

## TWO EPISODES OF METAMORPHISM IN THE ROCKS OF THE EASTERN KITOI BLOCK (SHARYZHALGAI UPLIFT OF THE SIBERIAN PLATFORM) ACCORDING TO THE GARNET AMPHIBOLITE DATA

V.P. Sukhorukov<sup>1,2</sup>, V.B. Savel'eva<sup>3</sup>

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

<sup>2</sup>Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia

<sup>3</sup>Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS, Irkutsk, Russia

**ABSTRACT.** The Archean metamorphism in the southwestern Siberian craton was confirmed by the studies of the Kitoy and Irkutsk blocks. However, the parameters of the metamorphism process are still poorly investigated. The article presents the first results of studying the metamorphism conditions of garnet amphibolites sampled from the Kitoy sillimanite deposit. The reaction relationships of the studied minerals give grounds to distinguish two episodes of the regional metamorphism. At the end of the first episode, ( $T=710\text{--}770\text{ }^{\circ}\text{C}$  and  $P=8.3\text{--}8.8\text{ kb}$ ), the pressure reduced to 1.3–2.5 kbar at  $T=700\text{ }^{\circ}\text{C}$  at the retrograde stage, and amphibole-plagioclase rims formed around garnet grains. During the second episode of metamorphism, the temperature reached  $890\text{ }^{\circ}\text{C}$  (granulite facies), and Cpx+Opx paragenesis replaced hornblende. The second episode of metamorphism is not evident in all the samples (considering the same bulk rocks composition of the rocks), which suggests its local character.

**KEYWORDS:** Siberian craton; Kitoy block; Archean; granulite metamorphism; amphibolite; PT-parameters; P-T path of metamorphism

**FUNDING:** The study was carried out according to the state assignment of the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS and supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation.

### RESEARCH ARTICLE

Received: July 16, 2019

Revised: October 3, 2019

Accepted: November 20, 2019

**FOR CITATION:** Sukhorukov V.P., Savel'eva V.B., 2020. Two episodes of metamorphism in the rocks of the eastern Kitoy block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian platform) according to the garnet amphibolite data. *Geodynamics & Tectonophysics* 11 (1), 107–121. doi:10.5800/GT-2020-11-1-0466

## ДВЕ СТАДИИ МЕТАМОРФИЗМА В ПОРОДАХ ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ КИТОЙСКОГО БЛОКА (ШАРЫЖАЛГАЙСКИЙ ВЫСТУП СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ) ПО ДАННЫМ ИЗУЧЕНИЯ ГРАНАТОВЫХ АМФИБОЛИТОВ

В.П. Сухоруков<sup>1,2</sup>, В.Б. Савельева<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, Новосибирск, Россия

<sup>2</sup> Новосибирский национальный исследовательский государственный университет, Новосибирск, Россия

<sup>3</sup> Институт земной коры СО РАН, Иркутск, Россия

**АННОТАЦИЯ.** Свидетельства архейского метаморфизма на ЮЗ Сибирского кратона установлены в Китойском и Иркутском блоках, однако параметры процесса метаморфизма до сих пор остаются слабоизученными. В работе приводятся первые результаты изучения условий метаморфизма гранатовых амфиболитов, отобранных в районе Китойского силлиманитового месторождения. На основании изучения реакционных взаимоотношений минералов установлено, что породы подверглись двум эпизодам метаморфизма. Первый эпизод регионального метаморфизма с РТ-параметрами  $T=710-770$  °С и  $P=8.3-8.8$  кбар завершился снижением давления на регрессивной стадии до параметров  $P=1.3-2.5$  кбар при  $T=700$  °С. При этом происходило образование амфибол-плагиоклазовых кайм вокруг зерен граната. Второй эпизод метаморфизма характеризовался температурами, достигающими гранулитовой фации ( $T=890$  °С) и формированием парагенезиса  $Srx+Orx$ , замещающего роговую обманку. Второй эпизод метаморфизма проявлен не во всех образцах (при одинаковом валовом составе пород), что позволяет предположить его локальный характер.

**КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:** Сибирский кратон; Китойский блок; архей; гранулитовый метаморфизм; амфиболиты; РТ-параметры; РТ-тренды метаморфизма

**ФИНАНСИРОВАНИЕ:** Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

### 1. ВВЕДЕНИЕ

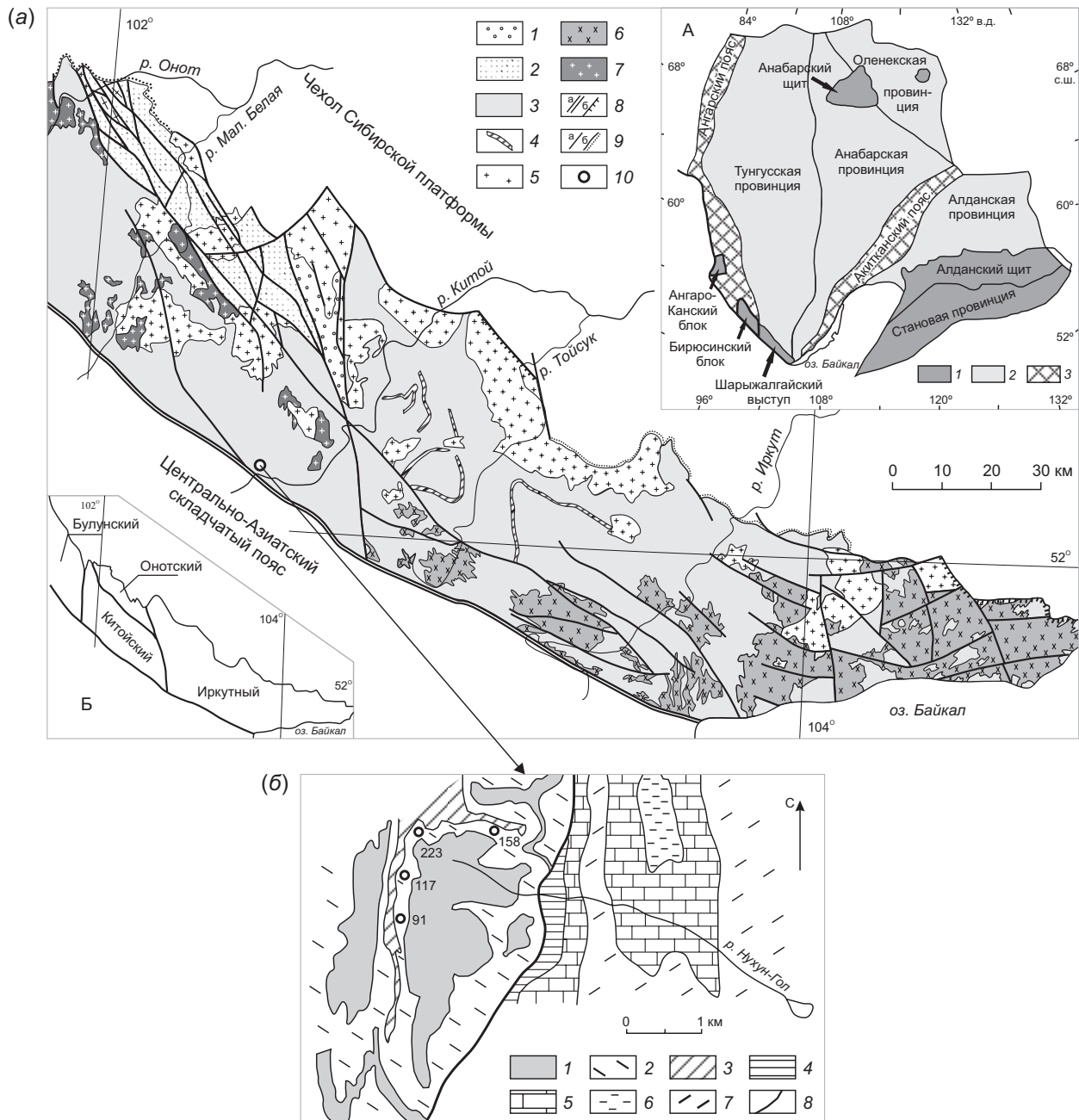
Изучение условий метаморфизма раннепротерозойских гранулитовых комплексов является важнейшим источником информации об условиях формирования коры, коллизионных и аккреационных процессах в раннем докембрии. Формирование Сибирского кратона связано с глобальными коллизионными событиями на рубеже 2.1–1.8 млрд лет [Rosen, 2003], в результате которых был сформирован суперконтинент Колумбия (Нуна) [Rogers, Santosh, 2002; Zhao et al., 2002]. Изучение метаморфических комплексов, трассирующих юго-западную окраину Сибирского кратона, проведенное в последнее время, показало, что отдельные блоки характеризуются принципиальными различиями в РТ-параметрах и РТ-трендах метаморфизма и испытали мультистадийное проявление палеопротерозойского высокоградного метаморфизма [Sukhorukov, Turkina, 2018; Sukhorukov, 2013; Sukhorukov et al., 2018; Turkina, Sukhorukov, 2015b; Likhanov et al., 2016; Gerya, Maresh, 2004; и др.]. В Ангаро-Канском блоке Енисейского кряжа установлена двухэтапная метаморфическая эволюция (1.85–1.89 и 1.78–1.8 млрд лет), причем поздний этап метаморфизма характеризуется высокими до ультравысоких температурами (более 1000 °С) и РТ-трендом метаморфизма, близким к изобарическому остыванию [Sukhorukov et al., 2018; Sukhorukov, Turkina, 2018; Turkina, Sukhorukov, 2015b; Likhanov et al., 2016]. В то же время в гранулитовом комплексе Иркутского блока палеопротерозойский метаморфизм характеризуется одной стадией на рубеже 1.85–1.86 млрд лет, он

сопровождался мигматизацией и гранитоидным магматизмом, параметры пика метаморфизма составляют:  $T\sim 850-870$  °С при  $P\geq 7$  кбар. Для пород блока характерен РТ-тренд, близкий к изотермической декомпрессии [Sukhorukov, 2013; Sukhorukov, Turkina, 2018], что указывает на формирование его в условиях растяжения.

Китойский блок, относящийся к Шарыжалгайскому выступу, непосредственно контактирует с метаморфическими комплексами Иркутского блока (рис. 1). В его пределах распространены метаморфические и магматические комплексы архейского этапа с возрастом около 2.5 млрд лет. [Levitskii et al., 2010; Glebovitskii et al., 2011]. Несмотря на его расположение в непосредственной близости от Иркутского блока, условия метаморфизма и его эволюция в Китойском блоке остаются слабоизученными. В этой работе представлены первые результаты реконструкции РТ-тренда метаморфизма пород Китойского блока на основании изучения гранатовых амфиболитов в районе Китойского силлиманитового месторождения.

### 2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ, СОСТАВ И ВОЗРАСТ ПОРОД ГРАНУЛИТО- ГНЕЙСОВЫХ БЛОКОВ ЮГО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ ШАРЫЖАЛГАЙСКОГО ВЫСТУПА

Шарыжалгайский выступ, по одним данным [Rosen, 2003], представляет собой южное обнаженное окончание Тунгусской провинции фундамента Сибирской платформы, по другим [Glebovitsky et al., 2008] – относится к Южно-Сибирскому коллизионному поясу. В его



**Рис. 1.** Геологическая схема юго-восточной части Шарыжалгайского выступа (а): 1 – нижнепротерозойские отложения; 2 – отложения Онотского зеленокаменного пояса; 3 – гранулитогнейсовый комплекс; 4 – маркирующие слои; 5–7 – гранитоиды: 5 – палеопротерозойские, 6 – архей-палеопротерозойские нерасчлененные, 7 – неоархейские; 8 – главные разломы (а), надвиги (б); 9 – прочие разломы (а), несогласное залегание (б); 10 – участок отбора проб на Китоюском месторождении.

А – главные тектонические элементы Сибирского кратона по [Rosen et al., 1994; Donskaya et al., 2009]: 1 – выступы фундамента, 2 – погребенный фундамент, 3 – палеопротерозойские орогенные пояса. Б – схема террейнов Шарыжалгайского выступа.

Схематическая карта Китоюского месторождения [Levitskii et al., 2010] (б): 1 – силлиманитовые сланцы; 2 – амфиболовые гнейсы и амфиболиты; 3 – теньевые мигматиты; 4–7 – верхняя подсвета китоюской свиты: 4 – меланократовые биотит-гранатовые породы, 5 – мраморы, 6 – амфиболовые сланцы, 7 – «пепельные» биотитовые плагиогнейсы; 8 – разрывные нарушения. Кружками обозначены точки отбора проб.

**Fig. 1.** Geological scheme of the southeastern part of the Sharyzhalgai uplift (a): 1 – lower Paleoproterozoic sedimentary-volcanic sequence; 2 – Onot greenstone belt; 3 – granulite-gneiss complex; 4 – marker beds; 5–7 granitoids: 5 – Paleoproterozoic, 6 – Archean-Paleoproterozoic (poorly defined), 7 – Neoproterozoic; 8 – main faults (a) and thrusts (b); 9 – other faults (a) and discordant bedding (b); 10 – sampling area.

A – main tectonic elements of the Siberian Craton [Rosen et al., 1994; Donskaya et al., 2009]: 1 – basements uplifts, 2 – covered basement, 3 – Paleoproterozoic orogenic belts. Б – terranes of the Sharyzhalgai uplift.

Schematic geological map of the Kitoy sillimanite deposit [Levitskii et al., 2010] (b): 1 – sillimanite schist; 2 – amphibole gneiss and amphibolite; 3 – migmatite; 4–7 – upper part of the Kitoy sequence: 4 – melanocratic biotite-garnet rock, 5 – marble, 6 – amphibole gneiss, 7 – ‘ash-coloured’ biotite gneiss; 8 – fault. Circles indicate the sample locations.

структуре с северо-запада на юго-восток выделены четыре блока: Булунский и Олотский гранит-зеленокаменные, Китойский и Иркутский гранулитогнейсовые, разделенные региональными разломами северо-западного и субмеридионального простирания (рис. 1). Китойский и Иркутский блоки, образующие большую часть Шарыжалгайского выступа, сложены однотипными породными ассоциациями, включающими ортогнейсы среднего и кислого состава, метабазиты, гранат-биотитовые и высокоглиноземистые кордиерит- и силлиманитсодержащие гнейсы, мраморы и кальцифиры, и метаморфизованными в условиях от амфиболитовой до гранулитовой фации [Nozhkin, Turkina, 1993; Nozhkin et al., 2001; Gladkochub et al., 2005; Poller et al., 2005; Turkina, Sukhorukov, 2015a; Sukhorukov, Turkina, 2018]. В обоих блоках для метамагматических пород по цирконам установлены два этапа метаморфизма: 2.55–2.60 и 1.85–1.86 млрд лет, которые коррелируют с образованием гранитоидов (2.53–2.54 и 1.85–1.86 млрд лет) [Gladkochub et al., 2005; Poller et al., 2005; Sal'nikova et al., 2007; Turkina et al., 2012, 2017]. Для пород Китойского блока также установлены два этапа метаморфизма: неархейский (2.7–2.6 млрд лет) и палеопротерозойский (1.85–1.87 млрд лет). В то же время для высокоглиноземистых гнейсов в районе Китойского силлиманитового месторождения на основании датирования акцессорных (монацит) и породообразующих (гранат) минералов предполагается проявление только одного этапа метаморфизма на рубеже архея и протерозоя [Glebovitskii et al., 2011]. Возраст  $2483 \pm 4$  млн лет получен также для грубозернистых гранитов, распространенных в районе месторождения и являющихся секущими по отношению к мигматитовой полосчатости гнейсов [Levitskii et al., 2010].

Исследованные авторами амфиболиты отобраны в районе Китойского силлиманитового месторождения, которое располагается в восточной части Китойского блока, вблизи его границы с Иркутским блоком. Район месторождения сложен силлиманитовыми, андалузит-силлиманитовыми, гранат-силлиманитовыми сланцами и гнейсами, которые переслаиваются с кварцитами, амфиболитами, мраморами. Толщи силлиманитсодержащих сланцев «подстилаются» амфиболитами и амфиболовыми гнейсами, которые содержат пачки высокоглиноземистых сланцев, отдельные прослои биотитовых и биотит-гранатовых гнейсов, а также редкие маломощные прослои кальцифиров, содержащих силикатные минералы, что свидетельствует в пользу осадочного происхождения протолитов сланцев и гнейсов [Levitskii et al., 2010; Turkina, Sukhorukov, 2015a]. В ряде работ [Shirobokov, Sezko, 1979; Khlestov, Ushakova, 1965] отмечается присутствие в метаморфической толще мелких линз метаморфизованных ультраосновных пород, относимых к арбанскому комплексу, преобразованных в породы жедрит-ортопироксенового ( $\pm$ оливин, шпинель), шпинель-роговообманкового, кордиерит-жедритового, биотит-гранат-кордиерит-жедритового состава. Породы ультраметаморфического этапа [Levitskii et al., 2001; 2010] представлены плагиомигматитами,

калишпатовыми мигматитами, жильными автохтонными и аллохтонными гранитами.

В высокоглиноземистых метаморфических породах Китойского месторождения отмечается сложная последовательность минеральных ассоциаций [Glebovitskii et al., 2011]. Ранние метаморфические парагенезисы представлены тонкокристаллическими выделениями андалузита, граната, рутила и графита. На более поздних стадиях графит отсутствует, андалузит замещался силлиманитом с появлением его сплошных масс и крупных кристаллов. Оценки пиковых РТ-параметров метаморфизма, проведенные для гранат-кордиеритовых гнейсов, составляют:  $T=780$  °C и  $P=6.6\text{--}7.7$  кбар [Leppezin, Khlestov, 2009].

Изученные образцы гранатовых амфиболитов были отобраны в верховьях рек Нухун-Гол и Удугаша и на водоразделе между ними. В разрезе вместе с амфиболитами присутствуют гранитогнейсы, тела гипербазитов и жилы пегматоидных гранитов.

### 3. ПЕТРОГРАФИЯ И МИНЕРАЛОГИЯ

Для детального исследования были выбраны четыре образца амфиболитов. По валовому химическому составу образцы 91, 158 и 223 близки к базальтам нормальной щелочности, они содержат около 50 мас. %  $\text{SiO}_2$ , 13.6–14.9 мас. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и 15.5–18.7 мас. %  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  (табл. 1). В отличие от них, образец 117 обладает повышенным содержанием кремнезема (почти 60 мас. %  $\text{SiO}_2$ ), отвечающим андезитам, и при этом более низким содержанием  $\text{Fe}_2\text{O}_3^*$  (9 мас. %). Содержание глинозема (13.6 мас. %  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) близко к другим образцам.

По минеральному составу изученные породы можно разделить на две группы. Первая (обр. 117, 158) содержит минеральную ассоциацию  $\text{Grt}+\text{Hbl}+\text{Pl}+\text{Qtz} \pm \text{Cpx}$ . Породы этой группы имеют равномерно-зернистую структуру с размером зерен около 0.5–1.0 мм. Породы второй группы (обр. 91, 223) характеризуются той же минеральной ассоциацией и структурой, однако в них зерна роговой обманки частично замещены мелкозернистым (порядка 0.1 мм) агрегатом, состоящим из клинопироксена, ортопироксена и плагиоклаза. Типичными для обеих групп амфиболитов являются мелкозернистые амфибол-плагиоклазовые каймы мощностью порядка 100–200 мкм, развивающиеся вокруг зерен граната (рис. 2, а, в). Роговая обманка в матриксе пород обычно имеет бурую или буро-зеленую окраску, амфибол в каймах окрашен в светло-зеленый или голубовато-зеленый цвет.

Образец 117 содержит минеральную ассоциацию  $\text{Grt}+\text{Hbl}+\text{Pl}+\text{Qtz}$ . Гранат в породе имеет атоловое строение и содержит крупные включения кварца. Состав граната в центральной и краевой частях практически не различается: Alm 57–58, Py 13–15, Grs 20–22, Sps 5–6 мол. % (табл. 2). Роговая обманка в матриксе породы часто имеет зональное строение. Центральная часть зерен характеризуется повышенным содержанием Na (0.33–0.41 ф.е.), Ti (0.13–0.15 ф.е.) и Al(IV) (1.66–1.74 ф.е.), в краевых частях зерен содержание этих элементов значительно снижается и составляет:



**Таблица 1. Состав изученных амфиболитов Китойского месторождения**  
**Table 1. Composition of amphibolites (Kitoy deposit)**

№ обр.	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> *	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	BaO	V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	ппп	Сумма
91	48.84	1.37	14.87	18.18	0.31	4.19	9.40	2.41	0.28	0.06	0.01	0.10	0.01	-0.14	99.94
117	59.59	0.64	13.59	9.05	0.18	4.67	8.26	1.08	1.50	0.09	0.05	0.02	0.02	1.27	100.06
158	50.48	1.40	13.62	18.68	0.25	4.20	10.82	0.69	0.17	0.06	0.01	0.07	0.01	-0.63	99.87
223	49.07	1.26	14.93	15.55	0.11	5.08	10.77	2.61	0.48	0.06	0.01	0.12	0.01	-0.14	99.96

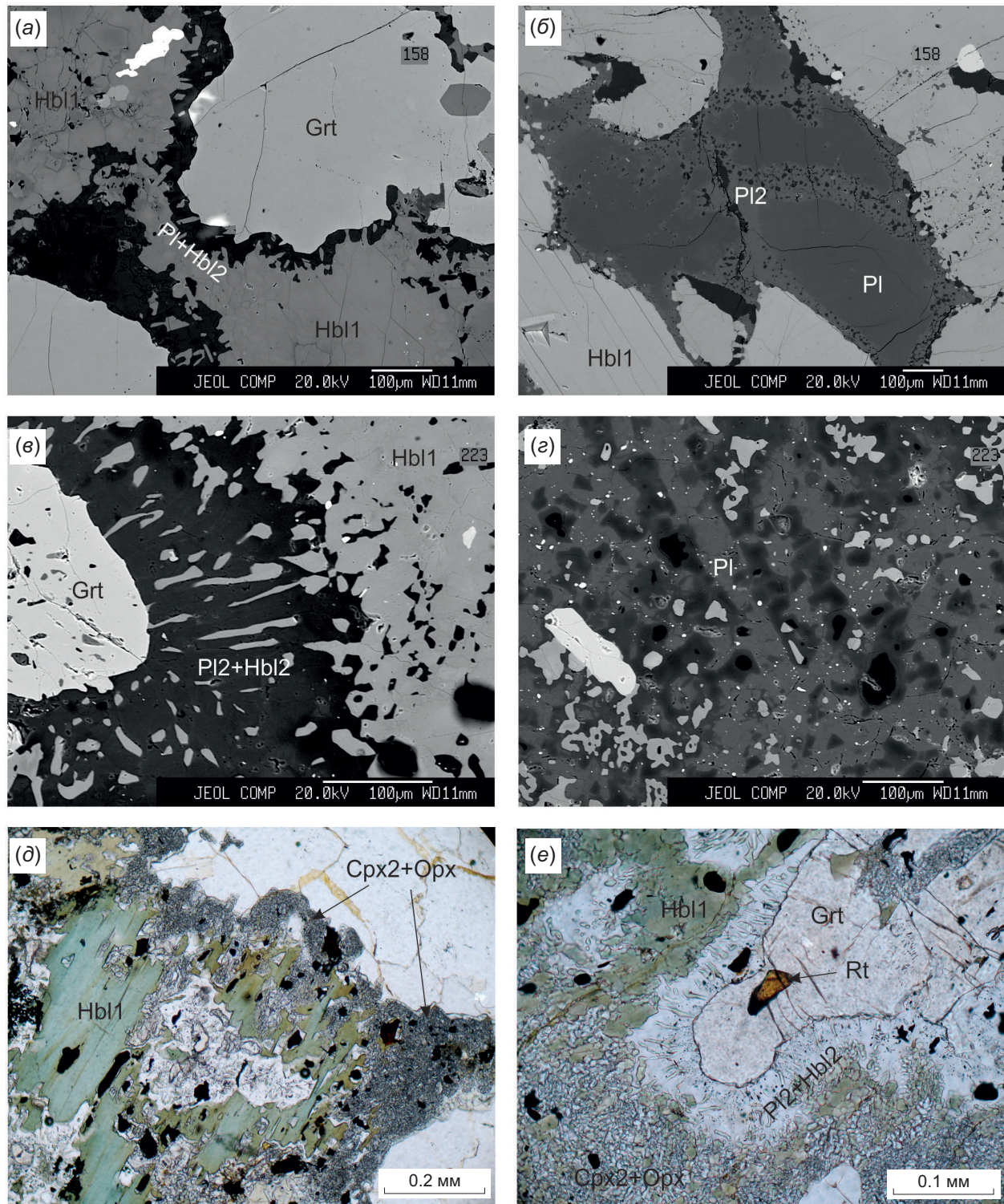
Примечание. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – суммарное железо. Анализы выполнены методом РФА в ЦКП ИГМ СО РАН (г. Новосибирск), аналитик Н.Г. Карманова.  
 Note. Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>\* – total iron. All the analyses were carried out using the RFA methodology at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (Novosibirsk, Russia). Analyst N.G. Karmanova.

**Таблица 2. Состав гранатов и пироксенов из гранатовых амфиболитов (мас. %)**  
**Table 2. Microprobe compositions of garnets and pyroxenes from garnet amphibolites (Kitoy deposit)**

Оксиды	117		158		91		223			158		91				
	Grt1 ц	Grt1 к	Grt1 ц	Grt1 к	Grt1 ц	Grt1 к	Grt 2	Grt1 ц	Grt1 к	Grt 2	Cpx1 ц	Cpx1 к	Орх	Cpx2		
SiO <sub>2</sub>	38.03	37.86	37.85	37.96	37.62	37.39	37.87	37.79	37.58	38.00	51.68	51.96	49.95	49.88	52.41	52.45
TiO <sub>2</sub>	0.05	0.08	0.06	0.10	0.06	0.06	0.05	0.09	0.04	0.14	0.27	0.25	0.11	0.11	0.05	0.07
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20.94	20.78	20.79	20.81	20.40	20.37	20.88	20.41	20.54	20.79	1.82	1.85	0.26	0.21	0.60	0.40
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.02	0.02	0.04	0.00	0.00	0.00	0.02	0.00	0.03	0.00	0.03	0.01	0.00	0.01	0.00	0.00
FeO	26.87	27.02	28.07	28.57	28.65	28.85	28.54	28.23	28.08	25.92	12.71	12.28	34.86	35.02	14.83	15.54
MnO	2.66	2.87	0.57	0.57	1.61	1.69	0.61	0.99	1.06	0.97	0.09	0.05	0.36	0.32	0.18	0.21
MgO	3.91	3.79	3.37	3.48	2.52	2.63	1.97	3.25	2.79	2.38	10.64	10.92	13.81	13.59	9.86	9.50
CaO	7.57	7.55	9.07	8.76	9.30	8.93	10.35	9.19	9.56	11.71	22.63	22.80	0.39	0.45	21.91	22.08
Сумма	100.06	99.961	99.829	100.30	100.16	99.93	100.28	99.956	99.725	100.03	99.86	100.12	99.75	99.63	100.27	100.62
Формульные коэффициенты рассчитаны: Grt – на 12 O, Cpx и Орх – на 6 O																
Si	3.005	3.001	3.002	2.999	3.001	2.992	3.006	3.004	2.998	3.007	1.960	1.961	1.985	1.987	2.002	2.004
Ti	0.003	0.004	0.003	0.006	0.003	0.003	0.003	0.006	0.003	0.008	0.008	0.007	0.003	0.003	0.001	0.002
Al	1.950	1.942	1.944	1.938	1.918	1.922	1.954	1.913	1.932	1.938	0.081	0.082	0.012	0.010	0.027	0.018
Cr	0.001	0.001	0.003	0.000	0.000	0.000	0.001	0.000	0.002	0.000	0.001	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
Fe	1.776	1.791	1.862	1.888	1.912	1.931	1.895	1.877	1.874	1.715	0.403	0.387	1.158	1.167	0.474	0.496
Mn	0.178	0.193	0.039	0.038	0.109	0.115	0.041	0.067	0.072	0.065	0.003	0.002	0.012	0.011	0.006	0.007
Mg	0.460	0.447	0.398	0.410	0.300	0.314	0.233	0.385	0.332	0.281	0.601	0.614	0.818	0.807	0.561	0.541
Ca	0.641	0.641	0.771	0.742	0.795	0.766	0.881	0.782	0.817	0.992	0.920	0.922	0.017	0.019	0.897	0.904
Alm	0.581	0.583	0.607	0.613	0.614	0.618	0.621	0.603	0.606	0.562						
Py	0.151	0.146	0.130	0.133	0.096	0.101	0.076	0.124	0.107	0.092						
Grs	0.210	0.209	0.251	0.241	0.255	0.245	0.289	0.251	0.264	0.325						
Sps	0.058	0.063	0.013	0.012	0.035	0.037	0.013	0.022	0.023	0.021						
F	0.790	0.800	0.820	0.820	0.860	0.860	0.890	0.830	0.850	0.860	0.400	0.390	0.590	0.590	0.460	0.480

Примечание. Grt1 ц – центр зерна, Grt1 к – край зерна, Grt 2 – состав граната в кайме (см. текст), Cpx1 – клинопироксен в матрице породы, Cpx2 – в мелкозернистом агрегате с ортопироксеном, F=Fe/(Fe+Mg). Все анализы выполнены в ЦКП ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) на электронно-зондовом микроанализаторе Jeol JXA-8100, аналитик В.Н. Королук.

Note. Grt1 ц – grain centre, Grt1 к – grain rim, Grt 2 – composition of garnet in the rim (see text for details), Cpx1 – clinopyroxene in the rock matrix, Cpx2 – clinopyroxene in the fine-grained orthopyroxene aggregate, F=Fe/(Fe+Mg). All the analysis were carried out using a JEOL JXA-8100 electron probe micro analyzer at the Institute of Geology and Mineralogy SB RAS (Novosibirsk, Russia). Analyst V.N. Korolyuk.



**Рис. 2.** Микрофотографии шлифов гранатовых амфиболитов Китойского блока.

(a–c) – BSE, (d, e) – в проходящем свете. (a) – плагиоклаз-роговообманковые каймы вокруг зерен граната в обр. 158, (б) – тонкие каймы более основного плагиоклаза вокруг более кислых ядер (обр. 158), (c) – плагиоклаз-роговообманковая кайма вокруг зерна граната (обр. 223), (d) – пятнистое строение плагиоклаза в обр. 223, (e) – частичное замещение роговой обманки мелкозернистым плагиоклаз-двупироксеновым агрегатом, (f) – гранат с включением рутила, замещаемый плагиоклаз-роговообманкой каймой в обр. 91, амфибол в матрице частично замещен мелкозернистой ассоциацией Cpx+Opх+Pl.

**Fig. 2.** Photomicrographs of the thin sections of garnet amphibolites sampled from the Kitoi block.

(a–c) – BSE images, (d, e) – images in transmitted light. (a) – plagioclase-hornblende rims around garnet grains in sample 158, (б) – thin rims of the An-enriched plagioclase around An-depleted cores (sample 158), (c) – plagioclase-hornblende rims around garnet grains in sample 223, (d) – spotted texture of the plagioclase grain in sample 223, (e) – hornblende partly replaced with plagioclase-two pyroxene aggregate, (f) – garnet with the inclusion of rutile with the Pl-Hbl rim in sample 91; amphibole in the rocks matrix is partly replaced with Cpx+Opх+Pl fine-grained assemblage.



Na – 0.19–0.23 ф.е., Ti – 0.07–0.09 ф.е., Al(IV) – 0.8–1.0 ф.е. Амфибол в реакционных каймах вокруг зерен граната имеет состав, близкий к краевым частям зерен амфибола в матриксе (табл. 3, рис. 3). Плаггиоклаз в матриксе породы имеет состав An 46–54 % с тенденцией увеличения по направлению к краевой части зерен, основность плаггиоклаза в каймах вокруг граната отчетливо выше (An=60–69, табл. 4).

Образец 158 имеет минеральную ассоциацию Grt+Srx+Hbl+Pl+Qtz. Зональность в гранате практически

отсутствует (Alm 60–61, Py 12–13, Grs 24–25, Sps 1 мол. %). Зональность в роговой обманке в матриксе породы проявлена слабо: Na – 0.32–0.39 ф.е., Ti – 0.17–0.22 ф.е., Al(IV) – 1.7–1.9 ф.е. Состав амфибола в каймах вокруг граната заметно отличается и характеризуется следующими параметрами: Na – 0.16–0.25 ф.е., Ti – 0.05–0.12 ф.е., Al(IV) – 0.84–1.38 ф.е. Плаггиоклаз в матриксе породы иногда обнаруживает резкую зональность, отчетливо видимую в BSE (см. рис. 2, б). Более кислый плаггиоклаз (Pl1) в центральных частях (An<sub>46–48</sub>) по краям

**Таблица 3. Состав амфиболов из гранатовых амфиболитов Китойского месторождения (мас. %)**  
**Table 3. Microprobe compositions of amphiboles from garnet amphibolites (Kitoy deposit)**

Окси- ды	117			158			91				223									
	Hbl1 ц	Hbl1 к	Hbl2	Hbl1 ц	Hbl1 к	Hbl2	Hbl1 ц	Hbl1 ц	Hbl1 к	Hbl1 к	Hbl2	Hbl3	Hbl3	Hbl1 ц	Hbl1 ц	Hbl1 к	Hbl1 к	Hbl2	Hbl2	Hbl3
SiO <sub>2</sub>	43.89	48.98	50.09	42.32	41.94	47.10	43.08	46.80	43.25	46.50	43.72	44.95	43.32	43.40	45.18	42.78	44.59	40.40	42.39	44.51
TiO <sub>2</sub>	1.39	0.70	0.53	1.89	1.98	0.82	1.63	0.31	1.65	0.57	1.13	1.72	1.01	1.70	0.39	1.94	0.98	0.68	1.73	1.61
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	11.88	6.50	5.54	12.53	12.34	7.74	10.75	8.13	10.90	8.48	10.96	8.82	11.27	11.56	9.74	11.54	11.02	13.73	11.07	9.58
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.03	0.04	0.07	0.04	0.01	0.01	0.01	0.06	0.01	0.00	0.02	0.04	0.02	0.03	0.01	0.01	0.02	0.25	0.04	0.03
FeO	16.49	15.72	16.62	18.70	19.34	20.55	20.21	20.72	20.18	18.44	19.76	19.28	19.45	14.74	20.25	15.50	16.31	16.86	20.74	19.41
MnO	0.28	0.40	0.43	0.05	0.04	0.09	0.14	0.16	0.12	0.11	0.06	0.03	0.08	0.04	0.07	0.05	0.05	0.05	0.09	0.03
MgO	9.93	12.18	12.54	8.28	7.85	9.00	8.32	11.24	8.30	10.64	8.41	9.17	8.97	11.25	9.53	9.98	11.15	7.09	7.32	9.35
CaO	11.66	11.60	11.12	11.84	11.61	11.95	11.43	9.01	11.45	11.35	11.60	11.79	11.36	11.94	11.50	12.03	11.82	11.58	11.54	11.69
Na <sub>2</sub> O	1.48	0.70	0.50	1.28	1.41	0.59	2.11	1.27	2.16	1.45	1.76	1.76	1.96	1.96	1.42	1.99	1.73	1.87	1.68	1.57
K <sub>2</sub> O	1.11	0.34	0.31	1.60	1.64	0.62	0.45	0.25	0.46	0.29	0.60	0.41	0.51	0.85	0.67	1.09	0.78	1.36	1.32	0.94
Сумма	98.14	97.15	97.74	98.51	98.17	98.45	98.12	97.96	98.48	97.82	98.01	97.97	97.93	97.46	98.74	96.91	98.44	93.86	97.90	98.72
Формульные коэффициенты рассчитаны на 23 O																				
Si	6.296	7.129	7.273	6.118	6.099	6.910	6.255	6.795	6.253	6.731	6.354	6.543	6.267	6.193	6.512	6.095	6.331	5.851	6.149	6.420
Ti	0.150	0.077	0.057	0.205	0.217	0.091	0.177	0.034	0.179	0.062	0.124	0.188	0.109	0.183	0.042	0.208	0.104	0.074	0.188	0.174
Al	2.008	1.114	0.948	2.135	2.114	1.338	1.839	1.391	1.858	1.446	1.877	1.513	1.921	1.944	1.655	1.938	1.844	2.344	1.892	1.628
Al IV	1.704	0.871	0.727	1.882	1.901	1.090	1.745	1.205	1.747	1.269	1.646	1.457	1.733	1.807	1.488	1.905	1.669	2.149	1.851	1.580
Al VI	0.304	0.243	0.221	0.253	0.213	0.247	0.094	0.186	0.111	0.177	0.231	0.056	0.188	0.137	0.167	0.033	0.176	0.195	0.042	0.048
Cr	0.003	0.004	0.008	0.004	0.001	0.001	0.001	0.007	0.001	0.000	0.002	0.004	0.002	0.004	0.001	0.001	0.002	0.029	0.005	0.004
Fe <sup>2+</sup>	1.979	1.913	2.018	2.261	2.352	2.521	2.453	2.516	2.441	2.232	2.401	2.347	2.353	1.758	2.440	1.847	1.936	2.042	2.516	2.341
Mn	0.034	0.049	0.053	0.006	0.005	0.011	0.017	0.020	0.015	0.013	0.007	0.004	0.010	0.004	0.008	0.006	0.006	0.007	0.011	0.004
Mg	2.124	2.643	2.715	1.784	1.701	1.968	1.802	2.433	1.789	2.295	1.822	1.990	1.934	2.393	2.047	2.120	2.360	1.530	1.583	2.010
Ca	1.792	1.810	1.729	1.833	1.809	1.878	1.779	1.402	1.773	1.761	1.806	1.839	1.760	1.825	1.775	1.837	1.798	1.797	1.793	1.806
Na	0.410	0.198	0.140	0.358	0.397	0.166	0.594	0.358	0.606	0.406	0.496	0.496	0.551	0.541	0.398	0.548	0.476	0.524	0.473	0.440
K	0.204	0.063	0.058	0.295	0.305	0.116	0.083	0.046	0.084	0.054	0.111	0.077	0.094	0.154	0.122	0.198	0.141	0.251	0.244	0.173
F	0.480	0.420	0.430	0.560	0.580	0.560	0.580	0.510	0.580	0.490	0.570	0.540	0.550	0.420	0.540	0.470	0.450	0.570	0.610	0.540

Примечание. Hbl1 ц – центр зерна в матриксе породы, Hbl1 к – край зерна в матриксе породы, Hbl2 – состав амфибола в плаггиоклаз-амфиболовом симплектите вокруг граната, Hbl3 – состав амфибола в мелкозернистом агрегате в ассоциации с клино- и ортопироксеном. F=Fe/(Fe+Mg).

Note. Hbl1 ц – grain centre, Hbl1 к – grain rim, Hbl2 – composition of amphibole from plagioclase-amphibole symplectite around garnet, Hbl3 – composition of amphibole from fine-grained clino- and orthopyroxene aggregate. F=Fe/(Fe+Mg).

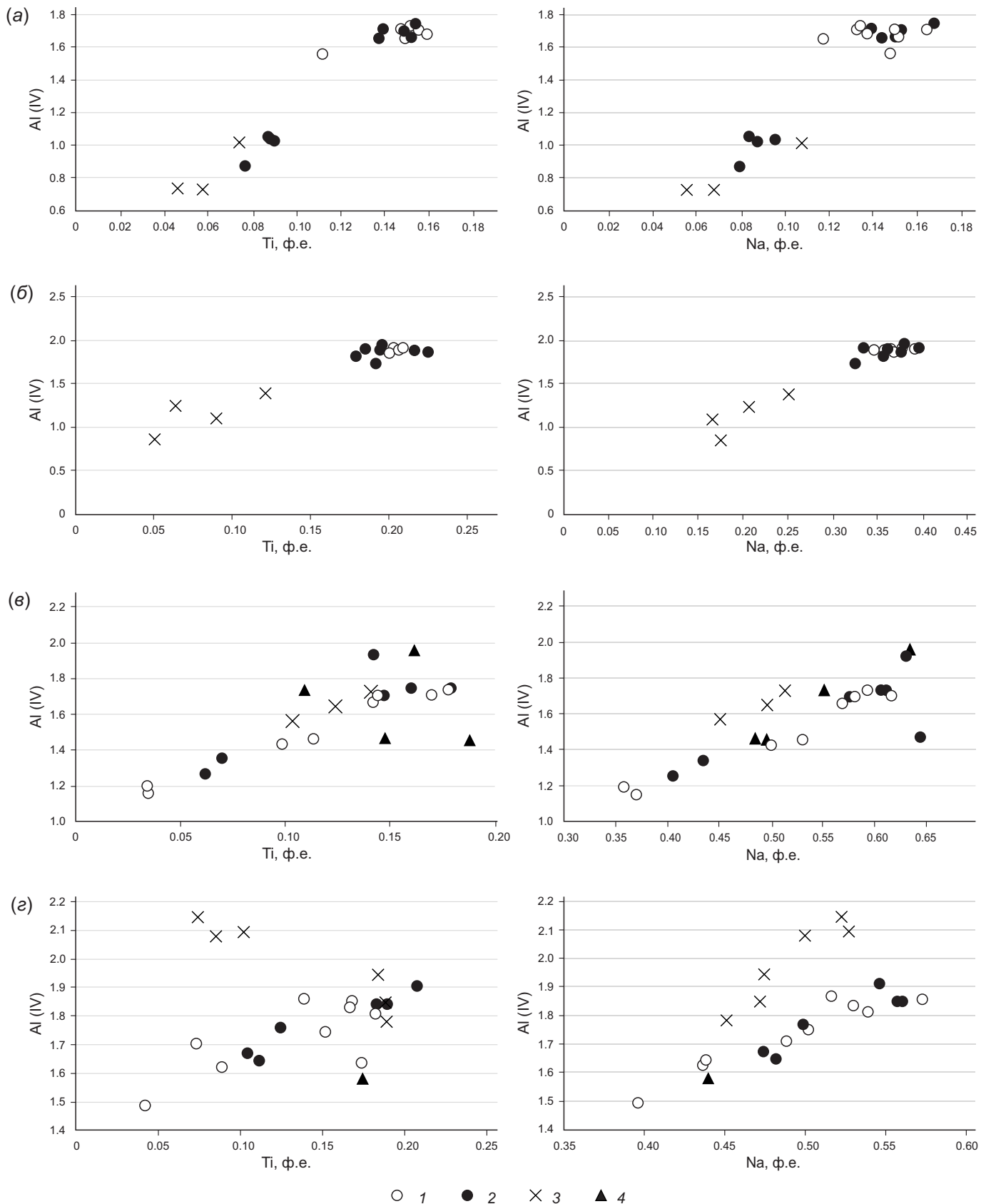


Рис. 3. Состав амфиболов из образцов амфиболитов: (а) – 117, (б) – 158, (е) – 91, (з) – 223.

Условными знаками на диаграммах показан состав амфиболов из: 1 – ядерной части кристаллов в матрице, 2 – краевой части, 3 – плагиоклаз-амфиболовых кайм вокруг граната, 4 – в мелкозернистом агрегате в ассоциации с клино- и ортопироксеном.

Fig. 3. Amphibole composition in amphibolite samples: (a) – sample 117, (б) – sample 158, (е) – sample 91, (з) – sample 223.

Symbols in the diagrams: compositions of the cores (1) and rims (2) of the crystals in the matrix, Pl-Hbl rims round garnet (3), and Crx+Orx+Hbl fine-grained aggregate (4).



**Таблица 4. Состав плагиоклаза из гранатовых амфиболитов (мас. %)**  
**Table 4. Microprobe composition of plagioclase from garnet amphibolites (Kitoy deposit)**

Оксиды	117		158		91			223					
	Pl1 ц	Pl1 к	Pl2	Pl1 ц	Pl1 к	Pl2	Pl2	Pl2	Pl3	Pl1 ц 1	Pl1 ц 2	Pl2 1	Pl2 2
SiO <sub>2</sub>	56.67	55.74	52.31	56.38	46.45	49.18	59.72	53.98	59.43	48.57	59.87	53.47	58.80
TiO <sub>2</sub>	0.00	0.00	0.03	0.02	0.00	0.00	0.02	0.05	0.01	0.00	0.00	0.00	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.90	27.53	29.64	27.21	33.32	31.57	25.33	28.86	25.61	32.58	25.15	29.40	25.77
FeO	0.02	0.05	0.29	0.04	0.11	0.30	0.29	0.57	0.25	0.05	0.05	0.21	0.16
CaO	9.80	10.31	12.77	9.94	17.39	15.39	7.45	11.98	7.72	16.26	7.20	12.68	8.39
Na <sub>2</sub> O	6.20	5.77	4.22	5.80	1.74	2.68	7.35	4.69	7.10	2.07	7.52	4.38	6.83
K <sub>2</sub> O	0.12	0.07	0.04	0.19	0.03	0.03	0.07	0.06	0.07	0.03	0.18	0.10	0.15
Total	99.73	99.51	99.35	99.58	99.08	99.15	100.24	100.23	100.22	99.56	99.97	100.23	100.16
Формульные коэффициенты рассчитаны на 8 O													
Si	2.554	2.520	2.389	2.543	2.157	2.267	2.659	2.440	2.647	2.230	2.670	2.417	2.627
Ti	0.000	0.000	0.001	0.001	0.000	0.000	0.001	0.002	0.000	0.000	0.000	0.000	0.001
Al	1.428	1.467	1.596	1.447	1.824	1.715	1.330	1.537	1.345	1.763	1.322	1.567	1.357
Fe	0.001	0.002	0.011	0.002	0.004	0.012	0.011	0.022	0.009	0.002	0.002	0.008	0.006
Ca	0.473	0.499	0.625	0.480	0.865	0.760	0.355	0.580	0.368	0.800	0.344	0.614	0.402
Na	0.541	0.506	0.374	0.508	0.156	0.240	0.634	0.411	0.614	0.184	0.650	0.384	0.591
K	0.007	0.004	0.002	0.011	0.001	0.002	0.004	0.003	0.004	0.002	0.010	0.006	0.009
xAn	0.460	0.490	0.620	0.480	0.850	0.760	0.360	0.580	0.370	0.810	0.340	0.610	0.400
xAb	0.530	0.500	0.370	0.510	0.150	0.240	0.640	0.410	0.620	0.190	0.650	0.380	0.590
xOrt	0.010	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.010	0.010	0.010

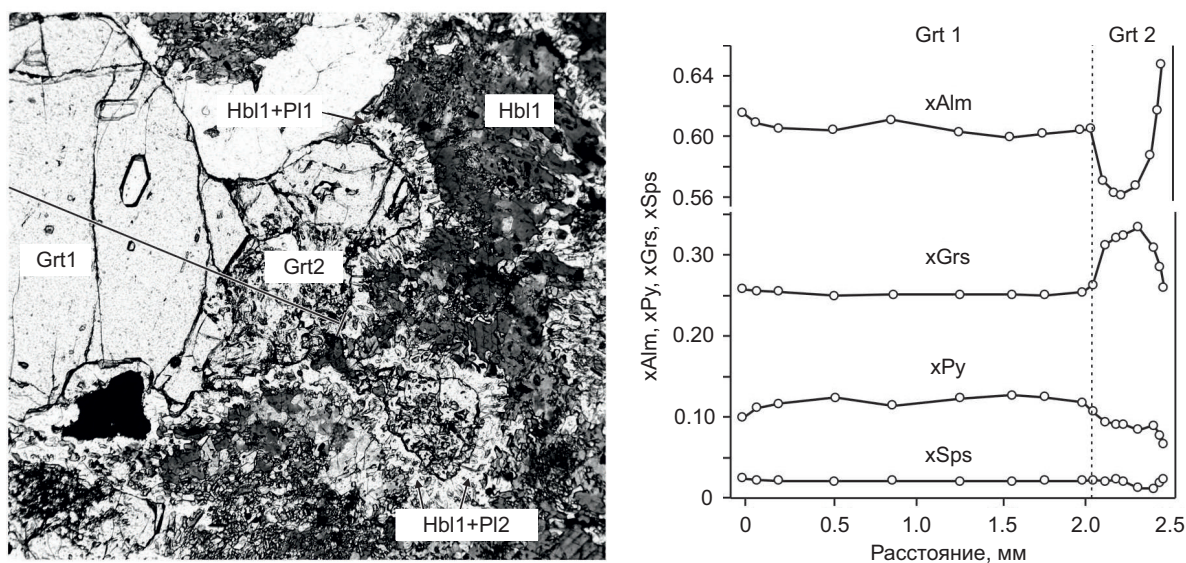
Примечание. Pl1 ц – центр зерна в матриксе, Pl1 к – край зерна в матриксе, Pl2 – состав плагиоклаза в амфибол-плагиоклазовых симплектиках вокруг граната, Pl3 – плагиоклаз в мелкозернистом агрегате с клино- и ортопироксеном, Pl1 ц 1 и ц 2 – состав центра зерна плагиоклаза с мозаичным строением, Pl2 1 – состав каймы плагиоклаза ближе к зерну граната, Pl2 2 – на удалении от зерна.

Note. Pl1 ц – grain centre, Pl1 к – grain rim, Pl2 – plagioclase in amphibole-plagioclase symplectite around garnet, Pl3 – plagioclase from fine-grained clino- and orthopyroxene aggregate, Pl1 ц 1 and ц 2 – composition of the plagioclase grain centre with mosaic texture, Pl2 1 – composition of the plagioclase rim close to the garnet grain, Pl2 2 – composition of the plagioclase rim at a distance from the garnet grain.

зерен и трещинам замещается более основным (Pl2) (An<sub>82-84</sub>). В каймах вокруг граната зафиксирован плагиоклаз с An<sub>62-75</sub>.

Образцы 91 и 223 содержат одинаковую минеральную ассоциацию Grt+Hbl+Pl+Qtz, слагающую матрикс породы. Крупные зерна роговой обманки в этих образцах частично или полностью замещены мелкозернистым агрегатом, состоящим в основном из клино- и ортопироксена и плагиоклаза, реже амфибола (см. рис. 2, д, е). Гранат в этих образцах иногда имеет зональное строение. Выделяются крупные зерна граната, практически не содержащие минеральных включений, вокруг которых местами отмечаются внешние зоны с обильными минеральными включениями (рис. 4). Крупные зерна граната приурочены в основном к крупнозернистым кварцевым прожилкам в породе, а гранат с включениями располагается в меланократовом матриксе. Крупные зерна граната практически незональны, их состав в обоих образцах отвечает Alm 60–62, Py 10–12, Grs 24–25, Sps 2.2–2.5 мол. %. В образце 223 каймы граната отличаются заметным снижением алмадинового компонента до Alm 56 мол. %, который затем вновь повышается по мере приближения к краю зерна

до Alm 65 мол. %. Гроссуляровый компонент, напротив, показывает повышение на границе с ядерной частью граната до Grs 31–33, а затем постепенно снижается до Grs 26. Пироповый компонент показывает незначительное снижение к краю зерна, содержание спессартинового компонента меняется незначительно. Амфибол-плагиоклазовые симплектиты, аналогичные описанным в образцах 117 и 158, встречаются как вокруг кайм граната, так и вокруг ядерных частей, не окруженных каймами. Роговая обманка в этих образцах не обнаруживает четкого разделения по составу в зависимости от структурного положения, но в целом характеризуется более высоким содержанием натрия, чем в образцах первой группы. Содержания элементов в амфиболах лежат в следующих интервалах: Na – 0.35–0.63 ф.е., Ti – 0.03–0.2 ф.е., Al (IV) – 1.16–2.10 ф.е. Плагиоклаз в матриксе породы имеет пятнисто-мозаичное строение (см. рис. 2, з) с чередованием участков с основностью An<sub>76-88</sub> и An<sub>21-36</sub>. Плагиоклаз в каймах вокруг граната также неоднороден по составу, ближе к зернам граната основность составляет An<sub>55-62</sub>, дальше от края зерен An<sub>40-41</sub>. Основность плагиоклаза в мелкозернистом агрегате с клино- и ортопироксеном составляет An<sub>12-15</sub> (табл. 4).



**Рис. 4.** Микрофотография и микрозондовый профиль двух видов граната в обр. 91. Вокруг граната наблюдается амфибол-плагиоклазовая кайма. Линией на фотографии показано положение микрозондового профиля.

**Fig. 4.** Photomicrograph and microprobe compositional profile of the two kinds of garnet in sample 91. Pl-Hbl rim around garnet. Line – location of the microprobe profile.

#### 4. РЕЗУЛЬТАТЫ ТЕРМОБАРОМЕТРИИ

В рассматриваемых породах Китойского блока отчетливо выделяется три минеральных парагенезиса на основании их структурного положения в породе. Первый парагенезис представлен минералами матрикса пород Grt+Hbl+Pl+Qz (+Срх), минералы второго парагенезиса (Hbl+Pl) формируют каймы вокруг зерен граната, третий минеральный парагенезис представлен в мелкозернистом агрегате, замещающем роговую обманку в матриксе породы и состоящем из Срх+Орх+Pl. Первые два парагенезиса выделяются во всех рассматриваемых образцах, третий – только в двух образцах (91 и 223).

Оценки РТ-параметров метаморфизма первых двух минеральных парагенезисов проводились для образцов 117 и 158, в которых установлено отчетливое различие в составах минералов в разных структурных позициях, с использованием ряда минералогических геотермометров и геобарометров, а также программного комплекса TWQ [Berman, Aranovich, 1996]. Для оценки параметров образования пикового парагенезиса использовался состав центральных частей амфиболов, гранатов и плагиоклазов из матрикса пород (табл. 5). Из минералогических геотермометров для оценки пиковых параметров метаморфизма использовался плагиоклаз-роговообманковый геотермометр [Holland, Blundy, 1994] – равновесие эденит-тремолит для кварцсодержащей системы, для образца 158 – гранат-клинопироксеновый геотермометр [Ellis, Green, 1979]. Давление оценивалось с использованием Grt-Hbl-Pl барометров [Dale et al., 2000; Kohn, Spear, 1990].

Каймы, окружающие зерна граната, состоят только из роговой обманки и плагиоклаза, что существенно сужает круг возможных методов для оценки РТ-

параметров. Температура была оценена с использованием Hbl-Pl геотермометров [Holland, Blundy, 1994] (равновесие эденит-ричтерит для бескварцевой системы), оценка давления производилась с использованием роговообманковых геобарометров [Schmidt, 1992; Anderson, Smith, 1995], калибровка которых выполнялась для тоналитов, но в пределах близких РТ-условий и Hbl-Pl геобарометра [Molina et al., 2015].

Полученные значения для пика метаморфизма лежат в интервале  $T=710-770$  °С,  $P=8.3-9.4$  кбар (обр. 158) и  $T=710-740$  °С,  $P=7.6-8.5$  кбар (обр. 117). Для амфибол-плагиоклазовых кайм вокруг граната  $T=700$  °С,  $P=1.2-3.8$  кбар (обр. 158),  $T=690$  °С,  $P=1.3-4.2$  кбар (обр. 158).

В образцах 91 и 223 амфибол в основной массе замещается мелкозернистым агрегатом, состоящим из клино- и ортопироксена и плагиоклаза. Состав амфиболов в этих образцах варьируется независимо от структурного положения (см. рис. 3, в, г), что, вероятно, связано с частичным изменением амфиболов в результате наложенных высокотемпературных процессов, приведших к образованию дупироксеновой ассоциации. В связи с этим проведение РТ-оценок с использованием состава амфиболов представляется затруднительным. Оценка температур с использованием дупироксенового геотермометра [Bertrand, Mercier, 1985] показала значение 890 °С.

#### 5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

В изученных гранатовых амфиболитах выделяется три минеральных парагенезиса, отличающихся по структурному положению и составу слагающих их минералов. Первый парагенезис – Grt+Hbl1+Pl1+Qz ( $\pm$ Срх1) – слагает матрикс пород, второй – Hbl2+Pl2 – образует

Таблица. 5. РТ-параметры метаморфизма амфиболитов Китойского месторождения  
Table 5. PT-parameters of metamorphism of amphibolites (Kitoy deposit)

Обр.	Части зерен	TWQ	HB1	HB2	EG79	TWQ	DHP2000	KS	Schm 92	AS95	M 2015	BM85
158	c	772	740		713	9.4	8.8	8.3				
	c	764	735		724	9.4	8.8	8.5				
	r			703					1.8	1.2	3.8	
	r			705					1.7	1.5	-	
117	c	717	710			8	7.9	7.6				
	c	738	712			8.5	8	7.8				
	r			696					1.5	1.3	-	
	r			689					3.3	3.1	4.2	
91	sym											890

Примечание. c – расчеты для центральных частей минералов, r – для плагиоклаз-амфиболовых кайм, sym – для двупироксеновых симплектитов. И использованные геотермометры и геобарометры: HB – [Holland, Blundy, 1994] (1 – уравнение эденит-тремолит для кварцевых систем, 2 – эденит-ричтерит для бескварцевых); EG79 – [Ellis, Green, 1979]; DHP2000 – [Dale et al., 2000]; KS – [Kohn, Spear, 1990]; Schm 92 – [Schmidt, 1992]; AS95 – [Anderson, Smith, 1995]; M 2015 – [Molina et al., 2015]; BM85 – [Bertrand, Mercier, 1985].

Note. Estimations for the central parts of grains (c), plagioclase-amphibole rims (r), and two-pyroxene symplectites (sym). Geothermometers and geobarometers used for calculations: HB – [Holland, Blundy, 1994] (1 – edenite-tremolite equation for quartz-bearing systems, 2 – edenite-richterite equation for quartz-free systems); EG79 – [Ellis, Green, 1979]; DHP2000 – [Dale et al., 2000]; KS – [Kohn, Spear, 1990]; Schm 92 – [Schmidt, 1992]; AS95 – [Anderson, Smith, 1995]; M 2015 – [Molina et al., 2015]; BM85 – [Bertrand, Mercier, 1985].

каймы вокруг зерен граната и третий – Сrx2+Оrx+Pl3 – образует мелкозернистый агрегат, замещающий роговую обманку матрикса. Первые два минеральных парагенезиса проявлены во всех образцах, третий – только в двух из них.

В образцах 117 и 158 составы амфиболов и плагиоклазов в матриксе породы и каймах вокруг граната резко различаются между собой. На этом основании можно предполагать, что составы минералов матрикса не были существенно изменены в результате наложенных процессов и полученные по ним РТ-параметры отвечают пику метаморфизма. Полученные оценки давления лежат в широком диапазоне – от 8.3 до 9.4 кбар. Оценки давления более 9 кбар выглядят сомнительными, поскольку при полученных температурах  $T=710-770$  °C попадают в область устойчивости кианита, однако в глиноземистых гнейсах, расположенных в непосредственной близости, отмечаются только силлиманит и андалузит [Glebovitskii et al., 2011]. Таким образом, вероятнее всего, максимальное давление пика метаморфизма не превышало 8.8 кбар, установленных с использованием геобарометра [Dale et al., 2000]. Полученные РТ-параметры метаморфизма близки к таковым по глиноземистым гнейсам этого района, опубликованным ранее ( $T = 780$  °C и  $P = 6.6-7.7$  кбар) [Lepezin, Khlestov, 2009].

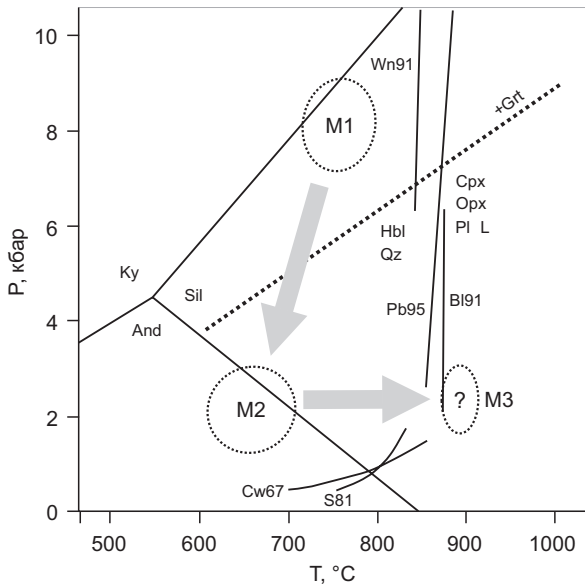
Давление, рассчитанное по минералам кайм вокруг граната (Hbl2+Pl2), существенно ниже пикового и лежит в интервале 1.3–4.2 кбар. Присутствие андалузита в сопряженных глиноземистых гнейсах [Glebovitskii et al., 2011] подтверждает, что низкобарический этап метаморфизма действительно имел место в изучаемом комплексе; кроме того, давление метаморфизма при температуре около 700 °C не должно превышать 2.5 кбар.

Таким образом, параметры метаморфизма амфибол-плагиоклазовых кайм, вероятнее всего, составляют:  $T \sim 690-705$  °C и  $P=1.3-2.5$  кбар, т.е. их формирование могло происходить в результате снижения давления на регрессивной стадии метаморфизма при слабо меняющейся температуре (рис. 5).

Третий минеральный парагенезис (Сrx+Оrx+Pl3) в отличие от первых двух, развит только в части образцов. Этот минеральный парагенезис встречается в мелкозернистом (порядка 0.1 мм) минеральном агрегате, замещающем роговую обманку матрикса. Анализ экспериментальных данных по устойчивости минеральной ассоциации Сrx+Оrx указывает на то, что температура ее образования должна превышать 850 °C при давлении выше 2 кбар (рис. 5). С этим согласуются полученные данные по двупироксеновому геотермометру ( $T=890$  °C). В пределах симплектитов, содержащих двупироксеновую ассоциацию, составы плагиоклаза и амфибола сильно варьируются, что не позволяет выделить минералы, относящиеся к этому этапу метаморфизма. В связи с этим оценку давления третьего этапа по данным типам пород провести не представляется возможным. Можно утверждать, что она соответствует низким или умеренным давлениям, поскольку в симплектите отсутствует гранат.

Формирование двух типов граната, обнаруженных в образцах 91 и 223, может быть связано с разными условиями их кристаллизации. Крупный гранат формировался в крупнозернистых кварцевых прожилках, в то время как более мелкий – в меланократовом матриксе породы. Поскольку плагиоклаз-амфиболовые каймы развиваются вокруг обоих типов граната, их формирование происходило на прогрессивной или пиковой стадии метаморфизма, предшествующей снижению давления.





**Рис. 5.** Оценки РТ-параметров метаморфизма (показаны эллипсами) и предполагаемые РТ-тренды двухэтапной эволюции метаморфизма (серые стрелки) для гранатовых амфиболитов восточной части Китоийского блока.

Линиями показаны экспериментальные данные об устойчивости минеральной ассоциации Cpx+Opx+Pl: WN91 – [Winther, Newton, 1991], PB95 – [Patino-Douce, Beard, 1995], BL91 – [Beard, Lofgren, 1991], CW67 – [Choudhuri, Winkler, 1967], S81 – [Spear, 1981]. Пунктирной линией (+Grt) показана линия появления граната в основных породах [Green, Ringwood, 1967].

**Fig. 5.** Estimated P-T-parameters of metamorphism (ellipses) and supposed P-T path of the two-stage metamorphism (grey arrows) for garnet amphibolites of the eastern part of the Kitoi block.

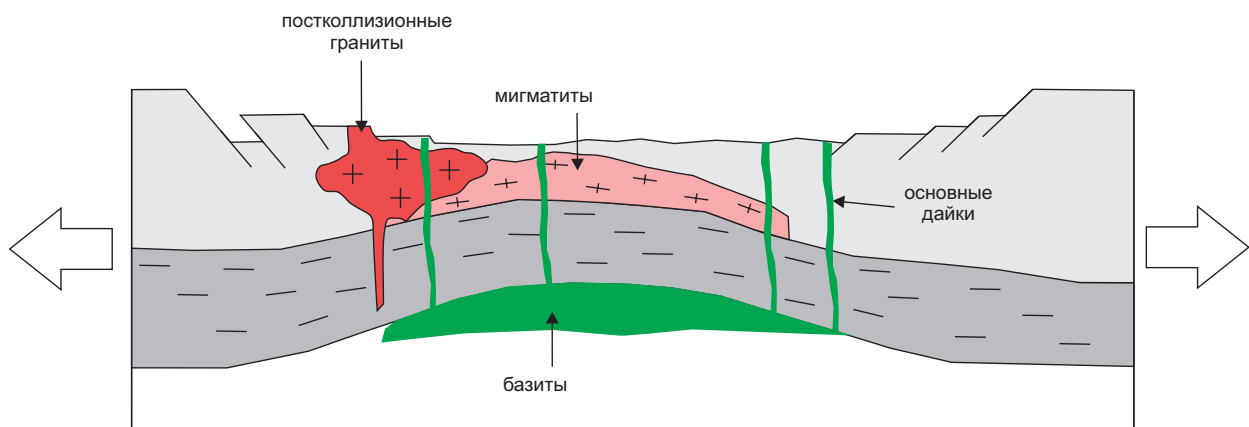
Lines show experimental data on the Cpx+Opx+Pl assemblage stability field: WN91 – [Winther, Newton, 1991], PB95 – [Patino-Douce, Beard, 1995], BL91 – [Beard, Lofgren, 1991], CW67 – [Choudhuri, Winkler, 1967], S81 – [Spear, 1981]. The dotted line (+Grt) indicate the line of garnet appearance in mafic rocks [Green, Ringwood, 1967].

Таким образом, можно предположить два последовательных этапа метаморфизма в породах восточной части Китоийского блока. Первый этап характеризовался пиковыми РТ-параметрами амфиболитовой фации:  $T=710-770\text{ }^{\circ}\text{C}$  и  $P=8.3-8.8\text{ кбар}$  и завершился эпизодом субизотермальной декомпрессии до давлений около 1.3–2.5 кбар. Второй этап это низко- или умеренно-барический метаморфизм в температурных условиях гранулитовой фации.

Парагенезисы последнего гранулитового этапа метаморфизма проявлены только в двух изученных образцах из четырех. Это может объясняться либо локальностью процесса, либо разницей в химическом составе пород. Валовый состав образца 117 действительно резко отличается от остальных повышенной кремнекислотностью, однако остальные образцы крайне близки по составу. Следовательно, можно предположить, что метаморфизм вызван локальным прогревом, вероятно, со стороны магматических тел мафитового и ультрамафитового состава, описанных в районе исследования. Такая последовательность метаморфических

событий хорошо коррелирует с данными, полученными по глиноземистым рудам Китоийского месторождения [Glebovitskii et al., 2011], согласно которым наблюдается замещение андалузита более поздним силлиманитом.

**Тектоническая модель.** Установленная в породах Китоийского блока последовательность метаморфических событий может быть объяснена в рамках одного тектонического цикла коллизионного орогенеза. Пиковые температуры метаморфизма достигаются при коллизионном утолщении коры или в обстановке постколлизионного растяжения, в результате чего в породах фиксируются декомпрессионные минеральные микроструктуры. На финальной стадии растяжения происходит внедрение горячих магматических расплавов, приводящих к повторному прогреву и наложенному гранулитовому метаморфизму уже при низких давлениях. Высокие температуры второго этапа метаморфизма позволяют предположить, что внедряющийся расплав также был высокотемпературным, вероятно, основного состава (рис. 6).



**Рис. 6.** Предположительная тектоническая модель формирования метаморфического комплекса Китоийского блока.

**Fig. 6.** Proposed tectonic model of the Kitoi block showing the formation of its metamorphic complex.

## 6. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В гранатовых амфиболитах восточной части Китайского блока фиксируется два последовательных этапа метаморфизма. Первый этап происходил в условиях амфиболитовой фации с пиковыми параметрами:  $T=710-770$  °C и  $P=8.3-8.8$  кбар. Регрессивная стадия метаморфизма характеризуется субизотермическим снижением давления до величин  $P=1.3-2.5$  кбар при  $T=700$  °C. Второй этап метаморфизма проявлен локально и выражается в развитии двупироксеновой ассоциации при

температуре около 890 °C. Проявление второго эпизода метаморфизма, вероятно, проявлено локально и может быть связано с внедрением тел мафического и ультрамафического состава.

## 7. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы благодарны О.М. Туркиной за ценные замечания. Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

## 8. ЛИТЕРАТУРА/REFERENCES

Anderson J.L., Smith D.R., 1995. The effects of temperature and  $f_0^2$  on the Al-in-hornblende barometer. *American Mineralogist* 80 (5-6), 549-559. <https://doi.org/10.2138/am-1995-5-614>.

Beard J.S., Lofgren G.E., 1991. Dehydration melting and water-saturated melting of basaltic and andesitic greenstones and amphibolites at 1, 3, and 6.9 kb. *Journal of Petrology* 32 (2), 365-401. <https://doi.org/10.1093/petrology/32.2.365>.

Bertrand P., Mercier J.-C.C., 1985. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system? *Earth and Planetary Science Letters* 76 (1-2), 109-122. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(85\)90152-9](https://doi.org/10.1016/0012-821X(85)90152-9).

Blundy J.D., Holland T.J.B., 1990. Calcic amphibole equilibria and a new amphibole-plagioclase geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 104 (2), 208-224. <https://doi.org/10.1007/BF00306444>.

Berman R.G., Aranovich L.Y., 1996. Optimized standard state and mixing properties of minerals: I. Model calibration for olivine, orthopyroxene, cordierite, garnet and ilmenite in the system  $FeO \pm MgO \pm CaO \pm Al_2O_3 \pm SiO_2 \pm TiO_2$ . *Contributions to Mineralogy and Petrology* 126, 1-24. <https://doi.org/10.1007/s004100050232>.

Choudhuri A., Winkler H.G.F., 1967. Anthophyllit und hornblende in einigen metamorphen reaktionen. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 14 (4), 293-315. <https://doi.org/10.1007/BF00373809>.

Dale J., Holland T., Powell R., 2000. Hornblende-garnet-plagioclase thermobarometry: a natural assemblage calibration of the thermodynamics of hornblende. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 140 (3), 353-362. <https://doi.org/10.1007/s004100000187>.

Donskaya T.V., Gladkochub D.P., Pisarevsky S.A., Poller U., Mazukabzov A.M., Bayanova T.V., 2009. Discovery of Archaean crust within the Akitkan orogenic belt of the Siberian craton: New insight into its architecture and history. *Precambrian research* 170 (1-2), 61-72. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2008.12.003>.

Ellis D.J., Green D.H., 1979. An experimental study of the effect of Ca upon garnet-clinopyroxene Fe-Mg exchange equilibria. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 71 (1), 13-22. <https://doi.org/10.1007/BF00371878>.

Gerya T.V., Maresh W.V., 2004. Metapelites of the Kanskiy granulite complex (eastern Siberia): kinked P-T paths and geodynamic model. *Journal of Petrology* 45 (7), 1393-1412. <https://doi.org/10.1093/petrology/egh017>.

Gladkochub D.P., Donskaya T.V., Mazukabzov A.M., Sal'nikova E.B., Sklyarov E.V., Yakovleva S.Z., 2005. The age and geodynamic interpretation of the Kitoi granitoid complex (southern Siberian craton). *Geologiya i Geofizika (Russian Geology and Geophysics)* 46 (11), 1121-1133.

Glebovitskii V.A., Levchenkov O.A., Levitskii V.I., Rizvanova N.G., Levskii L.K., Bogomolov E.S., Levitskii I.V., 2011. Age stages of metamorphism at the Kitoi sillimanite schist deposit, southeastern Prisaian'e. *Doklady Earth Sciences* 436 (1), 13-17. <https://doi.org/10.1134/S1028334X11010247>.

Glebovitsky V.A., Khil'tova V.Y., Kozakov I.K., 2008. Tectonics of the Siberian Craton: interpretation of geological, geophysical, geochronological, and isotopic geochemical data. *Geotectonics* 42 (1), 8-20. <https://doi.org/10.1134/S0016852108010020>.

Green D.H., Ringwood A.E., 1967. An experimental investigation of the gabbro to eclogite transformation and its petrological applications. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 31 (5), 767-833. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(67\)80031-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(67)80031-0).

Holland T., Blundy J., 1994. Non-ideal interactions in calcic amphiboles and their bearing on amphibole-plagioclase thermometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 116 (4), 433-447. <https://doi.org/10.1007/BF00310910>.

Khlestov V.V., Ushakova E.N., 1965. Metamorphism of rocks of the Kitoi suite in the East Sayan. In: *Materials on genetic and experimental mineralogy. Proceedings of the Institute of Geology and Geophysics of SB AS USSR. Issue 3. No. 3. Nauka, Siberian Branch, Novosibirsk, p. 245-286 (in Russian) [Хлестов В.В., Ушакова Е.Н. Метаморфизм пород китойской свиты в Восточном Саяне // Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Труды Института геологии и геофизики СО АН СССР. Вып. 3. № 3. Новосибирск: Наука. Сибирское отделение, 1965. С. 245-286].*

Kohn M.J., Spear F.S., 1990. Two new geobarometers for garnet amphibolites with applications to southeastern Vermont. *American Mineralogist* 75 (1-2), 89-96.

Lepezin G.G., Khlestov V.V., 2009. Mass transfer at the contact of high-Al metapelites and metabasites: An example of the high-temperature Sharyzhgalskiy Complex, Eastern Sayan. *Geochemistry International* 47 (3), 244-259. <https://doi.org/10.1134/S0016702909030033>.

Levitskii V.I., Reznitskii L.Z., Sal'nikova E.B., Levitskii I.V., Kotov A.B., Barash I.G., Yakovleva S.Z., Anisimova I.V., Plotkina Y.V., 2010. Age and origin of the Kitoi sillimanite schist

deposit, eastern Siberia. *Doklady Earth Sciences* 431 (1), 394–398. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1003027X>.

Levitskii V.I., Sandimirova G.P., Mel'nikov A.I., 2001. Correlation of endogenic processes in the Precambrian complexes of the southeastern Sayan Region. In: A.I. Sizykh (Ed.), *Geodynamic regimes of formation of the Central-Asian fold belt*. Intermet Engineering Publishing House, Moscow, p. 177–213 (in Russian) [Левицкий В.И., Сандимирова Г.П., Мельников А.И. Корреляция эндогенных процессов в докембрийских комплексах Юго-Восточного Присяянья // Геодинамические режимы формирования Центрально-Азиатского складчатого пояса / Ред. А.И. Сизых. М.: Интермет Инжиниринг, 2001. С. 177–213].

Likhanov I.I., Nozhkin A.D., Reverdatto V.V., Krylov A.A., Kozlov P.S., Khiller V.V., 2016. Metamorphic evolution of ultra-high-temperature Fe- and Al-rich granulites in the south Yenisei ridge and tectonic implications. *Petrology* 24 (4), 392–408. <https://doi.org/10.1134/S086959111603005X>.

Molina J.F., Moreno J.A., Castro A., Rodríguez C., Fershtater G.B., 2015. Calcic amphibole thermobarometry in metamorphic and igneous rocks: New calibrations based on plagioclase/amphibole Al-Si partitioning and amphibole/liquid Mg partitioning. *Lithos* 232, 286–305. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2015.06.027>.

Nozhkin A.D., Turkina O.M., 1993. Granulite Geochemistry of Kan and Sharyzhalgai Complexes. OIGGM SO RAN, Novosibirsk, 223 p. (in Russian) [Ножкин А.Д., Туркина О.М. Геохимия гранулитов Канского и Шарыжалгайского комплексов. Новосибирск: Изд-во ОИГГМ РАН, 1993. 223 с.].

Nozhkin A.D., Turkina O.M., Mel'gunov M.S., 2001. Geochemistry of the metavolcanosedimentary and granitoid rocks of the Onot greenstone belt. *Geochemistry International* 39 (1), 27–44.

Patino-Douce A.E., Beard J.S., 1995. Dehydration-melting of biotite gneiss and quartz amphibolite from 3 to 15 kbar. *Journal of Petrology* 36 (3), 707–738. <https://doi.org/10.1093/petrology/36.3.707>.

Poller U., Gladkochub D., Donskaya T., Mazukabzov A., Silyarov E., Todt W., 2005. Multistage magmatic and metamorphic evolution in the Southern Siberian craton: Archaean and Paleoproterozoic zircon ages revealed by SHRIMP and TIMS. *Precambrian Research* 136 (3–4), 353–368. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2004.12.003>.

Rogers J.J.W., Santosh M., 2002. Configuration of Columbia, a Mesoproterozoic supercontinent. *Gondwana Research* 5 (1), 5–22. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70883-2](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70883-2).

Rosen O.M., 2003. The Siberian craton: tectonic zonation and stages of evolution. *Geotectonics* 37 (3), 175–192.

Rosen O.M., Condie K.C. (Ed.), Natapov L.M., Nozhkin A.D., 1994. Archaean and Early Proterozoic evolution of the Siberian Craton: a preliminary assessment *Developments in Precambrian Geology* 11, 411–459. [https://doi.org/10.1016/S0166-2635\(08\)70228-7](https://doi.org/10.1016/S0166-2635(08)70228-7).

Sal'nikova E.B., Kotov A.B., Levitskii V.I., Reznitskii L.Z., Mel'nikov A.I., Kozakov I.K., Kovach V.P., Barash I.G., Yakovleva S.Z., 2007. Age constraints of high-temperature metamorphic events in crystalline complexes of the Irkut block,

the Sharyzhalgai ledge of the Siberian platform basement: results of the U-Pb single zircon dating. *Stratigraphy and Geological Correlation* 15 (4), 343–358. <https://doi.org/10.1134/S0869593807040016>.

Schmidt M.W., 1992. Amphibole composition in tonalite as a function of pressure: an experimental calibration of the Al-in-hornblende barometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 110 (2–3), 304–310. <https://doi.org/10.1007/BF00310745>.

Shirobokov I.M., Sezko A.I., 1979. The main features of Precambrian stratigraphy of the East Sayan. In: Main features of the geology of the East Sayan. East Siberian Book Publishing House, Irkutsk, p. 8–36 (in Russian) [Широбок И.М., Сезько А.И. Основные черты стратиграфии докембрия Восточного Саяна // Основные черты геологии Восточного Саяна. Иркутск: Восточно-Сибирское книжное изд-во, 1979. С. 8–36].

Spear F.S., 1981. An experimental study of hornblende stability and compositional variability in amphibolite. *American Journal of Science* 281 (6), 697–734. <https://doi.org/10.2475/ajs.281.6.697>.

Sukhorukov V.P., 2013. Decompression mineral microtextures in granulites of the Irkut block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics* 54 (9), 1026–1044. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2013.07.017>.

Sukhorukov V.P., Turkina O.M., 2018. The PT path of metamorphism and age of migmatites from the northwestern Irkut block (Sharyzhalgai uplift of the Siberian Platform). *Russian Geology and Geophysics* 59 (6), 673–689. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2018.05.006>.

Sukhorukov V.P., Turkina O.M., Tessalina S., Talavera C., 2018. Sapphirine-bearing Fe-rich granulites in the SW Siberian craton (Angara-Kan block): Implications for Paleoproterozoic ultrahigh-temperature metamorphism. *Gondwana Research* 57, 26–47. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2017.12.012>.

Turkina O.M., Berezhnaya N.G., Lepekhina E.N., Kapitonov I.N., 2012. U-Pb (SHRIMP II), Lu-Hf isotope and trace element geochemistry of zircons from high-grade metamorphic rocks of the Irkut terrane, Sharyzhalgai Uplift: implications for the Neoproterozoic evolution of the Siberian craton. *Gondwana Research* 21 (4), 801–817. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2011.09.012>.

Turkina O.M., Kapitonov I.N., Adamskaya E.V., 2017. Geochemistry of Paleoproterozoic granitoids of the southwest of the Siberian Craton (Sharyzhalgai uplift): evidence of the contribution of mantle and crust sources. In: *Petrology of igneous and metamorphic complexes*. Proceedings of the All-Russian Conference with international participation. TsNTI Publishing House, Tomsk, p. 414–419 (in Russian) [Туркина О.М., Капитонов И.Н., Адамская Е.В. Геохимия палеопротерозойских гранитоидов юго-запада Сибирского кратона (Шарыжалгайский выступ): свидетельства вклада мантийных и коровых источников // Петрология магматических и метаморфических комплексов: Материалы Всероссийской конференции с международным участием. Томск: Изд-во ЦНТИ, 2017. С. 414–419].



*Turkina O.M., Sukhorukov V.P., 2015a.* Early Precambrian high-grade metamorphosed terrigenous rocks of granulite-gneiss terranes of the Sharyzhalgai uplift (south-western Siberian craton). *Russian Geology and Geophysics* 56 (6), 874–884. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.05.004>.

*Turkina O.M., Sukhorukov V.P., 2015b.* Stages and conditions of metamorphism of mafic granulites in the Early Precambrian complex of the Angara–Kan terrane (south-western Siberian craton). *Russian Geology and Geophysics*

56 (11), 1544–1567. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.10.004>.

*Winther K.T., Newton R.C., 1991.* Experimental melting of hydrous low-K tholeiite: evidence on the origin of Archaean cratons. *Bulletin of the Geological Society of Denmark* 39, 213–228.

*Zhao G.C., Cawood P.A., Wilde S.A., Sun M., 2002.* Review of global 2.1–1.8 Ga orogens: implications for a pre-Rodinia supercontinent. *Earth-Science Reviews* 59 (1–4), 125–162. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(02\)00073-9](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(02)00073-9).

---

**VASILY P. SUKHORUKOV**

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher  
V.S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, SB RAS  
3 Academician Koptyug Ave, Novosibirsk 630090, Russia  
e-mail: [svp@igm.nsc.ru](mailto:svp@igm.nsc.ru)  
ORCID: 0000-0002-6658-2360

**VALENTINA B. SAVEL'EVA**

Candidate of Geology and Mineralogy, Senior Researcher  
Institute of the Earth's Crust, Siberian Branch of RAS  
128 Lermontov St, Irkutsk 664033, Russia  
e-mail: [vsavel@crust.irk.ru](mailto:vsavel@crust.irk.ru)

**ВАСИЛИЙ ПЕТРОВИЧ СУХОРУКОВ**

канд. геол.-мин. наук, с.н.с.  
Институт геологии и минералогии СО РАН  
630090, г. Новосибирск, пр-т ак. Коптюга, 3, Россия

**ВАЛЕНТИНА БОРИСОВНА САВЕЛЬЕВА**

канд. геол.-мин. наук, с.н.с.  
Институт земной коры СО РАН  
664033, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия