

DOI: 10.30695/zrmo/2019.1482.01

А. А. РОДИОНОВ, И. В. БУЧКО

**МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ,
СОСТАВ ИСХОДНОГО РАСПЛАВА И ПАРАМЕТРЫ
КРИСТАЛЛИЗАЦИИ ГАББРОИДОВ ДЖИГДИНСКОГО ИНТРУЗИВА
(ЮГО-ВОСТОЧНОЕ ОБРАМЛЕНИЕ СИБИРСКОГО КРАТОНА)**

*Институт геологии и природопользования ДВО РАН,
675000, Благовещенск, Рёлочный пер., 1;
e-mail: scream_amsu@mail.ru*

В статье приведены результаты расчетов состава исходного расплава и параметров кристаллизации габброидов Джигдинского интрузива — типичного представителя пермо-триасовых ультрабазит-базитовых интрузий в пределах юго-восточного обрамления Сибирского кратона. Показано, что исходный расплав имел основной состав и кристаллизовался при давлении 4—6 кбар и начальной температуре 1125—1160 °С. Фракционирование этого расплава привело к формированию, с одной стороны, габбро и габбро-диоритов, с другой стороны — габбро и габбро-диоритов, обогащенных натрием.

Ключевые слова: ультрабазит-базитовые интрузии, моделирование, исходный расплав, габбро, Джигдинский интрузив.

**A. A. RODIONOV, I. V. BUCHKO. MINERAL AND GEOCHEMICAL
CHARACTERISTICS, COMPOSITION OF INITIAL MELT, AND PARAMETERS
OF CRYSTALLIZATION FOR DZHIGDA GABBROIDS
(SOUTH-EASTERN FRAMING OF THE SIBERIAN CRATON)**

Institute of Geology and Nature Management, Far Eastern Branch RAS, Blagoveshchensk, Russia

Dzhigda gabbroid massif is a typical representative of the Permo-Triassic ultramafic-mafic intrusions in the south-eastern framing of the Siberian Craton. The article presents results of calculations of the composition and crystallization parameters of the melt that produced the gabbroids. It is shown that crystallization of the melt occurred at the pressure of 4—6 kbar and initial temperature of 1125—1160 °C. Fractionation of the melt led to the formation of gabbro and gabbrodiorites, on the one hand, and to the formation of gabbro and gabbro-diorites enriched with sodium, on the other hand. Analysis of available data shows that the compositions of the initial melt and crystallization parameters for Permo-Triassic ultramafic-mafic intrusions in the south-eastern framing of the Siberian Craton are significantly differ. Perhaps this is a characteristic of this stage of magmatism. In addition, rocks from these intrusions have obvious features of geochemical duality, which is a combination of signature as intraplate and suprasubduction origin.

Keywords: ultramafic-mafic intrusions, modeling, initial melt, gabbro, Dzhigda intrusion.

Юго-восточное обрамление Сибирского кратона характеризуется широким проявлением разновозрастного ультрамафит-мафитового магматизма. Результаты геохронологических исследований последних лет показывают, что

многие массивы ультраосновного-основного составов этой структуры, ранее относимые к докембрию, имеют палеозойский и мезозойский возраст (Бучко и др., 2007а, б; Бучко и др., 2008; Бучко и др., 2010а, б; Бучко и др., 2011; Бучко и др., 2017, 2018). Один из наиболее мощных этапов ультрабазит-базитового магматизма в регионе приходится на рубеж перми и триаса. От понимания генетических особенностей этого магматизма во многом зависит разработка корректной геодинамической модели формирования обсуждаемой геологической структуры. В этой связи нами были проведены комплексные минералого-геохимические исследования габброидов Джигдинского интрузива (рис. 1), являющегося типичным представителем массивов и интрузий этой возрастной группы (Родионов и др., 2018).

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

Петрографические особенности пород исследовались с помощью методов оптической и электронной микроскопии. Изучение состава породообразующих минералов проводилось в Аналитическом центре минералого-геохимических исследований ИГиП ДВО РАН (г. Благовещенск, аналитик В. И. Рождествина) с использованием растрового электронного микроскопа JSM 6390LV JEOL (Япония), оснащенного системой микроанализа Oxford INCA Energy 350-Wave (Англия) с дисперсией по энергии и длине волны. Для обеспечения стока заряда на поверхность аншлифов методом термического распыления в вакууме наносился углерод. Параметры зонда при съемке — 20 keV, 67 μ A. Накопления спектров с экспозицией 60 сек, количественная оптимизация выполнена на Co.

КРАТКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОБЪЕКТА ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследуемый Джигдинский интрузив находится в пределах Иликанского террейна (блока) в западной части Джугджуро-Станового супертеррейна (рис. 1). Интрузив представляет собой вытянутое в северо-западном направлении тело, протяженностью около 4.5—5.0 км и шириной 0.8—1.2 км. Вещающими для интрузива являются метаморфические породы иликанской серии, его взаимоотношения с гнейсовидными гранитоидами древнестанового комплекса остаются спорными (рис. 1). В существующих региональных стратиграфических схемах (Агафоненко и др., 2007; Петрук, Козлов, 2009) они отнесены к нижнему архею, хотя в настоящее время имеются Sm-Nd изотопно-геохимические и U-Pb геохронологические данные о том, что возраст этих образований не древнее позднего архея (Ларин и др., 2004; Ларин и др., 2006; Сальникова и др., 2006; Великославинский и др., 2011).

В современных схемах корреляции магматических комплексов восточной Сибири габброиды Джигдинского интрузива так же, как и большинство ультрамафит-мафитовых массивов юго-восточного обрамления Сибирского кратона, отнесены к хани-майскому комплексу метаморфизованных базитов и ультрабазитов условно раннеархейского возраста (Агафоненко и др., 2007). В то же время нами показано, что возраст габброидов Джигдинского интрузива, обогащенных натрием, составляет 244 ± 5 млн лет (Родионов и др., 2018).

Габбро, габбро-диориты, а также серия габбро, габбро-диоритов с повышенной натриевой щелочностью Джигдинского интрузива представляют со-

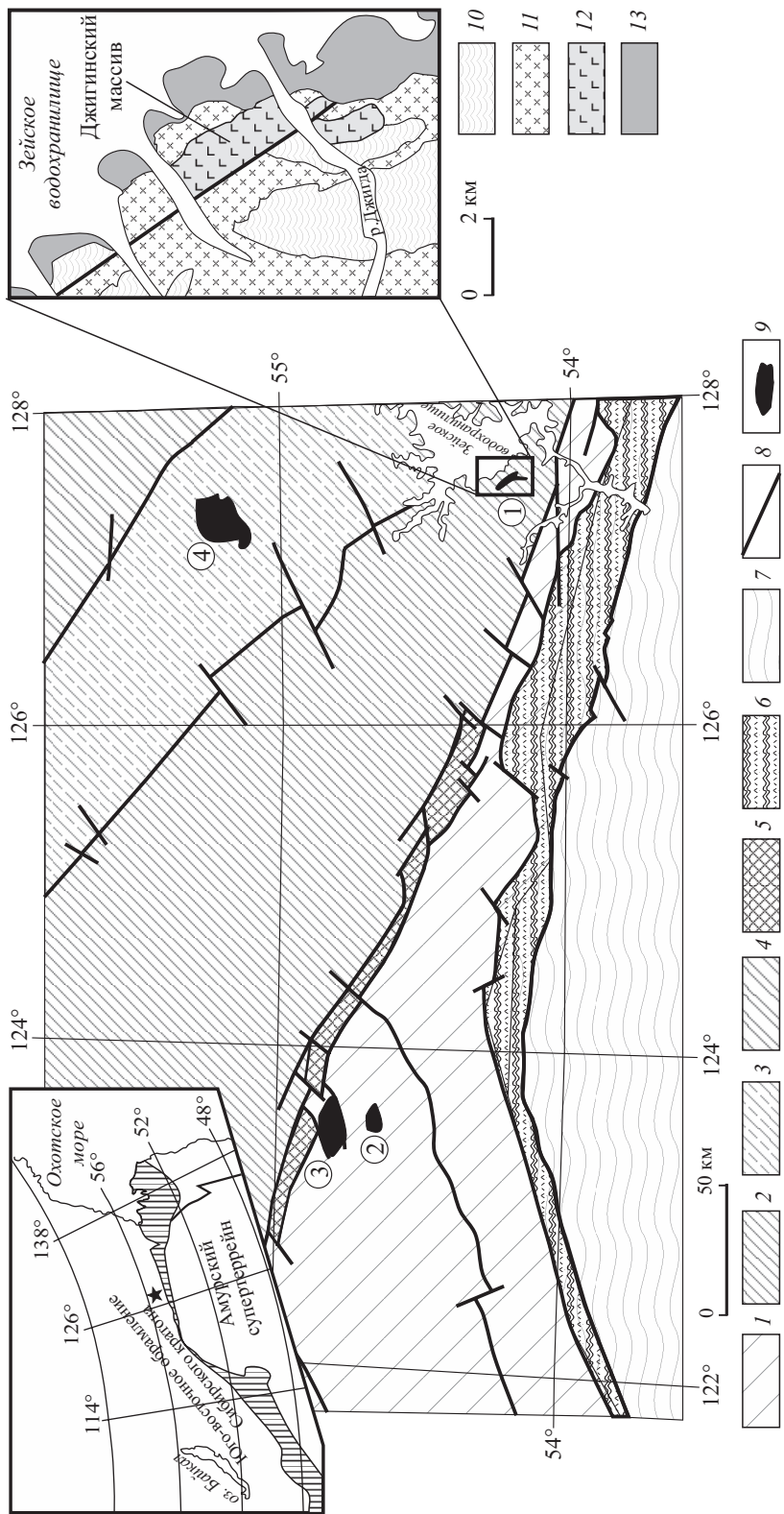


Рис. 1. Схема тектонического районирования юго-восточного обрамления Сибирского кратона и схематическая геологическая карта Джигинского интрузива. Составлена по опубликованным данным (Парфенов и др., 2003; Сережников, Волкова, 2007; Агафенко и др., 2007; Петрук, Козлов, 2009).

1 — Селентинно-Становой супертеррейны; 2 — 4 — террейны Джугджуро-Становой супертеррейны; 5 — Иликанский, 3 — Брянтинский, 4 — Кулуринский, 5 — Джелтулакская шовная зона; 6 — Монголо-Охотский складчатый пояс; 7 — Амурский супертеррейны; 8 — разломы; 9 — пермо-триасовые ультрамафит-мафитовые интрузии. Цифрами в кружках указаны массивы и интрузивы, упоминаемые в тексте: 1 — Джигинский, 2 — Амунактинский, 3 — Лучинский, 4 — Лучинский. Звездочкой на врезе показано положение Джигинского интрузива. На выноске приведена схематическая геологическая карта Джигинского интрузива: 10 — метаморфические породы иликанской серии; 11 — гнейсовидные граниты древнестанового комплекса; 12 — породы Джигинского интрузива; 13 — кайнозойские рыхлые отложения.

Fig. 1. Tectonic scheme for the southeastern framing of the Siberian Craton and schematic geological map of the Dzhigida intrusive, compiled according to (Parfenov et al., 2003; Seryozhnikov, Volkova, 2007; Agafonko et al., 2007; Petruk, Kozlov, 2009).

бой мелко-среднезернистые породы с массивной текстурой и реликтовой габбровой структурой. Среди более ранних минералов преобладают плагиоклаз (50—65 %), единичные реликтовые зерна клинопироксена и амфиболы (более 5 %). В серии габброидов, обогащенных натрием, присутствует первичный биотит (до 5—7 %). В шлифах наблюдается отчетливый идиоморфизм плагиоклаза относительно пироксена. Эти минералы замещаются более поздним вторичным амфиболом, а затем и хлоритом. Акцессорные минералы представлены титаномагнетитом, апатитом и цирконом.

МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ПОРОД

Состав *клинопироксена* отвечает авгиту ($Wo_{28-29}En_{48-42}Fs_{19-22}$). Клинопироксен характеризуется повышенным содержанием MgO (> 15 мас. %) и высокой магнезиальностью (Mg# 68—74), низкими содержаниями Al_2O_3 и TiO_2 (табл. 1).

Состав *плагиоклаза* варьирует от олигоклаза An_{14} до лабрадора An_{57} (табл. 2). В плагиоклазе установлена примесь BaO (< 0.2 мас. %; табл. 2).

Амфиболы по международной классификации (Leake et al., 1997) относятся к кальциевой группе ($Ca_B > 1.50$). Первичные амфиболы представлены пре-

Таблица 1

Химический состав (мас. %) пироксенов Джигдинского интрузива
Chemical composition (wt %) of clinopyroxene from the Dzhigda intrusive

Компонент	C-1255	C-1255-3(4)*	A-3(3)	A-4(4)
SiO ₂	53.56	54.36	54.05	54.63
TiO ₂	0.23	0.17	0.26	0.48
Al ₂ O ₃	3.72	3.79	4.19	2.51
FeO*	12.05	11.73	12.27	11.33
MnO	0.22	0.29	0.34	0.18
MgO	16.93	16.27	15.20	17.61
CaO	13.18	13.26	12.75	13.64
Na ₂ O	0.30	0.46	0.49	0.29
K ₂ O	0.06	0.08	0.13	0.00
Сумма	100.25	100.41	99.68	100.67
Коэффициенты в формуле (O = 6)				
Si	1.960	1.980	1.986	1.984
Ti	0.006	0.005	0.007	0.013
Al	0.160	0.163	0.181	0.107
Fe	0.369	0.357	0.377	0.344
Mn	0.007	0.009	0.011	0.006
Mg	0.923	0.884	0.832	0.954
Ca	0.517	0.518	0.502	0.531
Na	0.021	0.032	0.035	0.020
K	0.003	0.004	0.006	0.000
En	50.9	50.0	48.3	52.0
Fs	20.7	20.7	22.5	19.1
Wo	28.5	29.3	29.2	28.9
Mg#	71.5	71.2	68.8	73.5

Примечание. * Цифры в скобках — количество анализов.
Mg# = $100 \cdot MgO / (MgO + FeO^*)$.

Химический состав (мас. %) плагиоклазов Джигдинского интрузива
 Chemical composition (wt %) of plagioclase from the Dzhigda intrusive

Но- мер п/п	Компонент													
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO*	MnO	MgO	CaO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	Сумма	Ab	An	Kfs
1	61.87	0.04	24.11	0.12	0.03	0.03	6.47	0.08	7.15	0.08	99.98	66.3	33.2	0.5
2	64.41	0.04	22.51	0.08	0.04	0.03	4.63	0.07	8.1	0.05	99.96	75.8	23.9	0.3
3	56.2	0.04	27.53	0.19	0.02	0.02	10.78	0.2	4.85	0.05	99.88	44.7	55	0.3
4	60.88	0.05	24.22	0.62	0.03	0.33	7.13	0.06	6.72	0.09	100.13	62.7	36.8	0.5
5	57.17	0.07	27.01	0.15	0.01	0.01	10.49	0.07	4.77	0.04	99.79	45	54.7	0.3
6	61.99	0.05	24.37	0.13	0.04	0.04	7	0.08	6.67	0.07	100.44	63	36.5	0.5
7	64.5	0.06	22.18	0.43	0.02	0.07	4.72	0.1	6.67	0.07	98.82	71.5	28	0.5
8	59.13	—	28.02	0.18	—	—	9.22	—	6.38	—	102.93	55.6	44.4	0.0
9	67.04	—	22.64	—	—	—	3.1	—	9.96	—	102.74	85.3	14.7	0.0
10	55.29	0.04	28.08	0.42	0.01	0.01	11.12	0.07	4.64	0.05	99.73	42.9	56.8	0.3
11	67.22	0.05	20.33	0.24	0.03	0.01	2.71	0.05	9.13	0.06	99.83	85.6	14	0.4

Примечание. Образцы: 1 — С-1255(32) андезин; 2 — С-1255(11) олигоклаз; 3 — С-1255-3(6) лабрадор; 4 — С-1255-3(20) андезин; 5 — А-3(11) лабрадор; 6 — А-3(68) андезин; 7 — А-3(26) олигоклаз; 8 — А-4(12) андезин; 9 — А-4(2) олигоклаз; 10 — А-4—4(8) лабрадор; 11 — А-4-4(16) олигоклаз; цифры в скобках — количество анализов. Прочерк — содержание ниже порога чувствительности анализа.

имущественно паргаситом и ферропаргаситом, вторичные — магнезиальной роговой обманкой и актинолитом (табл. 3).

Слюды по составу отвечают флогопиту, анниту и сидерофиллиту, при этом во всех слюдах установлена примесь ВаО.

Геохимические особенности пород интрузива рассмотрены нами ранее (Родионов и др., 2018). Габбро, габбро-диориты по соотношению SiO₂ (48.8—53.4 мас. %) и суммы K₂O + Na₂O (3.3—4.9 мас. %) соответствуют нормально-щелочным породам. Им свойственны умеренные содержания Al₂O₃ (14.1—16.9 мас. %), TiO₂ (0.6—1.0 мас. %), CaO (7.4—8.9 мас. %), высокое отношение FeO*/MgO (2.2—2.8), характерное для пород толеитовой серии. Распределение редкоземельных элементов в породах умеренно дифференцировано, о чем свидетельствует величина отношения (La/Yb)_n (6—12). В большинстве образцов отмечается положительная европиевая аномалия Eu/Eu* (до 1.7—2.5). Габбро, габбро-диориты избирательно обогащены Ва (330—1030 мкг/г) и Sr (1560—2200 мкг/г) при дефиците Nb (0.5—2.0 мкг/г), Та (0.02—0.50 мкг/г), Th (0.09—0.43 мкг/г), U (0.02—0.09 мкг/г).

В группе габбро и габбро-диоритов, обогащенных натрием, при той же концентрации кремнезема содержание суммы K₂O + Na₂O составляет 5.5—6.8 мас. %, что свойственно породам повышенной щелочности. В них отмечается повышение концентрации TiO₂ (1.1—1.4 мас. %) и отношения FeO*/MgO, некоторое уменьшение содержания CaO (6.5—8.6 мас. %), резкое преобладание легких лантаноидов над тяжелыми [(La/Yb)_n 12—16] при отсутствии европиевой аномалии (Eu/Eu* = 0.9—1.2). Они отчетливо обогащены Ва (до 2200 мкг/г), Rb (до 25 мкг/г), Sr (до 2060 мкг/г), La (до 33 мкг/г), Pb (до

Химический состав (мас. %) амфиболов Джигдинского интрузива
 Chemical composition (wt %) of amphibole from the Dzhigda intrusive

Но- мер п/п	Компонент											Сумма
	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	BaO	Na ₂ O	K ₂ O	Cl	
1	42.30	0.15	14.81	18.40	0.37	7.32	11.26	0.06	1.63	0.66	0.42	97.38
2	46.84	0.24	10.75	16.00	0.33	10.52	11.12	0.07	1.23	0.55	0.19	97.84
3	47.70	1.60	7.89	14.68	0.39	12.48	11.77	0.07	1.04	0.65	0.19	98.46
4	55.32	0.20	2.94	10.71	0.47	16.21	11.95	0.03	0.43	0.08	0.04	98.38
5	54.30	0.25	5.38	12.48	0.32	13.20	11.08	0.07	0.61	0.34	0.08	98.11
6	43.39	0.32	13.16	17.90	0.31	10.15	10.63	—	1.25	0.71	0.25	98.07
7	42.47	0.16	14.11	18.55	0.32	7.97	11.86	0.04	1.31	0.66	0.39	97.84
8	47.39	1.23	8.27	15.22	0.32	11.65	11.87	0.10	1.00	0.60	0.17	97.82
9	53.58	0.12	4.20	11.56	0.26	15.15	12.53	0.09	0.42	0.12	0.05	98.08
10	41.62	0.33	12.88	18.58	—	8.43	11.10	—	1.51	0.50	—	94.95
11	49.81	0.18	10.07	16.93	0.23	12.72	12.30	—	1.14	0.16	—	103.54
12	44.04	1.65	12.67	12.74	0.18	11.52	12.52	—	1.39	0.81	0.11	97.63
13	46.55	1.73	10.22	11.82	0.15	13.34	11.68	0.07	1.20	0.74	0.07	97.57
14	55.73	0.09	2.79	9.70	0.31	16.94	11.70	0.06	0.37	0.05	0.03	97.77

Формула (O = 23)

- 1 (Na_{0,421} K_{0,128})_{0,549} (Ca_{1,829} Fe_{0,065} Na_{0,058} Mn_{0,048})₂ (Fe_{2,268} Mg_{1,655} Al_{1,060} Ti_{0,017})₅ (Si_{6,414} Al_{1,586})₈ O₂₂(OH)₂
 2 (Na_{0,249} K_{0,104})_{0,354} (Ca_{1,758} Na_{0,103} Fe_{0,098} Mn_{0,041})₂ (Mg_{2,314} Fe_{1,876} Al_{0,782} Ti_{0,027})₅ (Si_{6,913} Al_{1,087})₈ O₂₂(OH)₂
 3 (Na_{0,242} K_{0,121})_{0,363} (Ca_{1,847} Na_{0,054} Fe_{0,050} Mn_{0,048})₂ (Mg_{2,726} Fe_{1,748} Al_{0,350} Ti_{0,176})₅ (Si_{6,988} Al_{1,012})₈ O₂₂(OH)₂
 4 K_{0,014} (Ca_{1,807} Na_{0,118} Mn_{0,051})_{1,976} (Mg_{3,411} Fe_{1,264} Al_{0,298} Ti_{0,021} Mn_{0,005})₅ (Si_{7,809} Al_{0,191})₈ O₂₂(OH)₂
 5 K_{0,062} (Ca_{1,690} Na_{0,168})_{1,858} (Mg_{2,802} Fe_{1,486} Al_{0,633} Mn_{0,039} Ti_{0,027})_{4,987} (Si_{7,731} Al_{0,269})₈ O₂₂(OH)₂
 6 (Na_{0,362} K_{0,135} Ca_{0,074})_{0,571} (Ca_{1,628} Fe_{0,333} Mn_{0,039})₂ (Mg_{2,261} Fe_{1,903} Al_{0,800} Ti_{0,036})₅ (Si_{6,483} Al_{1,517})₈ O₂₂(OH)₂
 7 (Na_{0,384} K_{0,127} Ca_{0,051})_{0,562} (Ca_{1,869} Fe_{0,090} Mn_{0,041})₂ (Fe_{2,255} Mg_{1,796} Al_{0,932} Ti_{0,018})₅ (Si_{6,418} Al_{1,582})₈ O₂₂(OH)₂
 8 (Na_{0,229} K_{0,113})_{0,342} (Ca_{1,879} Na_{0,057} Mn_{0,040} Fe_{0,024})₂ (Mg_{2,566} Fe_{1,857} Al_{0,441} Ti_{0,137})₅ (Si_{7,001} Al_{0,999})₈ O₂₂(OH)₂
 9 (Na_{0,034} K_{0,022})_{0,056} (Ca_{1,916} Na_{0,082} Mn_{0,001})₂ (Mg_{3,223} Fe_{1,380} Al_{0,354} Mn_{0,030} Ti_{0,013})₅ (Si_{7,647} Al_{0,353})₈ O₂₂(OH)₂
 10 (Na_{0,454} K_{0,099} Ca_{0,052})_{0,605} (Ca_{1,792} Fe_{0,208})₂ (Fe_{2,202} Mg_{1,949} Al_{0,810} Ti_{0,039})₅ (Si_{6,455} Al_{1,545})₈ O₂₂(OH)₂
 11 (Na_{0,307} Ca_{0,061} K_{0,028})_{0,396} (Ca_{1,771} Fe_{0,202} Mn_{0,027})₂ (Mg_{2,637} Fe_{1,767} Al_{0,577} Ti_{0,019})₅ (Si_{6,927} Al_{1,073})₈ O₂₂(OH)₂
 12 (Na_{0,372} K_{0,152})_{0,524} (Ca_{1,975} Na_{0,025})₂ (Mg_{2,528} Fe_{1,569} Al_{0,682} Ti_{0,183} Mn_{0,022})_{4,984} (Si_{6,484} Al_{1,516})₈ O₂₂(OH)₂
 13 (Na_{0,249} K_{0,138})_{0,387} (Ca_{1,824} Na_{0,090} Fe_{0,068} Mn_{0,019})₂ (Mg_{2,898} Fe_{1,373} Al_{0,539} Ti_{0,019})₅ (Si_{6,784} Al_{1,216})₈ O₂₂(OH)₂
 14 K_{0,009} (Ca_{1,768} Na_{0,101} Fe_{0,039} Mn_{0,037})_{1,945} (Mg_{3,562} Fe_{1,105} Al_{0,324} Ti_{0,010})₅ (Si_{7,860} Al_{0,140})₈ O₂₂(OH)₂

Примечание. Образцы: 1 — С-1255(3) ферропаргасит; 2 — С-1255-3(10) магнезиальная роговая обманка; 3 — С-1255(29) магнезиальная роговая обманка; 4 — С-1255(6) актинолит; 5 — С-1255-3(21) актинолит; 6 — С-1255-3(2) паргасит; 7 — А-3(22) ферропаргасит; 8 — А-3(62) магнезиальная роговая обманка; 9 — А-3(9) актинолит; 10 — А-4(1) ферропаргасит; 11 — А-4(3) магнезиальная роговая обманка; 12 — А-4-4(2) паргасит; 13 — А-4-4(47) магнезиальная роговая обманка; 14 — А-4-4(55) актинолит; цифры в скобках — количество анализов. *Прочерк* — содержание ниже порога чувствительности анализа.

10 мкг/г), при дефиците Nb (3.2—5.4 мкг/г), Ta (0.16—0.35 мкг/г), Th (0.4—1.8 мкг/г), U (0.09—0.38 мкг/г).

МОДЕЛЬНЫЕ РАСЧЕТЫ

Оценка составов исходных расплавов для интрузий рассматриваемого типа определяется, как правило, либо по их закалочной фази, либо путем расчета средневзвешенного состава (Шарков, 1983; Ariskin et al., 1993; Арискин,

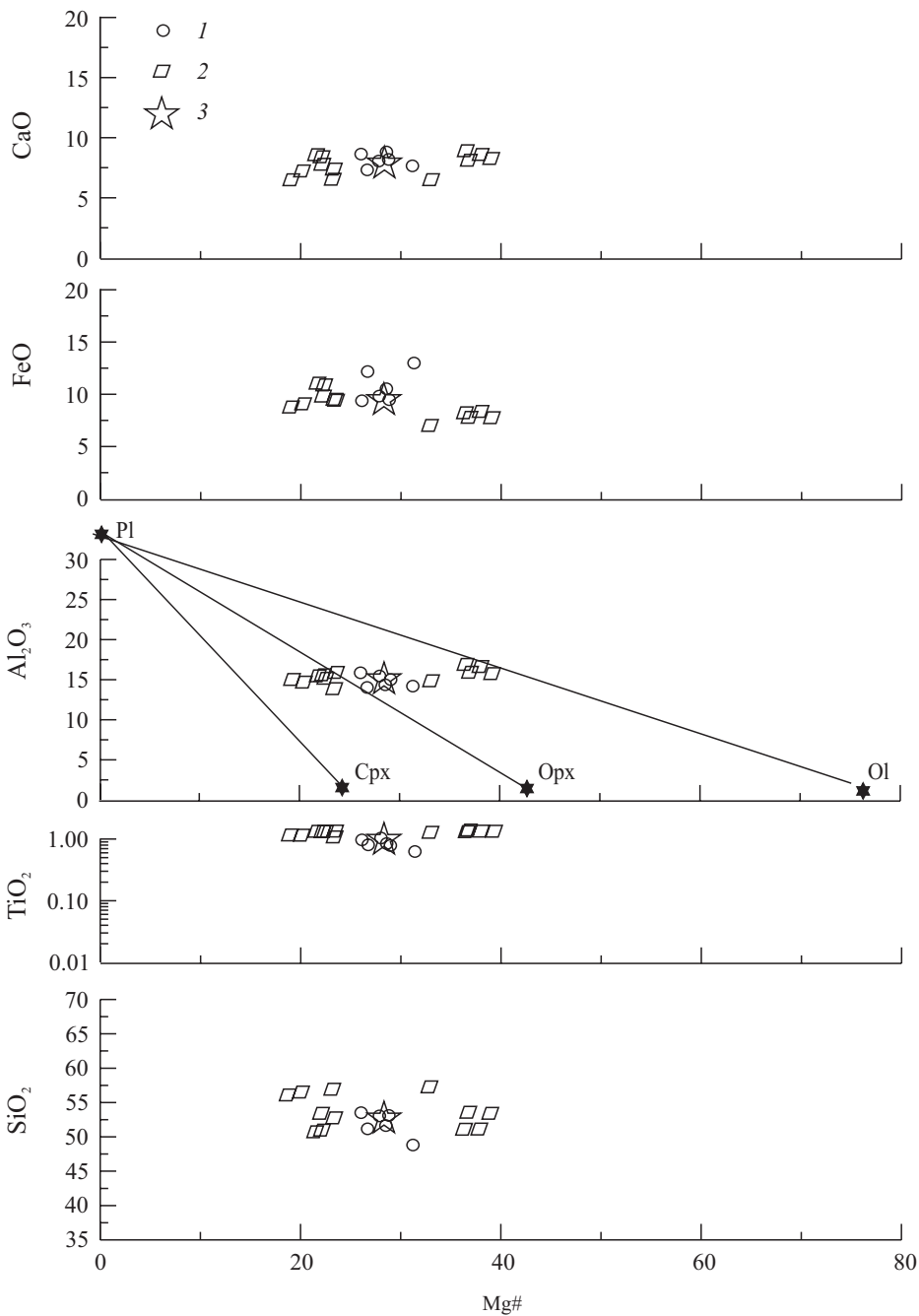


Рис. 2. Вариационные диаграммы для пород Джигдинского интрузива.

1 — габбро, габбро-диориты; 2 — габбро, габбро-диориты, обогащенные натрием; 3 — средневзвешенный состав пород. Пояснения в тексте.

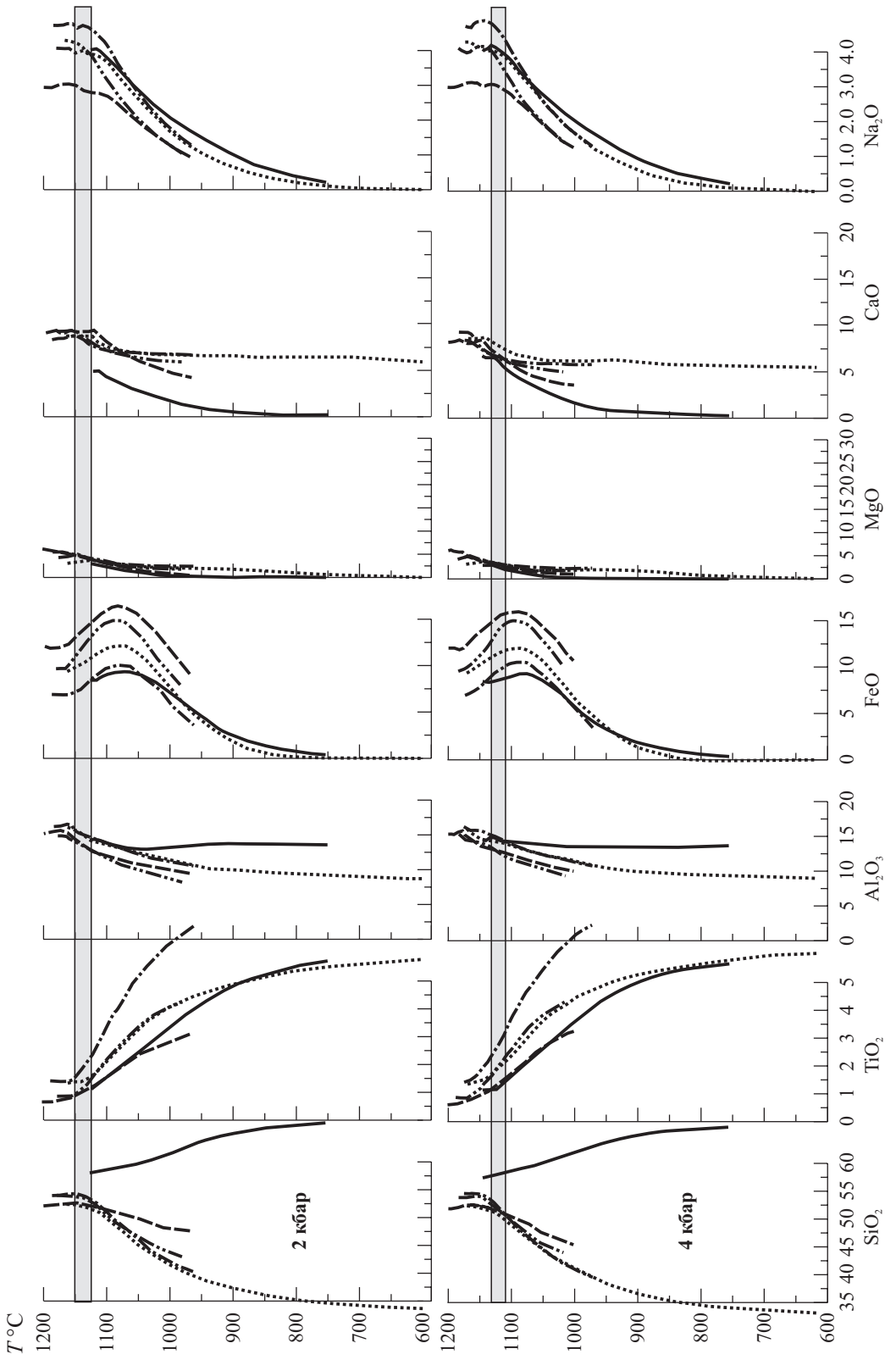
Fig. 2. Variation diagrams for rocks of the Dzhigda intrusive (1 — gabbro, gabbro-diorites; 2 — gabbro, gabbro-diorites enriched with sodium; 3 — average compositions).

Химический состав (мас. %) образцов, использованных для моделирования
Chemical composition (wt %) of samples used for modeling

Образец	A-4-4	A-4-9	A-3	C-1255-6	A-4	Среднее
SiO ₂	48.83	56.88	51.01	53.55	51.61	52.37
TiO ₂	0.61	1.10	1.30	1.39	0.82	1.04
Al ₂ O ₃	14.39	13.91	15.67	15.97	14.52	14.89
Fe ₂ O ₃ *	14.38	10.69	12.14	8.77	11.72	11.54
MnO	0.35	0.14	0.13	0.14	0.14	0.18
CaO	7.68	6.59	8.48	8.21	8.88	7.96
MgO	5.88	2.91	3.10	4.59	4.21	4.13
Na ₂ O	2.79	3.91	4.17	4.67	3.91	3.89
K ₂ O	0.53	1.74	1.62	1.13	0.56	1.11
P ₂ O ₅	0.07	0.48	0.73	0.63	0.24	0.43
П. п. п.	3.60	0.69	0.59	0.38	2.22	1.49
Сумма	99.11	99.04	98.94	99.45	98.83	99.07

Бармина, 2000). Так как закалочная фация пород Джигдинского интрузива не найдена, а определение состава исходного расплава ритмично расслоенного интрузива методом средневзвешенного затруднено значительным количеством маломощных (первые метры) ритмов и не полной эродированностью интрузива, нами использовался вариант расчета состава исходного расплава по методике А. А. Арискина и Г. С. Барминой (Арискин, Бармина, 2000). Этот метод основан на двух постулатах: 1 — в начальный момент расплав и кристаллизующиеся из него минералы находятся в равновесии, 2 — среди множества пород, слагающих изучаемую интрузию, существуют породы, вариации химического состава которых обусловлены только изменением соотношения минералы—расплав. Такие породы формируются при одной и той же температуре из расплава заданного состава и имеют сходный минеральный состав. На основе этих предположений могут быть рассчитаны линии эволюции составов, которые должны давать пересечения в пространстве состав—температура. Температура в точке пересечения считается общей для всех пород, а найденный состав расплава рассматривается в качестве исходного. Апробация описанной методики проведена на Скергаардском (Арискин, Бармина, 2000), Веселкинском (Бучко, 2005; Бучко и др., 2008), Лукиндинском (Бучко и др., 2017) и других массивах.

Расчеты траекторий эволюции состава исходного расплава Джигдинского интрузива (рис. 2) выполнены с помощью компьютерных программ (Ariskin et al., 1993; Danyushevsky, 2001). Для расчетов использованы составы 18 образцов, охарактеризованных ранее (Родионов и др., 2018). Наиболее хорошие результаты получены по 5 из них (табл. 4). Наилучшая сходимость наблюдаемых и экспериментальных составов наблюдается при температурах 1125—1160 °С и давлении 2 кбар, 1110—1130 °С и давлении 4 кбар, 1140—1160 °С и давлении 6 кбар (рис. 3; во всех случаях активность кислорода соответствует буферу QFM). Средний состав жидкой фазы, рассчитанный по модельным траекториям при средней температуре около 1136 °С, соответствует модельному составу исходного магматического расплава (табл. 5).



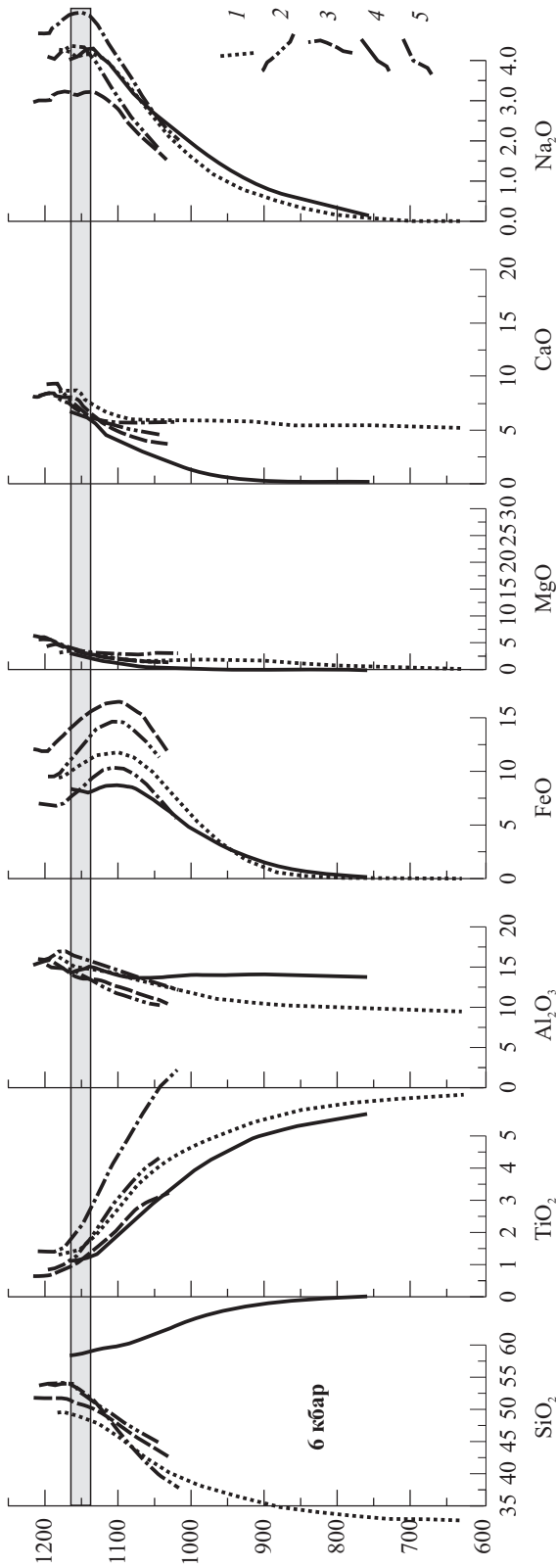


Рис. 3. Линии эволюции состава расплава, исходного для пород Джигдинского интрузива, при давлении 2, 4 и 6 кбар, рассчитанные с помощью программы Petrolog (Danyushkevsky, 2001).

1 — обр. А-3; 2 — обр. А-4; 3 — обр. А-4-4; 4 — обр. А-4-9; 5 — обр. С-1255-6.

Fig. 3. Differentiation trends for the melt proposed to be parental to the Dzhhigda intrusive calculated with Petrolog (Danyushkevsky, 2001) at pressure of 2, 4, and 6 kbar.

Рассчитанные составы (мас.%) исходного расплава Джигдинского интрузива при давлениях 2, 4 и 6 кбар

Calculated compositions of the parental melt (wt %) for the Dzhigda intrusive at 2, 4, and 6 kbar

Компонент	2 кбар	4 кбар	6 кбар	Среднее
SiO ₂	53.99	53.20	53.48	53.56
TiO ₂	1.33	1.79	1.54	1.55
Al ₂ O ₃	14.26	13.91	14.69	14.29
Fe ₂ O ₃	2.11	2.95	2.50	2.52
FeO	10.36	11.38	10.82	10.85
MnO	0.25	0.30	0.29	0.28
MgO	3.82	3.17	3.23	3.41
CaO	8.05	6.94	7.09	7.36
Na ₂ O	3.93	3.85	4.20	3.99
K ₂ O	1.37	1.79	1.55	1.57
P ₂ O ₅	0.53	0.72	0.60	0.62
T °C	1134	1124	1150	1136

Дополнительным критерием адекватности математических моделей кристаллизации, кроме последовательности смены ликвидусных парагенезисов и состава кристаллизующихся минералов, служит сопоставление трендов эволюции состава модельных кумулатов. Моделирование с помощью программы Petrolog (Danyushevsky, 2001) производилось для давлений 2, 4 и 6 кбар, активности кислорода, отвечающей буферу QFM, без учета водной составляющей. На вариационных диаграммах (рис. 4) тренды эволюции рассчитанного состава расплава проходят через области, где расположены фигуративные точки изученных пород (при 2 кбар — габбро, габбро-диоритов, при 4, 6 кбар — габбро и габбро-диоритов, обогащенных натрием), а также точка среднего состава пород, отвечающего габбро. Подобные давления отвечают глубине кристаллизации магм от 12 до 19 км.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Согласно выполненным расчетам состав исходного расплава Джигдинского интрузива соответствует габбро, кристаллизация которого происходила при давлении 4—6 кбар (на глубине 12—19 км) и начальной температуре кристаллизации 1125—1160 °C. Внутрикамерная дифференциация этого расплава привела к формированию, с одной стороны, габбро и габбро-диоритов, с другой стороны — габбро и габбро-диоритов, обогащенных натрием.

Представляет интерес сопоставление модельных параметров формирования пород Джигдинского массива и других пермо-триасовых ультрабазит-базитовых интрузий юго-восточного обрамления Сибирского кратона. Согласно модельным расчетам, выполненным А. В. Лавренчуком с соавторами (2002), состав исходного расплава для пород Лукиндинского массива отвечает меланотроктолиту, кристаллизация которого протекала в интервале температур

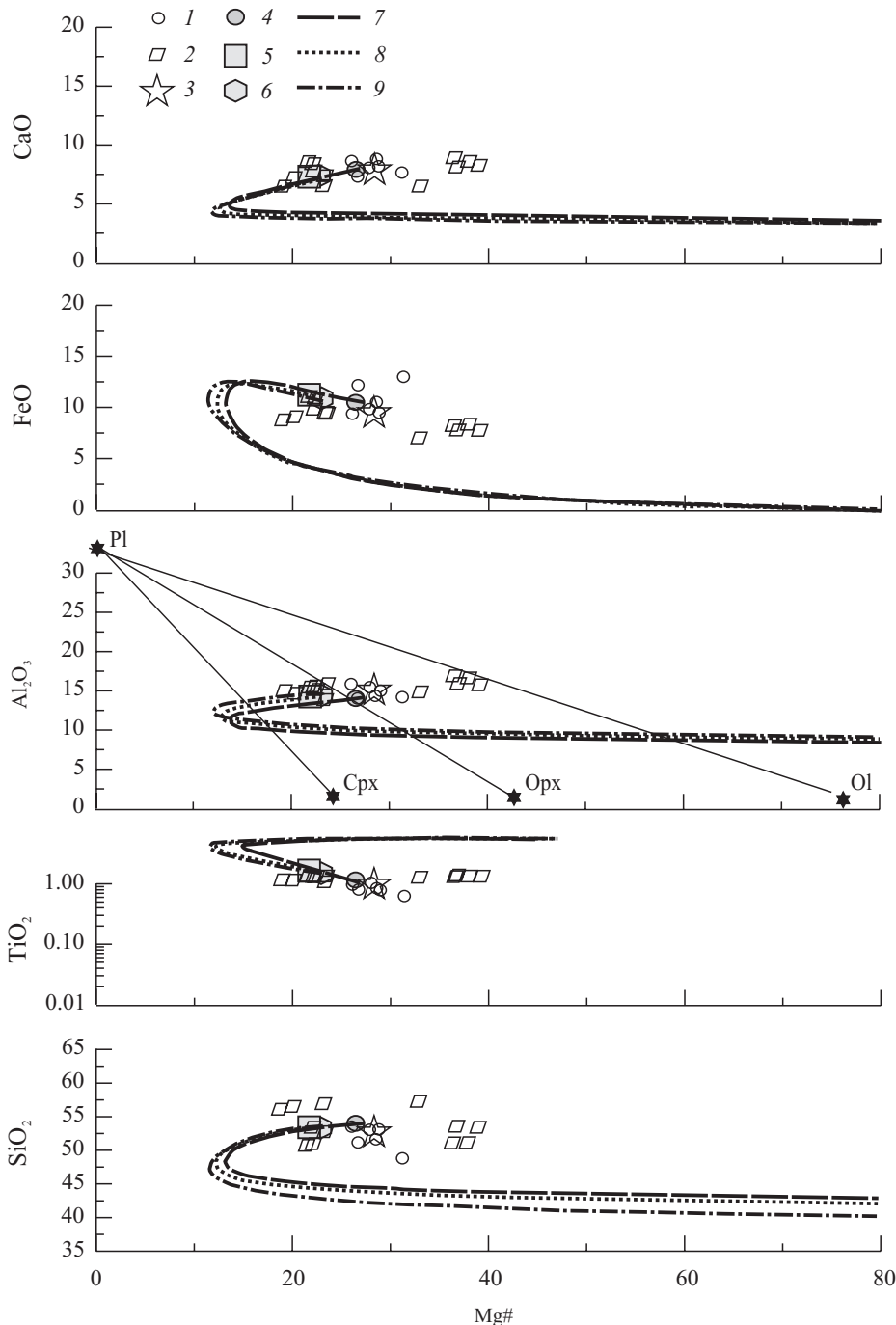


Рис. 4. Вариационные диаграммы с линиями эволюции состава исходного расплава при различных давлениях.

1 — габбро, габбро-диориты; 2 — габбро, габбро-диориты, обогащенные натрием; 3 — средневзвешенный состав пород; 4–6 — состав исходного расплава при давлении 2 (4), 4 (5), 6 кбар (6); 7–9 — линии эволюции состава исходного расплава при давлении 2 (7), 4 (8), 6 кбар (9).

Fig. 4. Variation diagrams with differentiation trends for the melt proposed to be parental to the Dzbigda intrusive at pressure of 2, 4, and 6 kbar.

1520—1180 °С при давлении около 6 кбар и активности кислорода, отвечающей буферу QFM. Предполагается, что исходный расплав образовался путем частичного плавления деплетированного шпинельсодержащего мантийного субстрата с содержанием воды 0.1 % при температуре 1750—1800 °С, давлении 25 кбар и степени плавления 40—50 %. По данным наших расчетов (Бучко и др. 2017), выполненных с помощью программы COMAGMAT, состав исходного расплава для пород Лукиндинского массива был близок к оливиновому габбро. Он кристаллизовался при температуре 1320—1330 °С, давлении 6 кбар и активности кислорода, соответствующей буферу QFM.

Состав родоначальной магмы для пород Лучинского массива был близок к пикробазальту (Бучко и др., 2008). По данным расчетов при активности кислорода, соответствующей буферу QFM, температура кристаллизации дунитов и плагиодунитов составляла 1365—1398 °С при давлении 7.6—7.9 кбар, габброидов и троктолитов — 1369—1380 °С при давлении 3.8—4.0 кбар.

Приведенные данные свидетельствуют о том, что составы исходных расплавов и параметры кристаллизации пермо-триасовых ультрабазит-базитовых интрузий юго-восточного обрамления Сибирского кратона существенно различаются, что, вероятно, является особенностью обсуждаемого этапа магматизма. Не исключена связь пермо-триасовых и более молодых базитовых интрузий с заключительными этапами формирования Монголо-Охотского складчатого пояса. Отметим, что породы, слагающие эти интрузии, обладают геохимической двойственностью, заключающейся в сочетании признаков как внутриплитного, так и надсубдукционного происхождения (Бучко и др., 2007б, 2008, 2010б, 2017). Такие особенности магматизма позволяют предположить, что становление Джигдинской интрузии связано с обстановкой трансформной окраины. Эта обстановка подразумевает отрыв и погружение в мантию субдуцируемой океанической литосферы, за счет чего формируется «астеносферное окно», над которым образуются магматические комплексы с «пестрыми геохимическими особенностями» (Kay, 1978; Davies, Blanckenburg, 1995; Zeck et al., 1998; Verma, 1999).

Авторы благодарят сотрудников Института геологии и природопользования ДВО РАН В. И. Рождествовину, Т. В. Макееву и Н. В. Мудровскую за помощь в аналитических исследованиях.

Список литературы

Агафоненко С. Г., Яшинов А. Л., Козак З. П. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 200 000. 2-е изд. Становая серия. N-52-XIV (Береговой). Под ред. Ю. В. Кошкова. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, 2007.

Арискин А. А., Бармина Г. С. Моделирование фазовых равновесий при кристаллизации базальтовых магм. М.: Наука, 2000. 363 с.

Бучко И. В. Состав исходного расплава и магматического субстрата Веселкинского перидотит-вебстерит-габбрового массива (Приамурье) // Тихоокеанская геология. 2005. Т. 1. 85—92.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Ларин А. М., Изох А. И., Велюклавинский С. Д., Яковлева С. З. Возраст и геохимические особенности позднеюрских ультрамафит-мафитовых массивов Селенгино-Станового супертеррейна южного обрамления Северо-Азиатского кратона // Геология и геофизика. 2007а. Т. 48. № 12. С. 1026—1036.

Бучко И. В., Сальникова Е. Б., Ларин А. М., Сорокин А. А., Сорокин А. П., Котов А. Б., Велюклавинский С. Д., Яковлева С. З., Плоткина Ю. В. Возраст и геохимические особенности

ультрамафит-мафитового Лучинского массива (юго-восточное обрамление Сибирского кратона) // Доклады РАН. **2007**. Т. 413. № 5. С. 651—654.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Изох А. Э., Ларин А. М., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Великославинский С. Д., Сорокин А. П., Яковлева С. З., Плоткина Ю. В. Петрология раннемезозойского ультрамафит-мафитового Лучинского массива (юго-восточное обрамление Сибирского кратона) // Геология и геофизика. **2008**. Т. 49. № 8. С. 745—768.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Ларин А. М., Великославинский С. Д., Сорокин А. П., Кудряшов Н. М. Позднемезозойские постколлизийные высококальциевые габброиды Джугджуро-Станового супертеррейна. // Доклады РАН. **2010а**. Т. 431. № 3. С. 361—364.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Великославинский С. Д., Ларин А. М., Изох А. И., Яковлева С. З. Триасовый этап мафитового магматизма Джугджуро-Станового супертеррейна (южное обрамление Северо-Азиатского кратона) // Геология геофизика. **2010б**. Т. 51. № 11. С. 1489—1500.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Пономарчук В. А., Травин А. В. Геохимические особенности, возраст и геодинамическая обстановка формирования познеюрского верлит-габбрового Ильдеусского массива Брянтинского блока (юго-восточное обрамление Северо-Азиатского кратона) // Вестник Томского университета. **2011**. Т. 348. С. 165—172.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Родионов А. А., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Кудряшов Н. М., Ларин А. М., Великославинский С. Д., Ковач В. П. Пермотриасовый этап ультрамафит-мафитового и мафитового магматизма юго-восточного обрамления Северо-Азиатского кратона // Отечественная геология. **2017**. № 6. С. 94—97.

Бучко И. В., Сорокин А. А., Котов А. Б., Самсонов А. В., Ларионова Ю. О., Пономарчук В. А., Ларин А. М. Возраст и тектоническое положение Лукиндинского дунит-троктолит-габбро-анортозитового массива (восточная часть Селенгино-Станового супертеррейна Центрально-Азиатского складчатого пояса) // Геология и геофизика. **2018**. Т. 59. № 7. С. 889—899.

Великославинский С. Д., Котов А. Б., Сальникова Е. Б., Ларин А. М., Сорокин А. А., Сорокин А. П., Ковач В. П., Толмачева Е. В., Гороховский Б. М. Возраст иликанской толщи Станового комплекса Джугджуро-Станового супертеррейна Центрально-Азиатского складчатого пояса // Доклады РАН. **2011**. Т. 438. № 3. С. 355—359.

Лавренчук А. В., Балыкин П. А., Бородина Е. В. Состав исходного расплава и мантийного субстрата Лукиндинского дунит-троктолит-габбрового массива Становой складчатой системы / Петрология магматических и метаморфических комплексов. Мат. Всероссийск. научн. конф. Т. 1. Томск: Изд-во Томского ун-та, **2002**. Т. 1. С. 114—119.

Ларин А. М., Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Глебовицкий В. А., Ковач В. П., Бережная Н. Г., Яковлева С. З., Толкачев М. Д. Позднеархейские гранитоиды Дамбукинского блока Джугджуро-Становой складчатой области: формирование и преобразование континентальной коры в раннем докембрии // Петрология. **2004**. Т. 12. № 3. С. 245—263.

Ларин А. М., Сальникова Е. Б., Котов А. Б., Глебовицкий В. А., Великославинский С. Д., Сорокин А. А., Яковлева С. З., Федосеенко А. М., Анисимова И. В. Раннемеловой возраст регионального метаморфизма становой серии Джугджуро-Становой складчатой области: геодинамические следствия // Доклады РАН. **2006**. Т. 409. № 2. С. 222—226.

Парфенов Л. М., Берзин Н. А., Ханчук А. И., Бадарч Г., Беличенко В. Г., Булгатов А. Н., Дриль С. И., Кириллова Г. Л., Кузьмин М. И., Ноклеберг У., Прокопьев А. В., Тимофеев В. Ф., Томуртоого О., Янь Х. Модель формирования орогенных поясов Центральной и Северо-Восточной Азии // Тихоокеанская геология. **2003**. Т. 22. № 6. С. 7—41.

Петрук Н. Н., Козлов С. А. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-51 (Сковородино). Под ред. А. С. Вольского. Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, **2009**.

Родионов А. А., Бучко И. В., Кудряшов Н. М. Возраст, минералого-геохимические особенности, тектоническая позиция габбро-монцодиоритового Джигдинского массива (юго-восточное обрамление Северо-Азиатского кратона) // Тихоокеанская геология. **2018**. Т. 37. № 3. С. 53—66.

Сальникова Е. Б., Ларин А. М., Котов А. Б., Сорокин А. П., Сорокин А. А., Великославинский С. Д., Яковлева С. З., Федосеенко А. М., Плоткина Ю. В. Токско-Алгоминский магматический комплекс Джугджуро-Становой складчатой области: возраст и геодинамическая обстановка формирования // Доклады РАН. **2006**. Т. 409. № 5. С. 652—657.

Серёжников А. Н., Волкова Ю. Р. Государственная геологическая карта Российской Федерации масштаба 1 : 1 000 000 (третье поколение). Серия Дальневосточная. Лист N-52 (Зея). Санкт-Петербург: ВСЕГЕИ, **2007**.

Шарков Е. В. Петрология магматических процессов. М.: Недра, **1983**. 200 с.

References

- Agafonenko S. G., Yashnov A. L., Kozak Z. P. State Geological Map of the Russian Federation on a scale 1 : 200,000. Stanovoy Series. Sheet N-52-XIV. Saint Petersburg: VSEGEI, **2007** (in Russian).
- Ariskin A. A., Barmina G. S. Modeling of phase equilibria on basaltic-magma crystallization. Moscow: Nauka, **2000**. 363 p. (in Russian).
- Ariskin A. A., Frenkel M. Ya., Barmina G. S., Neilsen R. L. Comagmat: a Fortran program to model magma differentiation processes. *Comput. Geosci.* **1993**. Vol. 19. P. 1155—1170.
- Buchko I. V. Composition of primary melt and mantle substratum of the Veselyi peridotite-websterite-gabbro massif (Amur region). *Russian J. Pacific Geol.* **2005**. Vol. 23. N 1. P. 85—92 (in Russian).
- Buchko I. V., Sorokin A. A., Sal'nikova E. B., Kotov A. B., Larin A. M., Izokh A. E., Velikoslavinsky S. D., Yakovleva S. Z. The Late Jurassic age and geochemistry of ultramafic-mafic massifs of the Selenga-Stanovoy superterrane (southern framing of the North Asian craton). *Russian Geol. Geophys.* **2007a**. Vol. 48. N 12. P. 1026—1036.
- Buchko I. V., Sal'nikova E. B., Larin A. M., Sorokin A. A., Sorokin A. P., Kotov A. B., Velikoslavinsky S. D., Yakovleva S. Z., Plotkina Yu. V. Age and geochemistry of the Luchinsky mafic-ultramafic pluton, the southeastern framework of the Siberian Craton. *Doklady Earth Sci.* **2007b**. Vol. 413. N 2. P. 367—369.
- Buchko I. V., Sorokin A. A., Izokh A. E., Larin A. M., Kotov A. B., Sal'nikova E. B., Velikoslavinskii S. D., Sorokin A. P., Yakovleva S. Z., Plotkina Yu. V. Petrology of the Early Mesozoic ultramafic-mafic Luchina massif (southeastern periphery of the Siberian craton). *Russian Geol. Geophys.* **2008**. Vol. 49. N 8. P. 570—581.
- Buchko I. V., Sorokin A. A., Larin A. M., Velikoslavinskii S. D., Sorokin A. P., Kudryashov N. M. Late Mesozoic postcollisional high-potassic gabbroids of the Dzhugdzhur-Stanovoi superterrane. *Doklady Earth Sci.* **2010a**. Vol. 431. N 1. P. 304—307.
- Buchko I. V., Sorokin A. A., Sal'nikova E. B., Kotov A. B., Velikoslavinskii S. D., Larin A. M., Izokh A. E., Yakovleva S. Z. The Triassic stage of mafic magmatism in the Dzhugdzhur—Stanovoi superterrane (southern framing of the North Asian craton). *Russian Geol. Geophys.* **2010b**. Vol. 51. N 11. P. 1157—1166.
- Buchko I. V., Sorokin A. A., Ponomarchuk V. A., Travin A. V. Geochemical composition, age and geodynamic position of the Late Jurassic Il'deuss verlite-gabbro massif in the Bryanta block (south-eastern rim of the North-Asian Craton). *Tomsk State Univers. J.* **2011**. Vol. 348. P. 165—172 (in Russian).
- Buchko I. V., Sorokin A. A., Rodionov A. A., Kotov A. B., Salnikova E. B., Kudryashov N. M., Larin A. M., Velikoslavinsky S. D., Kovach V. P. Permian-Triassic stage of ultramafic-mafic and mafic magmatism of the south-eastern framing of the North Asian craton. *Domestic Geology.* **2017**. N 6. P. 94—97 (in Russian).
- Buchko I. V., Sorokin A. A., Kotov A. B., Samsomov A. V., Larionova Yu. O., Ponomarchuk V. A., Larin A. M. The age and tectonic setting of the Lukinda dunite-troctolite-gabbro-anorthosite massif (in the east of the Selenga-Stanovoy superterrane, the Central Asian Fold Belt). *Russian Geol. Geophys.* **2018**. Vol. 59. N 7. P. 889—899.
- Davies J. H., Blanckenburg F. Slab breakoff: a model of lithosphere detachment and its test in the magmatism and deformation of collisional orogens. *Earth Planet. Sci. Lett.* **1995**. Vol. 129. P. 85—102.
- Danyushevsky L. V. The effect of small amount of H₂O on fractionation of mid-ocean ridge and backarc basin magmas. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **2001**. Vol. 110. P. 265—280.
- Kay R. W. Aleutian magnesian andesites: melts from subducted Pacific oceanic crust. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **1978**. Vol. 4. P. 297—322.
- Lavrenchuk A. V., Balykin P. A., Borodina E. V. Composition of the parental melt and mantle substratum of the Lukinda dunite—troctolite—gabbro massif of the Stanovoi folded system. In: *Petrology of igneous and metamorphic complexes*. Proc. Russian Sci. Conf. Vol. 1. Tomsk: Tomsk State Univ., 2002. P. 114—119 (in Russian).
- Larin A. M., Sal'nikova E. B., Kotov A. B., Glebovitsky V. A., Kovach V. P., Berezhnaya N. G., Yakovleva S. Z., Tolkachev M. D. Late archaic granitoids of the Dambukinskii block or the Dzhugdzhur-Stanovoy fold belt: Formation and transformation of the continental crust in the early Precambrian. *Petrology.* **2004**. Vol. 12. N 3. P. 211—226.
- Larin A. M., Sal'nikova E. B., Kotov A. B., Glebovitsky V. A., Velikoslavinsky S. D., Sorokin A. A., Yakovleva S. Z., Fedoseenko A. M., Anisimova I. V. Early Cretaceous age of regional metamorphism of the Stanovoi group in the Dzhugdzhur-Stanovoi foldbelt: Geodynamic implications. *Doklady Earth Sci.* **2006**. Vol. 409. N 5. P. 727—731.

Leake B. E., Woolley A. R., Arps C. E. S., Birch W. D., Gilbert M. C., Grice J. D., Hawthorne F. C., Kato A., Kisch H. J., Krivovichev V. G., Linthout K., Laird J., Mandarino J. A., Maresch W. V., Nickel E. H., Rock N. M. S., Schumacher J. C., Smith D. C., Stephenson N. C. N., Ungaretti L., Whittaker E. J. W., Guo Y. Nomenclature of amphiboles: report of the Subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *Canad. Miner.* **1997**. Vol. 35. P. 219—246.

Parfenov L. M., Berzin N. A., Khanchuk A. I., Badarch G., Belichenko V. G., Bulgatov A. N., Dril' S. I., Kirillova G. L., Kuz'min M. I., Nokleberg W., Prokop'ev A. V., Timofeev V. F., Tomurto-goo O., Yan H. A model for the formation of orogenic belts of Central and Northeast Asia. *Russian J. Pacific Geol.* **2003**. Vol. 22. N 6. P. 7—41 (in Russian).

Petruk N. N., Kozlov S. A. State Geological Map of the Russian Federation on a scale 1 : 1,000,000. Sheet N-51 (Skovorodino). 3rd Generation. Far East Series. St. Petersburg: VSEGEI, **2009**.

Rodionov A. A., Buchko I. V., Kudryashov N. M. Age, mineralogical and geochemical features, and tectonic position of gabbroids of the Dzhiginskii massif (Southeastern Environ of the North Asian Craton). *Russian J. Pacific Geol.* **2018**. Vol. 37. N 3. P. 53—66.

Sal'nikova E. B., Larin A. M., Kotov A. B., Sorokin A. P., Sorokin A. A., Velikoslavinsky S. D., Yakovleva S. Z., Fedoseenko A. M., Plotkina Yu. V. The Toksko-Algomin igneous complex of the Dzhugdzhur-Stanovoi folded region: Age and geodynamic setting. *Dokl. Earth Sci.* **2006**. Vol. 409. N 2. P. 888—892.

Seryozhnikov A. N., Volkova Y. R. State Geological Map of the Russian Federation on a scale 1 : 1,000,000. Sheet N-52 (Zeya). 3rd Generation. Far East Series. St. Petersburg, VSEGEI, **2007** (in Russian).

Sharkov E. V. Petrology of magmatic processes. Moscow: Nedra, **1983**. 200 p. (in Russian).

Velikoslavinskii S. D., Kotov A. B., Sal'nikova E. B., Larin A. M., Sorokin A. A., Sorokin A. P., Kovach V. P., Tolmacheva E. V., Gorokhovskii B. M. Age of the Ilikan sequence from the Stanovoi Complex of the Dzhugdzhur-Stanovoi Superterrane, Central-Asian Fold Belt. *Doklady Earth Sci.* **2011**. Vol. 438. N 1. P. 612—616.

Verma S. P. Geochemistry of evolved magmas and their relationship to subduction-unrelated mafic volcanism at the volcanic front of the central Mexican Volcanic Belt. *J. Volcan. Geotherm. Res.* **1999**. Vol. 93. P. 151—171.

Zeck H. P., Kristensen A. B., Williams I. S. Post-collisional volcanism in a sinking slab setting — crustal anatexis origin of pyroxene-andesite magma, Caldear Volcanic Group, Neogene Alboran volcanic province, southern Spain. *Lithos.* **1998**. Vol. 45. P. 499—522.

Поступила в редакцию
13 марта 2017 г.