранитной магмы и формированием гигантской магматической камеры, остывание которой при стандартном температурном градиенте в земной коре (30 °С/км) произошло за 18–20 млн лет, 465–445 млн лет). Второй этап связан с воздействием Эмейшаньского плюма (250–200 млн лет); этот временной интервал, согласно математическим расчётам, включал прогрессивную и регрессивную (плавление–кристаллизация) стадии, про-

текавшие в условиях конвергентности Эмейшаньского плюма и Индосинийского орогенеза ( $\Delta t \approx 50$  млн лет). На этом этапе происходит переплавление объёма гранитной (100–80%) камеры с долей рестита 50%, а затем куполообразование (см. рис. 4). Окончательное формирование комплекса метаморфического ядра кордильерского типа происходит за счёт тектонического импульсного экспонирования массива на верхние уровни земной коры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Реконструкция термической истории массива Шонгчай и математическое тестирование возрастных рубежей (465–20 млн лет) позволило обосновать динамику трансформации гранитоидного батолита в комплекс метаморфического ядра кордильерского типа. Впервые показано, что зарождение и последующее остывание гранитоидного батолита Шонгчай произошло в период каледонской орогении (465–445 млн лет,  $\Delta t_L \approx 18$  млн лет), а затем произошло повторное переплавление магматической камеры (термолувшки) под воздействием Эмейшаньского плюма и повышением температурного градиента в земной коре до  $30^\circ\text{C}/\text{км}$ , произошедшее за счёт изменения температуры нижней части коры (250–230 млн лет). Длительность существования гранитного расплава в виде “полузамёрзшего” гранитного слоя (магматической камеры, ареал-плутона) оценивается в  $\sim 50$  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 произошёл пологозалегающий срыв в земной коре и трансформация гранитоидного батолита в комплекс метаморфического ядра, впоследствии испытывавшего 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, испытывавшей 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).

**Благодарности.** Авторы выражают искреннюю благодарность за многолетнее обсуждение поднятых

проблем и критические замечания к работе академику А.И. Ханчуку, Н.Н. Круку, В.А. Пономарчуку, а также за участие в совместных экспедиционных работах и авторские результаты исследований М.Л. Куйбида, И.Ю. Анниковой (ИГМ СО РАН, г. Новосибирск), Ngo Thi Phuong (ИГС, ВАНТ, г. Ханой, Вьетнам).

**Источники финансирования.** Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН, а также в рамках планов НИР Новосибирского и Томского государственных университетов при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 5.1688.2017/ПЧ, экспедиционные работы), грантов Правительства Российской Федерации № 220, № 14 (Y26.31.0012, 14.Y26.31.0018, аналитические работы), проектов Российского и Вьетнамского фондов фундаментальных исследований (№ 16–05–00128а, 17–05–00936а, № 17–55–540001, VAST.NTQT.NGA.06/17–18, обработка материалов и оформление работы). Термохронологические исследования выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН (г. Новосибирск).

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Cordillerian Metamorphic Core Complex // Geol. Soc. Amer. 1980. V. 153. 461 p.
2. Miller E.L., Calvert A.T., Little T.A. // Geology. 1992. V. 20. P. 487–490.
3. Пономарева А.П., Владимиров А.Г., Фан Лыу Ань, Руднев С.Н., Крук Н.Н., Пономарчук В.А., Бибицкова Е.В., Журавлев Д.З. // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 11. С. 1792–1806.
4. Roger F., Leloup P.H., Jolivet M., Lacassin R., Trinh P.T., Brunel M., Seward D. // Tectonophysics. 2000. V. 321. P. 449–466.
5. Maluski H., Lepvrier C., Jolivet L., Carter A., Roques D., Beyssac O., Ta Trong Tange, Nguyen Duc Thangf, Avigadd D. // J. Asian Earth Sci. 2001. V. 19. P. 233–248.
6. Carter A., Roques D., Bristlow C., Kinny P. // Geology. 2001. V. 29. № 3. P. 211–214.
7. Gilley L.D., Harrison T.M., Leloup P.H., Ryerson F.J., Lovera O.M., Wang J.-H. // J. Geophys. Res. 2003. V. 108. №. B2. P. 2127.
8. Yan D.P., Zhou M.Fu, Wang C.Y., Xia B. // J. Asian Earth Sci. 2006. V. 28. P. 332–353.
9. Хлестов В.В. Многомерный дискриминационный вычислительный комплекс «VADIC»: принципы, алгоритм и практическое применение для классификации биологических и геологических объектов. препр. Новосибирск, НГУ. 2018.
10. Геологическая карта северной части Вьетнама. Под ред.: Чан Ван Чи, Нгуен Суан Тунг. М-ба 1:1 000 000. Ханой. 1977.

11. *Watson E. B., Harrison T.M.* // *Earth Planet. Sci. Lett.* 1983. V. 64. P. 295–304.
12. *Tran Trong Hoa, Polyakov G.V., Tran Trong Anh, Borisenko A.S., Izokh A.E., Balykin P.A., Ngo Thi Phuong, Pham Thi Dung.* *Intraplate Magmatism and Metallogeny of North Vietnam.* Switzerland: Springer Int. Pub. 2016. 372 p.
13. *Ханчук А.И., Гребенников А.В., Иванов В.В.* Альб-сеноманские окраинно-континентальный орогенный пояс и магматическая провинция Тихоокеанской Азии // *Тихоокеан. геология.* 2019. Т. 38. № 3. С. 4–37.
14. *Полянский О.П., Реввердатто В.В., Бабичев А.В., Свердлов В.Г.* Механизм подъема магмы через «твердую» литосферу и связь мантийного и корового диапиризма: численное моделирование и геологические примеры // *Геология и геофизика.* 2016. Т. 57. № 6. С. 1073–1091.
15. *Hodges K.V.* *Geochronology and Thermochronology in Orogenic Systems.* In: *Treasure on Geochemistry.* Oxford: Elsevier, 2004. P. 263–292.

## THERMOCHRONOLOGY OF CORDILLERAN METAMORPHIC CORE COMPLEXES: EXAMPLE OF SONG CHAY MASSIF IN NORTHERN VIETNAM

**A. G. Vladimirov<sup>1,2,3</sup>, A. V. Travin<sup>1,2,3</sup>, Phan Luu Anh<sup>4</sup>, N. G. Murzintsev<sup>1</sup>, E. I. Mikheev<sup>1,2</sup>**

<sup>1</sup>*Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>2</sup>*Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russian Federation*

<sup>3</sup>*Tomsk State University, Tomsk, Russian Federation*

<sup>4</sup>*Institute of Geological Sciences, Vietnam Academy of Science and Technology, Hanoi, Vietnam*

Presented by Academician of the RAS A.I. Khanchuk February 15, 2019

Received February 21, 2019

Based on the reconstruction of the thermal evolution of the Song-Chai granitoid massif (Northern Vietnam) the long-term existence of granitoid magma at deep levels of the Earth's crust ( $H=15-20$  km,  $\Delta t \sim 20-50$  Ma) is established. Geodynamic analysis and mathematical modeling of thermal history of the granitoid batholith cooling shows that the magmatic chamber should be considered as thermal trap on the lower level of the earth's crust, preserving residual granite melts for a long time. Activation of the magmatic chamber occurs in post-collisional strike-slip tectonics zones and is associated by tectonic exhumation of large segments of the earth's crust. Ultimately, this leads to the transformation of the batholith into Cordilleran type metamorphic core complexes, emplacement of residual rare-metal melts and the formation of commercial deposits.

*Keywords:* granitoid batholith, metamorphic core complexes, geochronology, thermochronology, mathematical modeling, Vietnam, Song-Chai massif, metallogenic prediction.