

ГЕОЛОГИЯ

УДК 550.93+551.24+550.4+552.2

<https://doi.org/10.25587/2587-8751-2026-1-5-33>

Научная оригинальная статья

**ТИПОМОРФИЗМ ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ
АНДЕЗИТОВ КАРАБУРАНСКОГО КОМПЛЕКСА
ПОЛОВИНКИНСКОЙ ВПАДИНЫ (АЛДАНО-СТАНОВОЙ ШИТ)***А. И. Иванов*, М. С. Иванов, А. И. Журавлев, Е. Е. Лоскутов*

Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН,

г. Якутск, Российская Федерация

e-mail: leps_2002@mail.ru

Аннотация. Впервые рассмотрены химические составы породообразующих минералов из андезитов Половинкинской впадины, локализованной в центральной части Алдано-Станового щита, на границе Тындинского и Нимнырского террейнов. Полученные в ходе микрозондовых исследований данные по составам минералов рассчитывались по программам MagMin PT, WinPytox и COMAGMAT, с целью систематики и определения термодинамических параметров кристаллизации минералов вкрапленников, а также возможной металлогенической специализации андезитов. В результате чего, были установлены: плагиоклаз (олигоклаз, андезин первой и второй генераций), а также андезин микролитов основной массы, пироксен (авгит, диопсид), Са-амфибол (эденит, паргасит) и Mg-биотит. Показано, что кристаллизация олигоклаза и андезина двух генераций проходила в условиях, близких таковым для плагиоклазов андезитов островных дуг и активных континентальных окраин: при высокой активности кислорода ($\log fO_2 = -5,04 \dots -6,86$) и росте температур от 1090°C до 1124°C при снижении давления от 12 кбар до 4,5 кбар. Состав и условия кристаллизации плагиоклазов и пироксенов подтверждают мнение предшественников об участии субдуцированной океанической коры Монголо-Охотского бассейна в формировании материнских магматических очагов мезозойского алданского комплекса. На основе выделенных интервалов зависимости P-T условий кристаллизации минералов от глубины: (I) 36-24 км, (II) 24-12 км, (III) 12-6 км и (IV) 6-2 км, высказана точка зрения о существовании в мезозое промежуточных магматических камер. В соответствии с результатами анализа типоморфных характеристик амфиболов и биотитов (фугитивности кислорода и активность воды), а также геологических предпосылок эволюции андезитов, было высказано мнение о возможности обнаружения в пределах Половинкинской впадины золоторудных систем эпитермального типа.

Ключевые слова: андезиты, Половинкинская впадина, условия кристаллизации, геобарометр, геотермометр, фугитивность кислорода, потенциал воды, плагиоклаз, пироксен, амфибол, биотит.

Финансирование. Работа выполнена в рамках проекта НИР FUG-2024-0005 ИГАБМ СО РАН.

Для цитирования: Иванов А. И., Иванов, М. С. Журавлев А. И., Лоскутов Е. Е. Типоморфизм породообразующих минералов андезитов Карабуранского комплекса Половинкинской впадины (Алдано-Становой щит). *Вестник СВФУ.* 2026;(3): 5-33. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-5-33

TYPOMORPHISM OF ROCK-FORMING MINERALS OF ANDESITES FROM THE KARABURAN COMPLEX OF THE POLOVINKINSKAYA DEPRESSION (ALDANO-STANOVVOY SHIELD)

Aleksey I. Ivanov, Michil S. Ivanov, Anatoly I. Zhuravlev, Evgeny E. Loskutov*

Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS,

Yakutsk, Russian Federation

*leps_2002@mail.ru

Abstract. This study presents an inaugural analysis of rock-forming mineral chemistry within andesites from the Polovinkinskaya Depression, situated at the junction of the Tynda and Nimnyr terranes in the central Aldan-Stanovoy Shield. Utilizing microprobe data processed through MagMin PT, WinPyrox, and COMAGMAT, we evaluated the systematics, thermodynamic crystallization conditions, and potential metallogenic significance of these rocks. The mineral assemblage includes plagioclase (oligoclase and two generations of andesine), groundmass andesine microlites, pyroxenes (augite and diopside), Ca-amphiboles (edenite and pargasite), and Mg-biotite. Our findings indicate that plagioclase crystallization occurred under conditions analogous to those found in island arcs and active continental margins, characterized by high oxygen fugacity ($\log f_{O_2} = -5.04$ to -6.86), temperatures ranging from 1090°C to 1124°C, and pressures decreasing from 12 to 4.5 kbar. These data support the hypothesis that subducted oceanic crust from the Mongol-Okhotsk Basin contributed to the Mesozoic Aldan magmatic sources. Furthermore, the identified P-T depth intervals (36–24, 24–12, 12–6, and 6–2 km) suggest the presence of intermediate Mesozoic magma chambers. Finally, an assessment of amphibole and biotite typomorphism, combined with the geological evolution of the andesites, indicates a high potential for epithermal gold mineralization in the region.

Keywords: andesites, Polovinkinskaya depression, crystallization conditions, geobarometer, geothermometer, oxygen fugacity, water potential, plagioclase, pyroxene, amphibole, biotite

Funding. The article was prepared within the framework of the research project FUG-2024-0005 IGABM SB RAS.

For citation: Ivanov A.I., Ivanov M.S., Zhuravlev A.I., Loskutov E.E. Typomorphism of rock-forming minerals of andesites from the Karaburan Complex of the Polovinkinskaya Depression (Aldan-Stanovoy shield). *Vestnik of North-Eastern Federal University. Earth Sciences*. 2026;(3): 5-33. DOI: 10.25587/2587-8751-2026-1-5-33

Введение

Половинкинская впадина локализована в центральной части Алдано-Станового щита, на границе Тындинского и Нимнырского террейнов [1] (рис. 1). Территория сложена докембрийскими метаморфическими комплексами и терригенно-осадочными породами платформенного чехла [1]. Здесь выделяются древние структуры кристаллического фундамента (южная часть Алданского щита, северное окончание Становой складчатой области), осложненные структурами этапа глыбовых деформаций среднего протерозоя (?) и мезозоя, и платформенный чехол. Территория является частью обширной области, превратившейся в платформу уже к началу нижнего протерозоя. В связи с орогенезом на сопредельных с юга территориях в протерозойскую и мезозойскую эпохи в пределах района проявились процессы тектонической активизации.

Геология мезозойского периода активизации рассматриваемой территории характеризуется развитием обширного интрузивного магматизма, представленного штоками, силлами и дайками диоритов, монцодиоритов, гранитов и пород основного состава. В данный этап, также образовались покровы андезитов, которые впервые были выделены при геологоразведочных работах в Половинкинской впадине (рис. 2) и до нынешнего времени не были изучены. Проблемы генезиса андезитов привлекают внимание многих исследователей [2, 3, 4 и др.]. Несмотря на

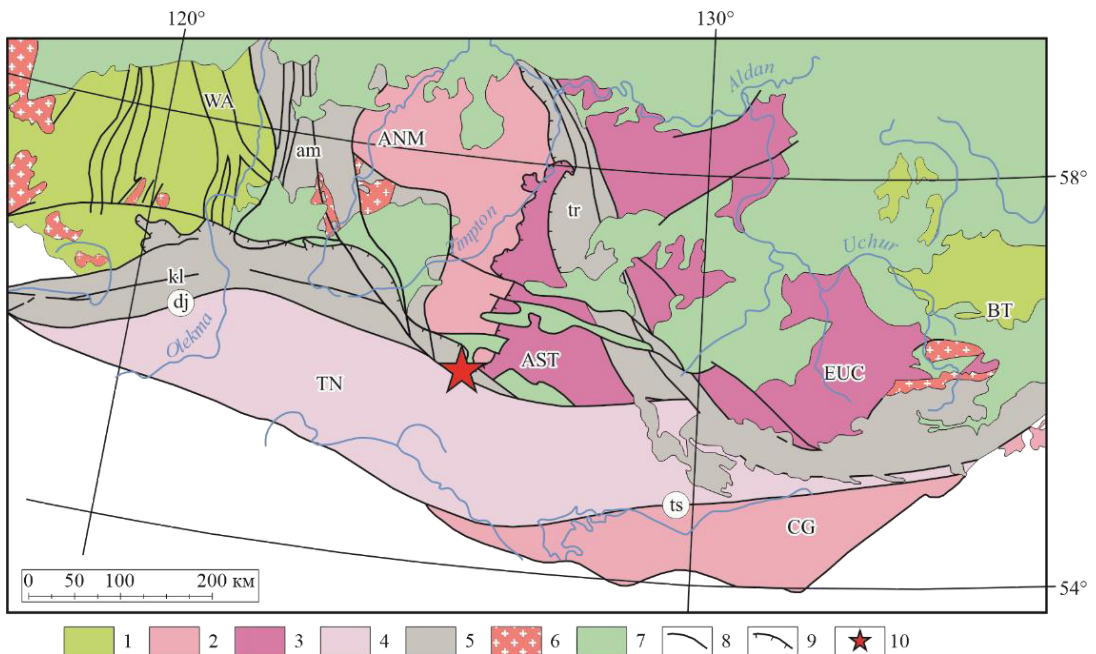


Рис. 1. Тектоническая схема Алдано-Станового щита [1].

Условные обозначения: 1 – гранит-зеленокаменные террейны (WA – Западно-Алданский, BT – Батомгский); 2 – гранулит-ортогнейсовые террейны (ANM – Нимнырский, CG – Чогарский); 3 – гранулит-парагнейсовые террейны (AST – Сутамский, EUC – Учурский); 4 – Тоналит-трондьемит-гнейсовые террейны (TN – Тындинский); 5 – зоны тектонического меланжа (am – Амгинская, kl – Каларская, tr – Тыркандинская); 6 – сшивающие раннепротерозойские граниты; 7 – чехол Сибирской платформы; 8 – разломы (dj – Джелтулакский, ts – Таксакандинский); 9 – надвиги; 10 – район работ.

Fig. 1. Tectonic scheme of the Aldan-Stanovoy Shield [1].

Legend: 1 – granite-greenstone terranes (WA – West Aldan, VT – Batomga); 2 – granulite-ortogneiss terranes (ANM – Nimnyr, CG – Chogar); 3 – granulite-paragneiss terranes (AST – Sutam, EUC – Uchur); 4 – Tonalite-trondhjemite-gneiss terranes (TN – Tynda); 5 – zones of tectonic mélange (am – Amginsky, kl – Kalar, tr – Tyrkanda); 6 – sutured Early Proterozoic granites; 7 – cover of the Siberian platform; 8 – faults (dj – Dzheltulakh, ts – Taksakanda); 9 – thrusts. 10 – work area.

длительный период изучения этих пород, вопрос об их происхождении остается дискуссионным, включающий два основных направления – формирование андезитов непосредственно в субдущированной мантии [5] или же в результате процессов в вышележащей коре [6, 7]. Присутствие их характерно для зрелых островных дуг и активных континентальных окраин [8, 9, 10 и др.], что не противоречит имеющимся представлениям о эволюции и строении рассматриваемого региона. Так, по мнению Л.М. Парфенова и А.И. Ханчука [1, 11, 12], тектоно-магматическая активизация в пределах Алдано-Станового щита обусловлена закрытием Монголо-Охотского палеоокеана и последующей коллизией Сибирского и Северо-Китайского кратонов. В раннемеловую эпоху этот процесс сменился режимом трансформного скольжения плит (калифорнийский тип), что способствовало формированию системы субширотных грабенов. В мезозое данные геодинамические условия предопределили специфику магматизма: на Становом поднятии проявился известково-щелочной магматизм, тогда как на Алданском щите – субщелочной и щелочной. Генезис этих процессов связывают с субдукцией в зонах активных континентальных окраин [1, 11-15] и влиянием мантийного плюма в ее континентальной части [16, 17].

Реконструкция термодинамических условий кристаллизации расплавов разных геодинамических обстановок является важной задачей петрологии. Одним из направлений для ее решения служит всестороннее изучение отдельных минералов как источников объективной первичной информации об условиях образования и возможной металлогенической специализации пород [8, 18, 19]. Для определения параметров кристаллизации, существовавших в период формирования андезитов Половинкинской впадины авторами использованы данные типоморфизма наиболее информативных минералов – плагиоклаза, пироксена, амфибола и биотита [18, 20–25 и др.].

Материалы и методика работ

Каменный материал, использованный в работе, предоставлен ООО «Юрский» в виде керна из скважины КЗ. Изучение вещественного состава и подсчет содержания основных породообразующих минералов пород осуществлялся с помощью поляризационного микроскопа МИН-8 (32 шлифа). Фотографии шлифов сделаны на микроскопе Olympus BX 50, оснащенном камерой Zeiss Axio CamICs 3. Исследование минералов (общим количеством 89 анализов плагиоклаза, пироксена, амфибола и биотита) выполнены в институте Геологии алмаза и благородных металлов СО РАН на сканирующем электронном микроскопе JSM6480LV с энергетическим спектрометром INCA-Energy 350 при напряжении на катоде 20 кВ и токе электронов 1 нА, диаметр пучка $d = 0,5$ мкм.

Микророндовые исследования проводились по вкрапленникам породообразующих минералов разных генераций, микролиты плагиоклаза основной массы не изучались. Параметры кристаллизации минералов рассчитаны по программам MagMin PT [26], WinPyrox [27] и SOMAGMAT [28]. Для оценки PT условий кристаллизации минералов были использованы геотермобарометры и геотермометры [29–35]: для плагиоклазов [29], пироксенов [30, 31], амфиболов [32]. Температуры кристаллизации биотитов рассчитывались по [33], давление – [34]. Определение содержания воды в расплаве и потенциала кислорода при образовании плагиоклазов выполнено по [28], амфиболов – [32]. Потенциал воды и кислорода при кристаллизации биотита рассчитаны по [25, 35].

Геологическое строение района работ

В геологическом строении территории принимают участие стратифицированные образования широкого возрастного диапазона (рис. 2). В различном объеме представлены метаморфические докембрийские комплексы пород, слагающие складчатый фундамент, а также терригенно-осадочные мезозойские и кайнозойские комплексы [1]. Образования метаморфических комплексов претерпели прогрессивный и регрессивный метаморфизм гранулитовой, амфиболитовой, эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций. Породы регрессивного метаморфизма эпидот-амфиболитовой и зеленосланцевой фаций выделены в отдельный комплекс и образуют на площади работ мощные зоны диафтореза. Вопросы, касающиеся возраста и генезиса диафторитов, в настоящее время не имеют однозначных решений и остаются дискуссионными [36].

В тектоническом плане [36] исследуемая территория попадает под влияние Становой зоны разломов, разделяющей такие крупные структуры, как Алданский щит и Становая складчатая область (рис. 1). Сложное тектоническое строение района обусловлено длительностью и многоэтапностью его эволюции, сопровождавшейся многостадийными процессами метаморфизма, магматизма и деформации [37]. Представления о тектоническом строении района развивались по мере изучения территории и появления новых концепций и моделей. Еще в 60-е годы в пределах Алданского щита выделялись крупные участки, различающиеся по составу слагающих их метаморфических и магматических комплексов, характеру и степени метаморфизма и структурному стилю [1]. Эти участки различными авторами назывались блоками, мегаблоками, структурно-фациальными зонами, складчатыми зонами или системами, литоплитами [38, 39, 40].

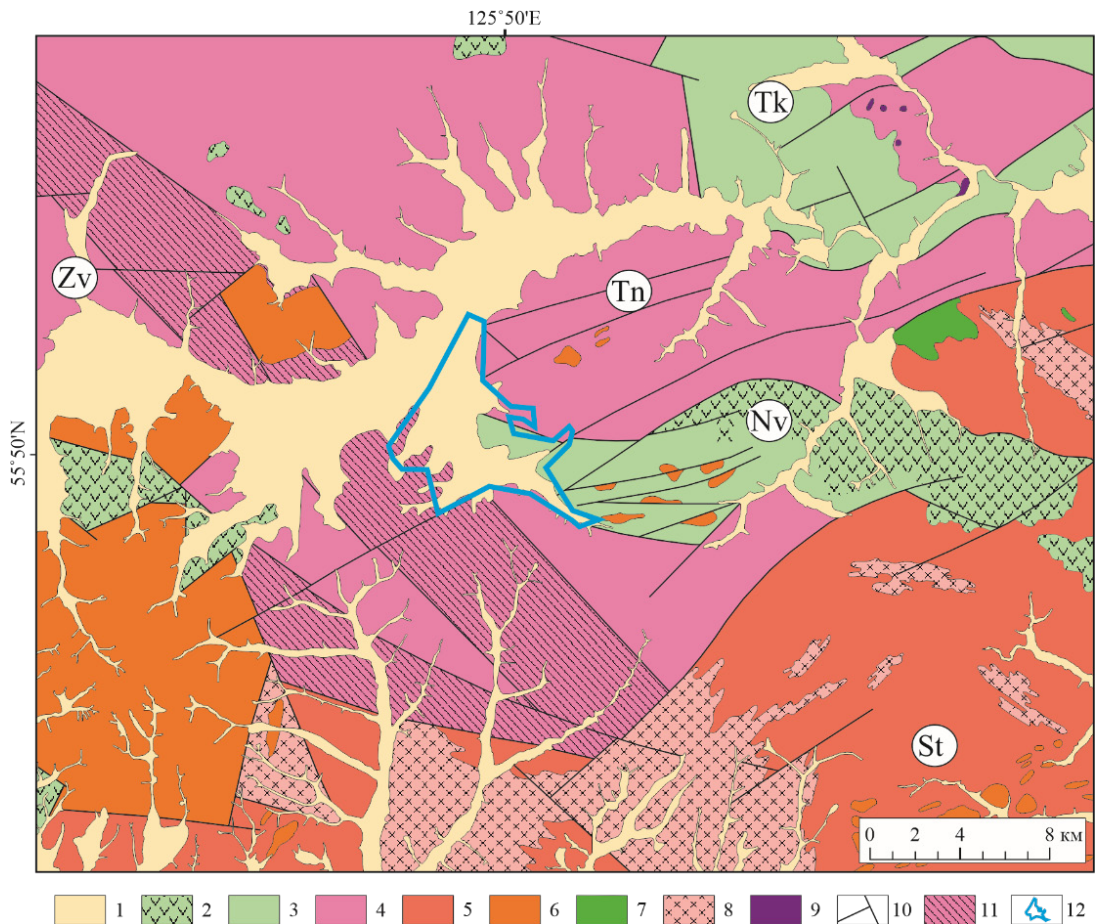


Рис. 2. Геологическая схема верхнего течения р. Гонам.

По материалам (Гиммельфарб, 1971ф), с изменениями и дополнениями авторов.

Условные обозначения: 1 – кайнозойские отложения; 2 – мезозойские вулканические образования;

3 – мезозойские терригенно-осадочные породы, слагающие впадины (Tk – Токариканская, Nv – Невачинская); 4 – мезозойские щелочные массивы; 5 – протерозойские граниты; 6 – протерозойские основные породы; 7 – стратифицированные метаморфические комплексы Становой (St) области (протерозой); 8 – архейские ультраосновные породы; 9 – стратифицированные метаморфические комплексы Южно-Алданской области (архей) (Tn – Тангракский блок, Zn – Зверевский блок); 10 – разрывные нарушения; 11 – диафториты; 12 – площадь работ.

Fig. 2. Geological map of the upper reaches of the Gonam River.

Based on (Gimmelfarb, 1971 archive), with modifications and additions by the authors.

Legend: 1 – Cenozoic deposits; 2 – Mesozoic volcanic formations; 3 – Mesozoic terrigenous-sedimentary rocks composing the depressions (Tk – Tokarikanskaya, Nv – Nevachinskaya); 4 – Mesozoic alkaline massifs; 5 – Proterozoic granites; 6 – Proterozoic basic rocks; 7 – stratified metamorphic complexes of the Stanovaya (St) region (Proterozoic); 8 – Archean ultrabasic rocks; 9 – stratified metamorphic complexes of the South Aldan region (Archean) (Tn – Tangrak block, Zn – Zverevsky block); 10 – faults; 11 – diaphthorites; 12 – work area.

Мезозойские магматические образования широко распространены на площади в виде даек на западе и отдельных массивов на востоке. Возраст их определяется как позднеюрский – раннемеловой, по аналогии с соседним участком, расположенным севернее района работ, где подобные образования прорывают юрские отложения, а сингенетичные эффузивные породы имеют нижнемеловой возраст (Ветлужских, 1969 ф). По вещественному составу среди этих

образований выделяются диориты, диоритовые порфиры, монцодиориты, граниты, гранит-порфиры, кварцевые порфиры. По возрасту выделены позднеюрская и раннемеловая группы, породы которых объединены, соответственно, в мукудинский, карабуранский комплексы [41].

Петрографические исследования пород

Согласно петро-геохимическим данным [42], андезиты Половинкинской впадины относятся к породам высококальциевой известково-щелочной серии. По отношению к толще раннемеловых песчано-конгломератовых пород [41], андезиты являются секущими, что позволяет предположить их геологический раннемеловой возраст и отношение к карабуранскому комплексу (рис. 3 а, б).

Структура пород порфировая с пилотакситовой основной массой, текстура массивная. Около 60 % породы составляют вкрапленники, представленные: плагиоклазом (An_{28-48}) – 45 %, амфиболом (роговая обманка) – 10 %, пироксеном (авгит) – 3 %. Основная масса 30-35 % сложена лейстами плагиоклаза, редкими зернами пироксена, биотита, и вулканическим стеклом (около 5 %) и рудным минералом (не более 2 %).

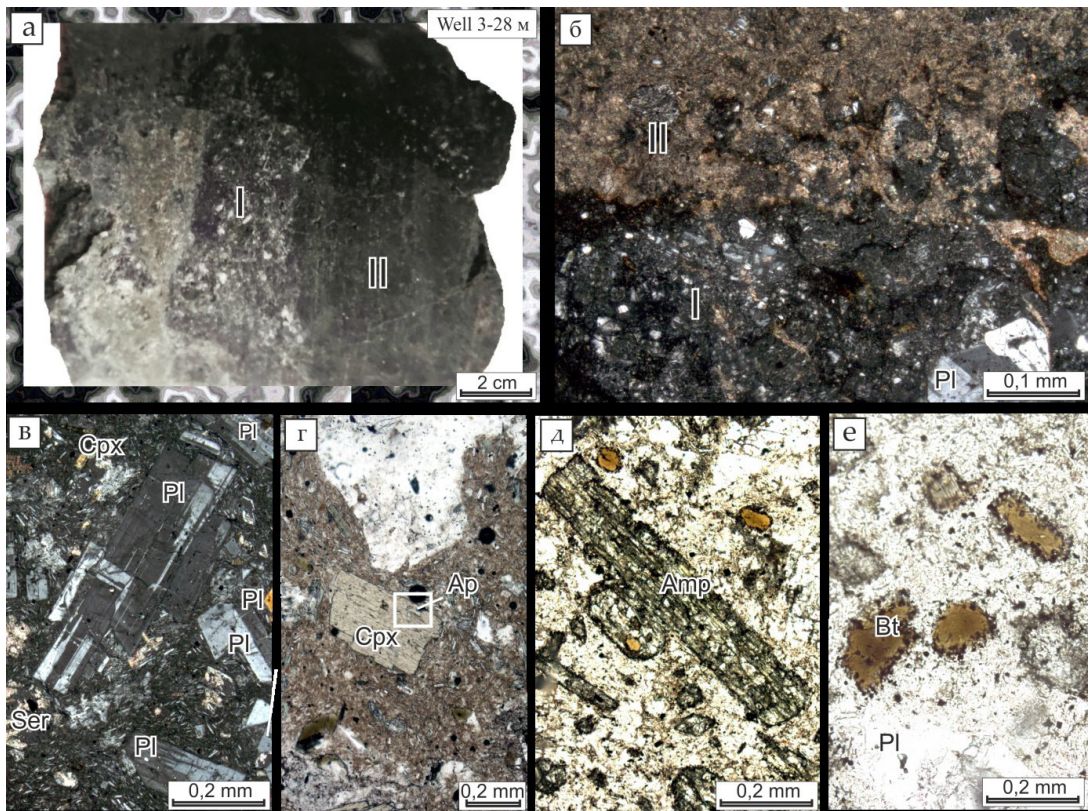


Рис. 3. Фото шлифов андезитов из Половинкинской впадины.

Условные обозначения: а – скв. 3-128 м, контакт андезитов (I) с алевролитами (II); б – шлиф K3128/1, контакт андезита с вмещающими алевролитами, николи +; шлиф K3117/1: в – вкрапленники плагиоклаза, пилотакситовая структура основной массы, николи +; шлиф K3115/1: г – пироксен с включением апатита, николи -, д – измененный амфибол, николи -, е – опацификация по биотиту, николи -.

Fig. 3. Photographs of thin sections of andesites from the Polovinkinskaya Depression.

Legend: a – well 3-128m, contact of andesites (I) with siltstones (II); b – thin section K3128/1, contact of andesite with host siltstones, nicol +; thin section K3117/1: c – plagioclase phenocrysts, pilotaxite texture of the groundmass, nicol +; thin section K3115/1: d – pyroxene with apatite inclusions, nicol -, d – altered amphibole, nicol -, e – opacification after biotite, nicol -.

Первая генерация *плаггиоклаза* представлена идиоморфными кристаллами полисинтетически sdвойникового олигоклаза (An_{28-29}), размером до 0,8 мм, призматического и таблитчатого габитусов (рис. 3 в). Вкрапленники частично серицитизированы как в периферийных, так и в ядерных частях кристаллов. Вкрапленники андезина первой генерации (An_{32-35}) представлены идиоморфными призматическими и таблитчатыми кристаллами размером до 0,6 мм, для которых типично наличие полисинтетических двойников и частичная серицитизация. В отличие от них, кристаллы второй генерации (An_{37-48}) имеют меньшие размеры (до 0,4 мм), обладают призматическим или таблитчатым габитусом и характеризуются простым двойникованием (рис. 3 в). Структура основной массы определяется сосюритизированными микролитами плаггиоклаза, которые, располагаются в различных направлениях и окаймляют вкрапленники породообразующих минералов разных генераций (рис. 3 в, г). Наиболее ранними из темноцветных породообразующих минералов рассматриваемых андезитов является *пироксен*, представленный авгитом и редким диопсидом, который выявлен при микрозондовых исследованиях. Короткостолбчатые кристаллы вкрапленников авгита ($En_{44,25-61,91}$) часто с неровными краями (до 0,3 мм), светлого или бледного травяно-зеленого цвета, в единичных случаях содержащие мелкие включения апатита (рис. 3 г). В группе *амфиболов* кристаллооптически диагностируется только паргасит, редкий эденит выявлен при микрозондовых исследованиях. Наиболее распространенный паргасит, образует призматические и, редко, таблитчатые кристаллы без конечных граней размером до 0,6 мм, с плеохроизмом от желтовато-коричневого до коричневого (рис. 3 д). Он кристаллизовался после пироксена и плаггиоклаза, но ранее биотита. Таблички *биотита* ($f'=31-44,62$, $mg'=55,38-69$) развиваются по амфиболу и/или пироксену, вплоть до образования полных псевдоморфоз по ним. Биотит опацититизирован и нередко почти полностью замещен хлоритом (рис. 3 е).

Микрозондовые исследования минералов

Вкрапленники *плаггиоклаза*, представлены олигоклазом (An_{28-29}), андезином (An_{32-35}) первой и андезином (An_{37-48}) – второй генераций (таблица 1, рис. 4 а). Рассчитанный интервал температур кристаллизации (MagMin P-T [26, 29]) вкрапленников олигоклаза 1104–1092°C, при давлении 12–11,3 кбар. Кристаллизация их происходила в относительно стабильных условиях при высоком потенциале кислорода ($\log fO_2 = -6,03 \dots -6,86$) и содержании H_2O в расплаве 3,6–3,9 % (табл. 1). Для андезина первой и второй генераций, установлена четкая обратная зависимость между температурой и давлением при кристаллизации: первая генерация 1108–1090°C, вторая – 1124–1106°C; соответственно 8,3–9,8 кбар и 4,5–7,8 кбар. При падении давления, растёт температура кристаллизации с одновременным падением содержания воды в расплаве (3,43–3,05 %, 2,82–1,92 %) и росте потенциала кислорода ($\log fO_2 = -5,78 \dots -6,67$, $\log fO_2 = -5,04 \dots -5,67$,) (таблица 1, рис. 4 б, в, г) (COMAGMAT, [28]).

Таблица 1

Химические составы плагиоклазов из андезитов Половинкинской впадины

Table 1

Chemical compositions of plagioclases from andesites of the Polovinkinskaya Depression

№ Pl	SiO ₂	Al ₂ O ₃	FeO _{int}	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	Total	An	Ab	Or	TpC	Ркбap	H ₂ O	logfO ₂
28	60,35	25,76	0	0	5,86	7,8	1,1	100,87	27,53	66,32	6,15	1100,37	12,04	3,83	-6,35
28	63,18	24,14	0,82	0	5,04	6,97	0,54	99,37	27,55	68,94	3,51	1092,25	11,57	3,88	-6,57
28	61,77	24,24	0	0	5,2	7,03	0,63	98,58	27,85	68,13	4,02	1094,23	11,52	3,84	-6,32
28	62,53	23,91	0	0	5,21	6,86	0,87	99,58	27,92	66,53	5,55	1099,04	11,75	3,8	-6,42
28	62,37	23,98	0	0	6,15	8,01	0,8	100,37	28,48	67,11	4,41	1096,3	11,3	3,75	-6,85
29	62,79	23,86	0	0	6,1	7,84	0,92	100,01	28,53	66,35	5,12	1098,54	11,4	3,73	-6,86
29	60,52	24,55	0	0	5,2	6,27	1,03	100,45	29,26	63,84	6,9	1104,82	11,37	3,61	-6,03
32	62,05	25,05	0	0	6,3	7,21	0,5	101,08	31,59	65,42	2,99	1096,4	9,75	3,43	-6,18
32	59,12	25,79	0	0	6,32	7,11	0,54	100,43	31,87	64,89	3,24	1097,58	9,68	3,39	-5,88
32	59,56	26,18	0	0	6,68	7,33	0,8	101,69	31,97	63,48	4,56	1101,58	9,86	3,36	-5,96
33	60,93	22,88	0	0	6,79	7,24	0,59	98,37	32,97	63,62	3,41	1099,66	9,29	3,27	-6,67
34	57,99	26,75	0	0	7,32	7,89	0,3	100,24	33,89	66,11	0	1090,98	8,4	3,25	-5,78
34	56,86	27,2	0,81	0	7,53	7,62	0,67	100,69	34,05	62,35	3,61	1101,78	8,93	3,16	-5,87
34	59,21	24,6	0,95	0	7,03	7,12	0,49	99,55	34,3	62,86	2,85	1099,96	8,72	3,15	-6,31
35	61,69	24,6	0	0	6,74	6,65	0,45	98,31	34,9	62,32	2,77	1100,65	8,49	3,09	-6,05
35	59,11	26,54	0,9	0	6,81	6,6	0,62	99,75	34,94	61,27	3,79	1103,58	8,64	3,06	-5,78
35	62,88	24,68	0	0	6,37	6,19	0,39	98,99	35,32	62,11	2,57	1100,69	8,32	3,05	-5,92
37	60,27	26,21	0	0	6,75	5,83	0,64	99,01	37,37	58,41	4,22	1108,21	7,89	2,82	-5,47
38	58,64	25,24	0	0	7,33	6,26	0,49	98,25	38,09	58,87	3,03	1106,02	7,49	2,77	-5,67
39	57,82	26,85	0	0	7,68	6,29	0,6	98,98	38,83	57,55	3,61	1108,63	7,34	2,69	-5,37
40	58,97	25,06	0	0	7,92	6,11	0,62	99,71	40,17	56,08	3,74	1110,86	6,96	2,57	-5,7
40	59,49	25,63	0	0	7,8	6,16	0,31	100,22	40,38	57,71	1,91	1106,31	6,63	2,59	-5,56
42	57,18	25,64	0	0,41	7,96	5,77	0,54	100,86	41,8	54,83	3,38	1112,15	6,45	2,43	-5,53
42	55,15	26,06	1,32	0	8,58	6,16	0,52	100,79	42,17	54,79	3,04	1111,81	6,3	2,41	-5,56
43	58,24	25,46	0,48	0	7,9	5,47	0,55	98,29	42,81	53,64	3,55	1113,97	6,2	2,34	-5,48
43	59,39	26,88	0,74	0	8,05	5,69	0,36	100,21	42,88	54,84	2,28	1110,86	6	2,36	-5,37
43	59,17	25,87	0,52	0	7,88	5,58	0,32	99,52	42,92	55	2,08	1110,39	5,96	2,36	-5,45
43	57,86	25,58	0	0	8,89	6,24	0,31	101,98	43,26	54,95	1,8	1110,15	5,83	2,34	-5,52
44	59,08	26,05	0	0	7,89	5,4	0,37	99,25	43,59	53,98	2,43	1112,23	5,83	2,3	-5,28
44	58,97	26,12	0	0	9,31	5,78	1,1	101,29	44,17	49,62	6,21	1122,19	6,21	2,17	-5,51
44	58	25,32	1,14	0	8,43	5,54	0,46	98,7	44,36	52,76	2,88	1114,42	5,7	2,22	-5,61
45	57,91	26,88	0	0	9,15	5,72	0,69	99,4	45,02	50,93	4,04	1118,12	5,69	2,14	-5,23
46	57,17	28,35	0	0	9,88	6,48	0	101,88	45,73	54,27	0	1109,14	4,95	2,17	-5,04
47	60,53	25,61	1,15	0,41	8,09	4,9	0,29	100,15	46,76	51,25	2	1115,49	4,98	2,05	-5,63
47	58,51	25,24	0,57	0	8,2	5,06	0	101,18	47,24	52,76	0	1111,31	4,59	2,05	-5,39
48	56,36	25,84	1,69	0	8,82	4,83	0,84	98,93	47,52	47,09	5,39	1124,33	5,26	1,92	-5,42

Примечание: Pl₂₈₋₂₉ олигоклаз, Pl₃₂₋₄₈ андезин. Образцы K3189/1 и K3119/1.

Note: Pl₂₈₋₂₉ oligoclase, Pl₃₂₋₄₈ andesine. Particles K3189/1 and K3119/1.

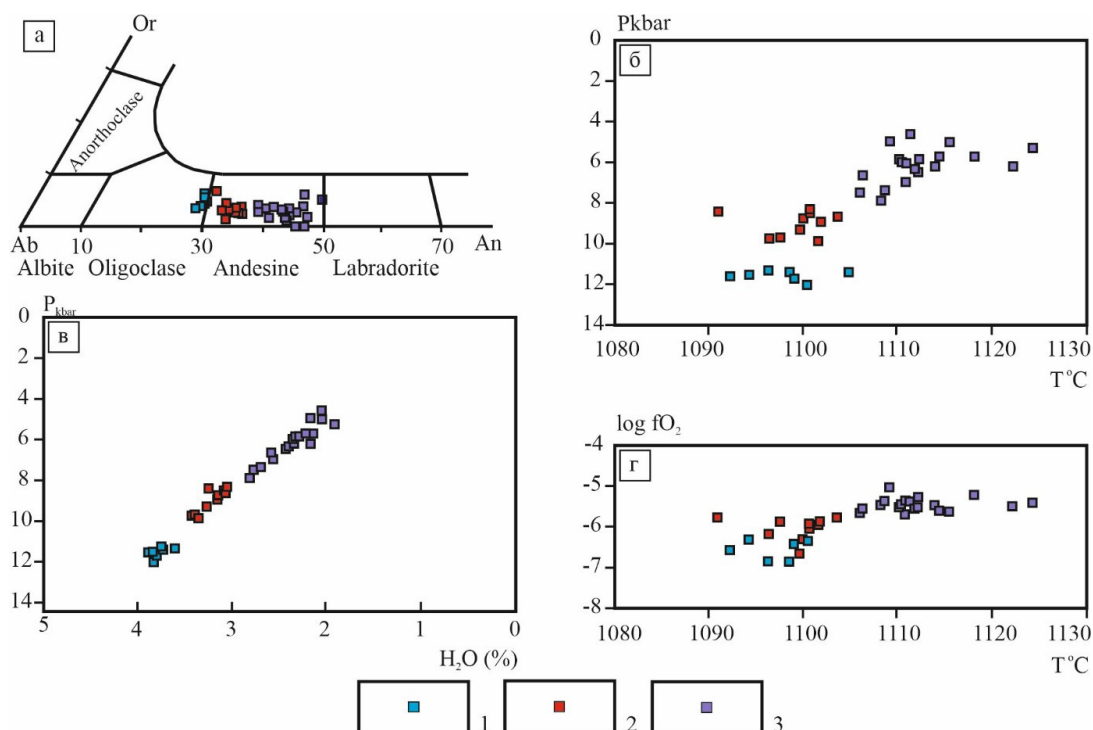


Рис. 4. Классификация и параметры кристаллизации плагиоклазов из андезитов Половинкинской впадины. а – типизация плагиоклазов по [43]; диаграммы параметров кристаллизации плагиоклазов, зависимости распределения: б – температуры от давления; в – содержания воды в расплаве от давления; г – фугитивности кислорода от температуры. Условные обозначения: 1 – олигоклаз, 2 – андезин.

Fig. 4. Classification and crystallization parameters of plagioclases from andesites of the Polovinkinskaya Depression.

а – plagioclase typification according to [43]; diagrams of plagioclase crystallization parameters, dependences of the distribution: б – temperature on pressure; в – water on pressure; д – oxygen fugacity on temperature.

Legend: 1 – oligoclase, 2 – andesine.

На основе результатов микрозондовых анализов (расчет по программе MagMin PT [26, 44]) в рассматриваемых андезитах установлены две разновидности Ca-Mg-Fe *моноклинных пироксенов*: диопсид ($Wo_{45,19-45,69}$, $En_{48,73-48,84}$, $Fs_{5,47-6,08}$) и преобладающий авгит ($Wo_{39,63-44,52}$, $En_{50-53,45}$, $Fs_{6,81-8,23}$) (Таблица 2, Рисунок 5 а). Температурный интервал кристаллизации авгита определен в 1240–1080°C, диопсида – 1086–1078°C (расчеты по [27, 30] при давлении, соответственно 12,3–7,7 кбар и 10,7–10,3 кбар [31] (табл. 2, рис. 5 б).

Таблица 2

Химический состав пироксенов из андезитов Половинкинской впадины

Table 2

Chemical composition of pyroxenes from andesites of the Polovinkinskaya Depression

SiO ₂	54,1	51,34	54,08	50,85	53,04	53,53	53,73	53,57
TiO ₂	0,74		0,49	0,54	0,06	0,19		0,55
Al ₂ O ₃	1,06	2,83	1,82	1,84	2,3	1,31	1,33	2,08
Cr ₂ O ₃	0,6	0,84	1,2	1,28	1,14	0,76	1,08	0,36
FeO _{tot}	4,33	5,3	4,07	4,72	4,84	3,98	3,82	3,5
MgO	18,91	18,21	16,94	17,37	17,84	19,46	17,19	17,54
CaO	19,92	20,77	21,46	21,13	21,04	21,83	22,18	22,83
Na ₂ O	0,18	1,04	0,91	0,57	0,42	0,33	0,67	0,83
Сумма	99,84	100,33	100,97	98,3	100,68	101,39	100	101,26
Wo	40,15	41,34	44,52	43,14	42,38	41,97	45,19	45,69
En	53,04	50,43	48,89	49,34	50	52,06	48,73	48,84
Fs	6,81	8,23	6,59	7,52	7,61	5,97	6,08	5,47
T°C	1282	1240	1188	1080	1176	1154	1078	1086
Pkbar	12,22	12,35	9,68	10,74	11,37	11,78	10,31	10,74
	1	2	3	4	5	6	7	8

Примечание: 1-2 диопсид, 3-8 – авгит. Образец K3119/1.

Note: 1-2 diopside, 3-8 – augite. Particle K3119/1.

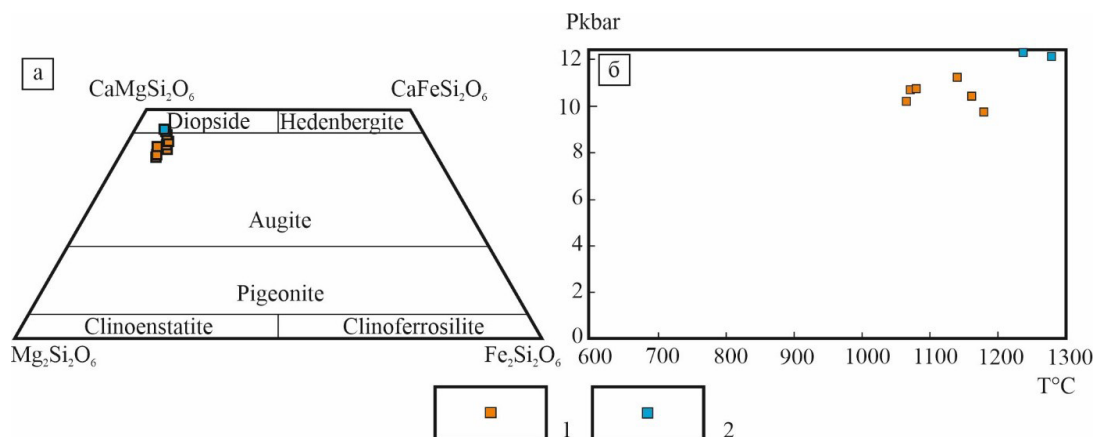


Рис. 5. Классификация и параметры кристаллизации пироксенов из андезитов Половинкинской впадины.
а – типизация пироксенов по [44]; б – РТ условия кристаллизации пироксенов.
Условные обозначения: 1 – авгит, 2 – диопсид.

Fig. 5. Classification and crystallization parameters of pyroxenes from andesites of the Polovinkinskaya depression.

a – pyroxene typification according to [44]; b – PT conditions of pyroxene crystallization.
Legend: 1 – augite, 2 – diopside.

Согласно расчетам [45, 46], амфиболы андезитов относятся к группе кальциевых минералов, для которых характерны следующие параметры: $(Ca+Na)_B > 1,50$, $Na_B < 0,50$ и $Ca_B \geq 1,50$ (таблица 3). По содержанию $Na_2O > 2\%$, $Al_2O_3 > 5\%$, $TiO_2 > 1\%$ они относятся к обычным магматическим амфиболам и по значениям $(Na+K)_A \geq 0,50$ являются субщелочными разновидностями [45], представленными в основном паргаситами, реже – эденитами (таблица 3, рис. 6 а). Преобладающие паргаситы отличаются от эденитов более низкими содержаниями SiO_2 (42,7–45,78 %) и MgO (18,96–20 %), но более высокими – Al_2O_3 (11,29–1,14 %), и $FeO_{общ}$ (9,55–13,09 %) (таблица 3). Кристаллизация паргаситов протекала при неравномерном снижении давления (от 4,3 до 0,57 кбар) и температуры (от 915°C до 735°C [32]) (таблица 3, рис. 6 б), на фоне падения потенциала кислорода от окислительного режима до восстановительного (буфер $NiNiO+3, \log fO_2 = -4,67 \dots -12,75$) и содержания воды в расплаве (9,3–5,6 %) [32] (таблица 3, рис. 6 в, г). Эдениты кристаллизовались в условиях понижения давления (3,1–1,1 кбар) и температуры (914–831°C) (таблица 3, рис. 6 б), в более окислительных условиях, при уменьшении потенциала кислорода ($\log fO_2 = -6,43 \dots -8,89$) и содержания воды в расплаве (7,5–4 %) (таблица 3, рис. 6 в, г).

Таблица 3

Химический состав амфиболов из андезитов Половинкинской впадины

Table 3

Chemical composition of amphiboles from andesites of the Polovinkinskaya Depression

SiO ₂	49,68	51,38	54,99	42,7	43,12	43,53	43,15	45,07	45,78	45,27	43,97
TiO ₂	2,14	1,41		2,55	1,58	1,9	1,54	2,11	2,04	1,61	1,48
Al ₂ O ₃	8,56	5,92	3,56	13,14	10,88	13,27	12,39	11,75	11,29	11,6	11,51
FeO _{tot}	8,11	8,74	8,75	13,09	9,73	13,78	11,16	11,18	9,55	9,94	12,14
MgO	18,96	19,24	20	14,17	18,14	12,9	14,78	16,36	17,95	17,06	14,7
CaO	10,7	9,65	11,1	11,67	12,03	11,86	11,28	10,86	11,27	11,25	11,23
Na ₂ O	2,82	2,7	2	2,05	2,11	2,11	2,72	2,2	2,18	2,24	2,12
K ₂ O	0,83	0,96		1,09	0,78	1,18	1,39	0,99	1,01	0,89	0,95
Total	101,8	100	100,4	100,5	98,37	100,5	98,41	100,5	101,1	99,87	98,11
(Na+K) _A	0,77	0,62	0,92	0,73	0,76	0,75	0,81	0,77	0,78	0,77	0,32
(Ca+Na) _B	1,7	1,71	1,86	1,87	1,77	1,72	1,84	1,71	1,65	1,81	1,85
Ca _A	0	0,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Na _B	0	0,28	0,1	0	0,01	0,14	0	0	0	0	0,21
Ca _B	1,7	1,44	1,76	1,87	1,76	1,58	1,84	1,71	1,65	1,81	1,63
Ti	0,22	0,14	0	0,27	0,17	0,2	0,17	0,22	0,21	0,17	0,16
Si ф.е.	6,7	7	7,62	6,02	6,07	6,19	6,21	6,22	6,24	6,27	6,3
Mg/Mg+Fe ²⁺	0,98	0,8	0,96	0,83	1,06	0,72	0,82	0,99	1,04	1	0,86
Ркбар	3,11	1,09	3,844	2,78	3,019	1,77	3,942	3,23	3,515	4,317	0,57
T°C	914,2	830,7	892,8	912,8	865,4	887,2	866,8	900,1	912	915,1	735,4
log fO ₂	-6,76	-8,89	-6,43	-4,67	-8,54	-8,58	-9,08	-7,24	-7,7	-8,09	-12,75
H ₂ O _{melt} (%)	5,19	4,01	7,49	7,65	7,62	4,03	9,29	6,23	5,58	6,9	5,61
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

Примечание: 1-3 – эденит, 3-11 – паргасит. Образец K3119/1.

Note: 1-3 – edenite, 3-11 – pargasite. Particle K3119/1.

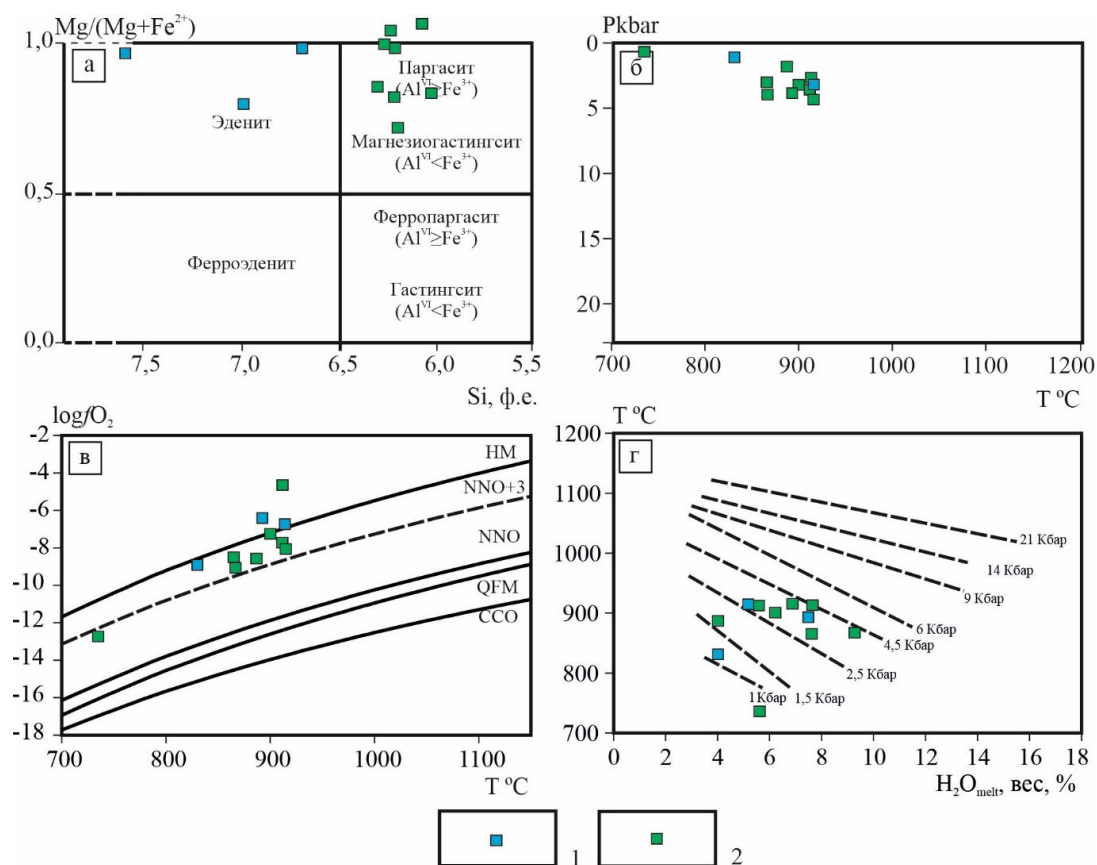


Рис. 6. Классификация и параметры кристаллизации амфиболов из андезитов Половинкинской впадины. а – типизация амфиболов по [45]; диаграммы параметров кристаллизации амфиболов [32], зависимости распределения: б – температур от давления; в – фугитивности кислорода от температур; г – распределения воды от РТ условий. Условные обозначения: 1 – эденит, 2 – паргасит.

Fig. 6. Classification and crystallization parameters of amphiboles from andesites of the Polovinkinskaya Depression.

а – typification of amphiboles according to [45]; diagrams of amphibole crystallization parameters [32], dependences of distribution: б – temperature on pressure; в – oxygen fugacity on temperature; г – water distribution on PT conditions. Legend: 1 – edenite, 2 – pargasite.

Установленные при петрографических исследованиях слюды, по отношению $Mg:Fe < 2:1$ и классификационным данным (таблица 4, рис. 7 а), отвечают *Mg-биотиту* [47] с железистостью $f' = 31-44,62$ и глиноземистостью $al' = 17,47-21,48$ % (таблица 4). Кристаллизация его протекала в восстановительных условиях (буфер Ni-NiO), с понижением потенциала кислорода ($\log fO_2 = -15,02 \dots -18,38$) [25] (рис. 7 в, г) и воды ($\log fH_2O = 2,53-1,62$) [35], по мере понижения температуры (758–654°C) [33] (рис. 7 б), на фоне неравномерного распределения давления ($P = 2,21-0,61$ кбар) [34] (таблица 4).

Таблица 4

Химический состав биотитов из андезитов Половинкинской впадины

Table 4

Chemical composition of biotites from andesites of the Polovinkinskaya Depression

SiO ₂	38,38	40,61	38,47	39,33	39,07	39,71	39,58	38,63	39,18	39,02	40,35	40,31
TiO ₂	3,21	3,34	2,47	3,01	3,24	3,25	3,11	4,26	3,77	3,66	3,17	3,01
Al ₂ O ₃	14,88	15,85	16,22	15	14,9	13,95	16,07	14,35	15,74	15,2	15,21	14,68
FeO	12,26	15,14	15,51	13,43	14,32	11,48	12,04	17,11	14,66	15,08	13,44	13,99
Fe ₂ O ₃	2,83	1,45	1,6	2,52	2,78	2,58	1,86	2,15	2,09	1,39	2,24	2,57
FeO _{tot}	15,09	16,59	17,11	15,95	17,1	14,06	13,9	19,26	16,75	16,47	15,68	16,56
MgO	16,46	16,09	15,54	16,65	14,7	17,56	16,62	13,41	15,48	14,87	16,1	13,7
Na ₂ O	1,04			0,57	0,85	0,84	0,9	0,38	0,78		0,73	0,82
K ₂ O	8,75	8,52	9,33	8,55	8,7	8,99	9,3	8,94	8,93	8,85	8,97	9
Сумма	98,21	101	99,14	99,06	98,56	98,36	99,67	99,23	100,63	98,07	100,2	98,08
<i>f'</i>	33,96	36,65	38,18	34,96	39,49	31	31,94	44,62	37,77	38,32	35,33	40,41
<i>mg'</i>	66,04	63,35	61,82	65,04	60,51	69	68,06	55,38	62,23	61,68	64,67	59,59
<i>al'</i>	18,84	19,23	20,11	18,58	18,91	17,47	19,95	18,46	19,57	19,29	18,79	18,83
T°C	721,69	709,73	654,01	696,82	697,59	741,67	733,54	730,76	734,99	731,89	710,61	689,85
Ркбар	1,16	1,37	1,81	1,13	1,17	0,61	1,58	0,93	1,43	1,33	1,13	1,06
logfO ₂	-16,11	-16,49	-18,38	-16,91	-16,88	-15,5	-15,74	-15,83	-15,7	-15,79	-16,46	-17,14
logH ₂ O	1,97	2,12	1,67	1,85	2,01	2,02	2,07	2,52	2,31	2,36	2	1,98
SiO ₂	36,97	37,42	36,77	40,13	37,97	41,29	38,89	39	38,92	38,35	38,66	
TiO ₂	4,29	3,54	3,71	3,88	3,5	2,9	3,47	2,86	3,65	3,18	3,96	
Al ₂ O ₃	16,14	15,6	15,76	14,24	15,29	16,13	15,55	14,35	17,49	15,42	15,73	
FeO	15	14,44	14,59	13,92	16,12	13,05	14,43	14,51	15,54	13,53	13,73	
Fe ₂ O ₃	2,47	2,33	2,66	1,98	1,62	2,21	2,17	3,13	1,31	2,28	2,52	
FeO _{tot}	17,47	16,77	17,25	15,9	17,74	15,26	16,6	17,64	16,85	15,81	16,25	
MgO	14,83	15,26	14,21	15,63	15,5	15,15	15,25	16,23	15	15,66	15,58	
Na ₂ O	1,26	0,77	1,18	0,48		1,21	0,91	0,86	0,63	0,68	1,16	
K ₂ O	9	8,96	9,12	8,9	9,16	9,51	9,52	9,15	9,26	8,89	8,63	
Сумма	99,96	98,32	98	99,16	99,16	101,5	100,19	100,1	101,8	97,99	99,97	
<i>f'</i>	39,79	38,14	40,51	36,33	39,1	36,11	37,91	37,88	38,66	36,16	36,91	
<i>mg'</i>	60,21	61,86	59,49	63,67	60,9	63,89	62,09	62,12	61,34	63,84	63,09	
<i>al'</i>	20,52	19,86	20,42	17,95	19,18	19,88	19,53	17,83	21,48	19,52	19,72	
T°C	757,85	719,96	724,2	756,1	705,57	698,16	717,79	670,7	725,85	709,54	755,72	
Ркбар	1,78	1,59	1,75	0,73	1,37	1,49	1,4	0,82	2,21	1,46	1,47	
logfO ₂	-15,02	-16,16	-16,03	-15,07	-16,62	-16,86	-16,23	-17,79	-15,98	-16,49	-15,08	
logH ₂ O	2,53	2,18	2,28	2,43	2,17	1,92	2,17	1,69	2,34	2,02	2,4	

SiO ₂	38,36	39,07	37,76	38,43	38,67	37,39	37,91	37,73	38,99	37,79	39,69	
TiO ₂	3,4	3,41	3,3	3,48	3,68	3,04	2,81	2,7	3,83	2,89	3,78	
Al ₂ O ₃	14,7	14,36	14,74	14,67	14,84	15,11	14,67	14,45	14,72	14,57	16,05	
FeO	14,8	15,5	14,006	15,16	14,77	14,1	14,93	15,23	14,55	14,12	15,89	
Fe ₂ O ₃	3,2	1,86	3,45	2,78	1,26	1,64	3,04	2,87	1,93	3,03	1,95	
FeO _{tot}	18	17,36	17,51	17,94	16,03	15,74	17,97	18,1	16,48	17,15	17,84	
MgO	16,28	15,36	15,11	14,49	15,88	17,36	16,51	16,55	15,59	15,65	15,16	
Na ₂ O	0,8		1,2	1,01			0,65	0,48	0,74	0,89	0,57	
K ₂ O	8,21	9	8,52	9,43	9,44	9,34	8,96	9,27	9,83	9,2	8,74	
Сумма	99,75	98,56	98,14	99,45	98,54	97,98	99,48	99,28	100,2	98,14	101,8	
f'	38,28	38,8	39,4	40,99	36,16	33,72	37,91	38,02	37,23	38,07	39,77	
mg'	61,72	61,2	60,6	59,01	63,84	66,28	62,09	61,98	62,77	61,93	60,23	
al'	18,24	18,12	18,82	18,73	18,76	18,9	18,23	18,01	18,58	18,54	19,68	
T°C	697	704,68	696,57	702,17	739,92	701,31	665,22	658,47	743,05	676,84	720,8	
Ркбар	1,01	0,9	1,17	1,07	1,13	1,33	1,05	0,98	0,99	1,1	1,5	
logfO ₂	-16,9	-16,65	-16,92	-16,73	-15,55	-16,76	-17,98	-18,22	-15,46	-17,58	-16,14	
logH ₂ O	1,94	2,13	1,94	2,11	2,36	1,92	1,66	1,62	2,37	1,76	2,29	

Примечание: при расчетах железистости $f' = (100 \cdot \text{Fe}^{2+} / \text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, магнезиальности $mg' = (100 \cdot \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}))$ и глиноземистости $al' = (100 \cdot \text{Al} / (\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mg}))$, использованы ф.е. Образец K3189/1.

Note: when calculating iron content $f' = (100 \cdot \text{Fe}^{2+} / \text{Mg} + \text{Fe}^{2+})$, magnesia content $mg' = (100 \cdot \text{Mg} / (\text{Mg} + \text{Fe}^{2+}))$ and alumina content $al' = (100 \cdot \text{Al} / (\text{Si} + \text{Al} + \text{Fe} + \text{Mg}))$, formula units were used. Particle K3189/1.

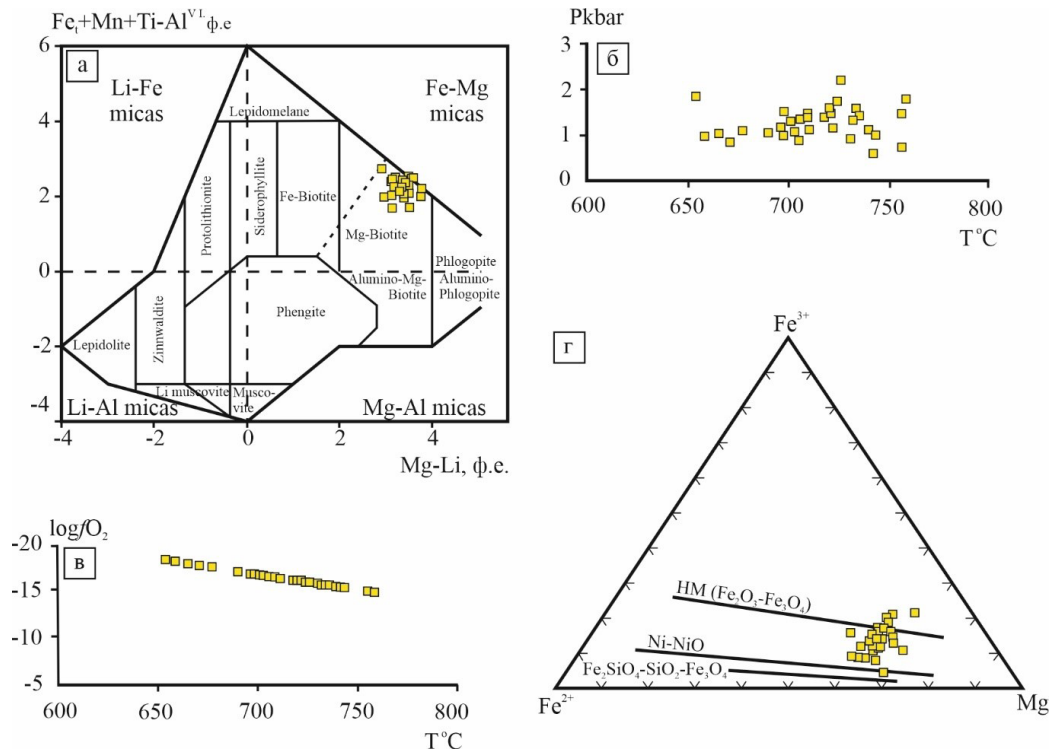


Рис. 7. Классификация и параметры кристаллизации биотитов из андезитов Половинкинской впадины.
 а – типизация биотитов по [47]; диаграммы параметров кристаллизации биотитов, зависимости распределения: б – температур от давления, в – фугитивности кислорода от температур;
 г – окислительно-восстановительный режим биотитов [25].

Fig. 7. Classification and crystallization parameters of biotites from andesites of the Polovinkinskaya Depression.

a – typification of biotites according to [47]; diagrams of biotite crystallization parameters, dependences of the distribution of: b – temperature on pressure, c – oxygen fugacity on temperature; d – oxidation-reduction regime of biotites [25].

Обсуждение

В результате исследований, выявлено, что в составе андезитов Половинкинской впадины выделяются три генерации плагиоклазов. Первая – вкрапленники олигоклаза (An_{28-29}), андезина (An_{32-35}), вторая – андезина (An_{37-48}) и третья микролиты основной массы. Расчетные интервалы температур кристаллизации вкрапленников олигоклаза $T=1104-1092^{\circ}C$ и андезина первой и второй генераций $T=1124-1091^{\circ}C$, в целом согласуются с показателями этих параметров для таковых плагиоклаза из базальтов и андезитов $T=1430-1100^{\circ}C$ [48–53]. При расчетах давления, существовавшего на период кристаллизации плагиоклазов, авторами выделено два интервала значений: для олигоклаза $P=11,3-12$ кбар и для андезина в целом – $4,6-9,9$ кбар. То есть, при давлении >10 кбар наблюдается повышенная стабильность натриевых плагиоклазов [54]. Это связано с тем, что структура альбита более плотная и лучше адаптируется к условиям высокого давления [55]. Выявленная авторами обратная зависимость между давлением и температурой при кристаллизации андезина, может объясняться тем, что в зонах субдукции океаническая кора, погружаясь в мантию, создает уникальные термодинамические условия: высокие давления и относительно низкие температуры [56, 57]. Погружение океанической плиты на большие глубины приводит к быстрому увеличению давления, однако сама плита остается холодной из-за медленного теплопереноса в литосфере. В результате в зонах субдукции температура увеличивается значительно медленнее, чем давление [58].

Важным фактором, влияющим на кристаллизацию минералов в зонах субдукции, является фугитивность кислорода [59, 60], показатели которой незначительно падают при образовании олигоклаза ($\log fO_2 = -6,03 \dots -6,86$) и повышаются при образовании андезина ($\log fO_2 = -5,04 \dots -6,67$) на фоне роста содержания воды в расплаве в первом случае и падения – во втором (3,61–3,88 % и 1,92–3,43 %).

При определении термодинамических условий кристаллизации вкрапленников моноклинных пироксенов – авгита и диопсида, выявлена «нормальная» зависимость температуры от давления: при понижении температуры от $1240^{\circ}C$ до $1080^{\circ}C$ отмечается понижение давления от 12,4 кбар до 9,7 кбар. На дискриминационных диаграммах $Ti+Cr-Ca$ [61] и TiO_2-FeO [62, 63] точки составов рассматриваемых пироксенов (использованы анализы в которых определен TiO_2) практически целиком ложатся в поля океанических базальтов (рис. 8 а, б), что подтверждает мнение предшественников об участии субдуцированной океанической коры Монголо-Охотского бассейна в формировании материнских мезозойских магматических очагов алданского комплекса [1, 64, 65 и др.].

На основе расчетов [32], кристаллизация эденита и паргасита проходила в широком P-T диапазоне. Наиболее глубинные условия начала их кристаллизации характеризуются давлением 4,3–2,8 кбар и температурой $915-865^{\circ}C$, тогда как амфиболы близ поверхностных условий ($P=1,77-0,57$ кбар), кристаллизовались при более низкой температуре – $887-735^{\circ}C$ (таблица 3, рис. 6 б). Окислительно-восстановительный режим, существовавший на период кристаллизации амфиболов [32], характеризуется понижением активности кислорода ($\log fO_2 = -4,67 \dots -12,75$) на фоне неравномерного распределения воды в расплаве (9,3–4 %) (таблица 3, рис. 6 в, г).

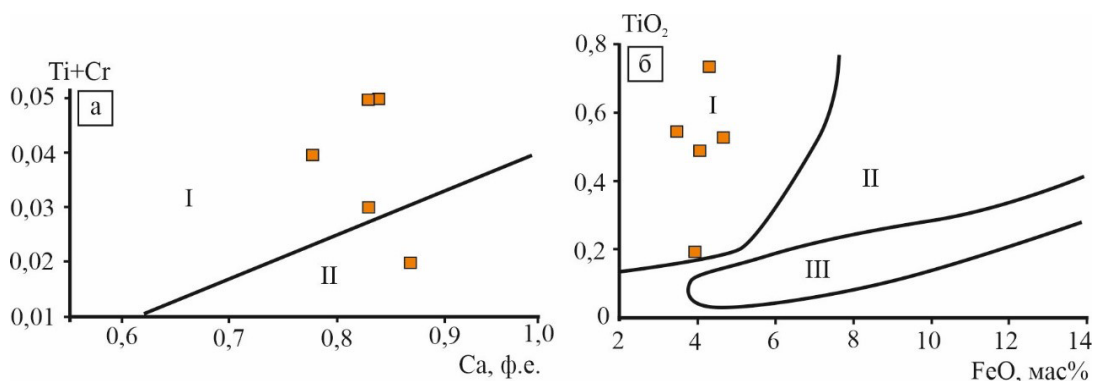


Рис. 8. Дискриминационные диаграммы $Ti+Cr-Ca$ и TiO_2-FeO для пироксенов из андезитов Половинкинской впадины

a – области пироксенов из базальтов по [61]: из I – океанических (D), II – островодужных базальтов. б – поля пироксенов эффузивных пород [62, 63]: I – океанических, II – островодужных, III – бонинитов.

Fig. 8. Discrimination diagrams of $Ti+Cr-Ca$ and TiO_2-FeO for pyroxenes from andesites of the Polovinkinskaya Depression

a – fields of pyroxenes from basalts according to [61]: from I – oceanic (D), II – island-arc basalts. b – fields of pyroxenes from effusive rocks [62, 63]: I – oceanic, II – island-arc, III – boninites.

Глиноземистость биотитов является показателем щелочности расплава, из которого они образуются. На диаграмме $Si/Al-(Mg+Fe)/Al$ [24] точки их составов (рис. 9 а) локализуются в III, IV полях, т.е. характеризуют как нормальную, так и в большей мере щелочную специфику расплава мезобиссального уровня глубинности при кристаллизации биотитов (рис. 9 а, б).

Как показали исследования современных и древних зон субдукции, подъем глубинных первичных расплавов при образовании андезитов сопровождается формированием ряда промежуточных надсубдукционных магматических камер [67-71].

Одна из гипотез формирования андезитов путем внедрения значительных объемов базальтовых расплавов в средние и верхние горизонты коры на примере Центральных Анд (вулканическая система Альтиплано-Пуна) была предложена С. де Сильвой в 1989 году [72]. Согласно этой модели, возникший магматический очаг выступал в роли термомеханического барьера, который не только блокировал подъем магмы, но и стимулировал процессы плавления, способствуя генерации больших объемов андезитов [73, 74]. Наличие такого магматического очага подтвердилось современными геофизическими исследованиями [75, 76], которые зафиксировали мощную низкоскоростную аномалию на глубинах 25-4 км, интерпретированную как магматическое тело Альтиплано-Пуна [77, 78]. На основе геохимических моделей [79] и результатов геофизических исследований [75, 76], было выдвинуто предположение о том, что поднимающиеся базальты аккумулировались на глубине 35-25 км при интенсивном взаимодействии с нижними горизонтами континентальной коры, с образованием промежуточных андезитовых магм, концентрирующихся на глубине 20–17 км [79, 80]. Этот промежуточный резервуар выступал в роли «материнского» источника для верхнекоровых камер, питающих вулканизм [81]. Данная модель существенно дополняет классические представления о формировании андезитов исключительно в нижней коре.

Также, в результате исследований расплавных включений из клинопироксенов базальтов Валенторского (Северный Урал) и Кызыл-Таштыгского (Южная Сибирь) месторождений выявили близость их физико-химических условий формирования. Моделирование процессов кристаллизации вкрапленников указывает на функционирование трех разноглубинных магматических камер для обоих объектов, параметры которых сопоставимы с характеристиками

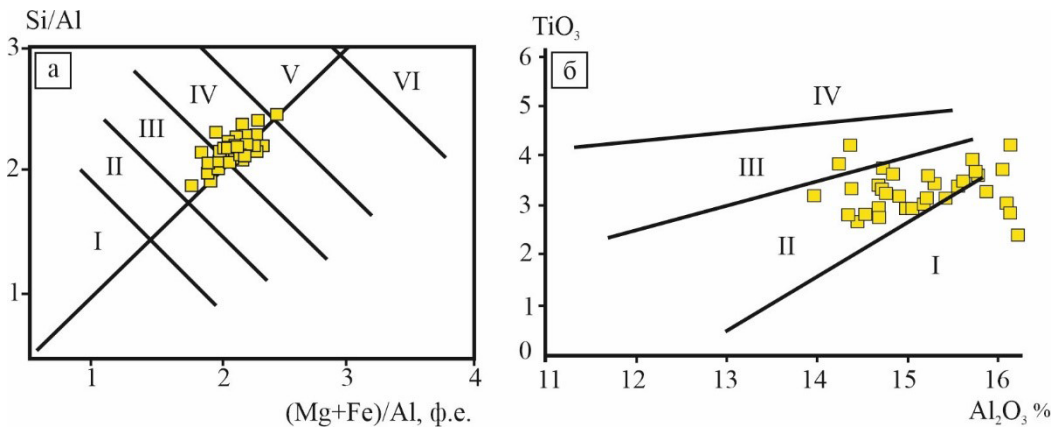


Рис. 9. Условия кристаллизации биотитов из андезитов Половинкинской впадины.

а – положение биотитов магматических пород на диаграмме щелочности-глиноземистости [24], группы щелочности: низкой (I), пониженной (II), нормальной (III), повышенной (IV-VI); Содержание TiO₂ и Al₂O₃ в биотитах магматических пород. Поля фации глубинности по [66]: I – абиссальные (10–15 до 3–5 км); II – мезобиссальные; III – гипабиссальные (3–5 до 1,5 км); IV – приповерхностные.

Fig. 9. Crystallization conditions of biotites from andesites of the Polovinkinskaya Depression.

а – position of biotites of igneous rocks on the alkalinity-alumina diagram [24], alkalinity groups: low (I), reduced (II), normal (III), high (IV-VI); Content of TiO₂ and Al₂O₃ in biotites of igneous rocks. Depth facies fields according to [66]: I – abyssal (10–15 to 3–5 km); II – mesobyssal; III – hypabyssal (3–5 to 1.5 km); IV – near-surface.

современных надсубдукционных систем. Так, для Валенторского месторождения глубины очагов составили 33–27 км, 23–13 км и 10–3 км при температурах 1185–1090 °С, для Кызыл-Таштыгского – 27–20 км, 15–6,7 км и 5–1,7 км при 1215–1105 °С. [82]. Схожие закономерности наблюдаются в эффузивах Идзу-Бонинской дуги (субдукционный магматизм), где кристаллизация пироксенов проходила в двух уровнях 20–12 км и 10–3 км [83]. Аналогичная модель кристаллизации на глубинах 27,6–14,6 км и 11,3–7,2 км установлена и для андезитов о. Сулавеси сформировавшихся из толеитовых известково-щелочных магм островодужного типа [8].

На основе выполненных расчетов, авторами выделено 4 предполагаемых уровня глубин кристаллизации породообразующих минералов из андезитов Половинкинской впадины (рис. 10 а), которые в целом, согласуются с результатами приведенных выше исследователей. Первый, отвечает кристаллизации пироксенов и плагиоклазов ранней генерации на глубине 36–24 км, при давлении 8–12 кбар, что скорее всего определяет уровень зарождения промежуточных андезитовых магм. Последующие интервалы (II) 24–12 км, (III) 12–6 км и (IV) 6–2 км (рис. 10 а), могут отражать дальнейший ход кристаллизации магмы – где формирование минералов проходило в камерах, в которых они накапливались, частично разделяясь на фракции, и на каждом таком «этапе» в зависимости от температуры (от высокотемпературных, к более низкотемпературным разностям) и состава остаточного расплава, образовывали свои индивиды, т.е. вкрапленники: плагиоклазов второй генерации, амфиболов, лейсты плагиоклаза основной массы и на заключительной стадии биотит.

Важный момент, который связывает петрологию с сейсмикой. На атрибутивном сейсмическом разрезе (профиль 3-ДВ) основной частоты локальных волновых пакетов (рис. 10) [84], выделенные нами уровни кристаллизации минералов выражены понижением основной частоты сейсмических волн до минимальных значений 14–18 Гц (рис. 10 б).

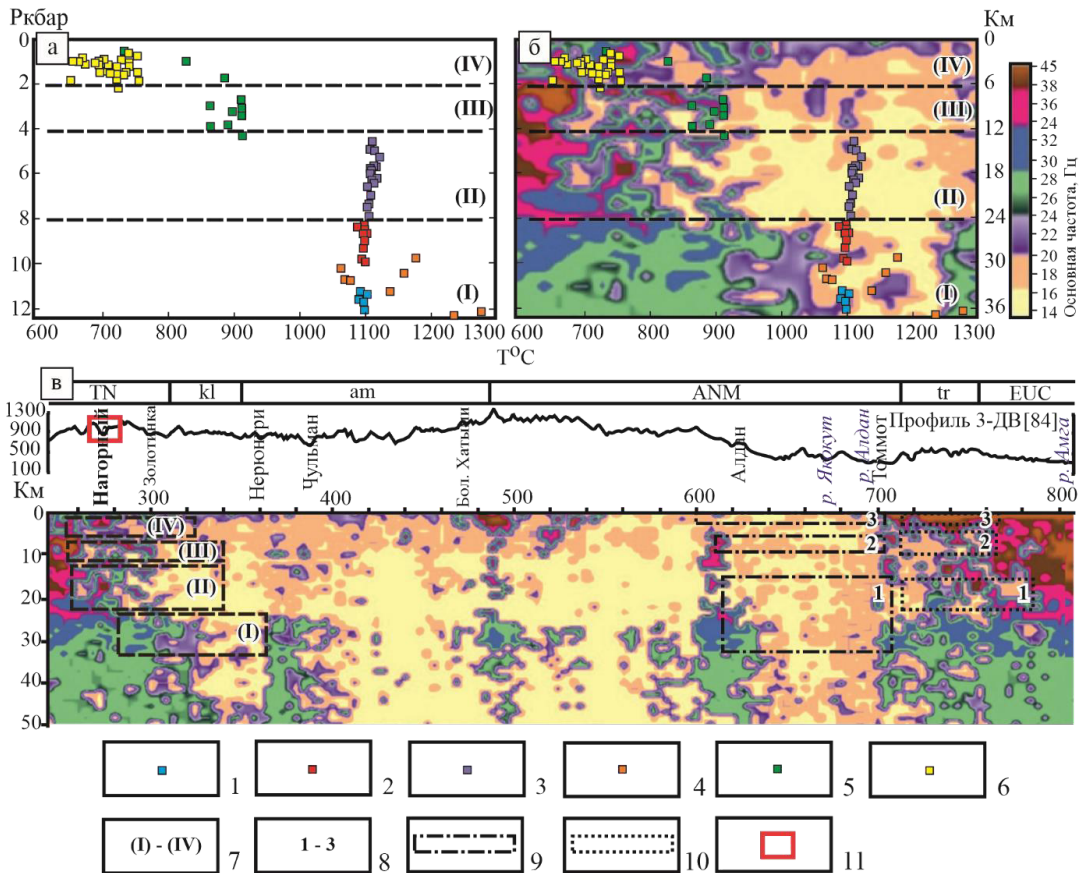


Рис. 10. Параметры кристаллизации породообразующих минералов из андезитов Половинкинской впадины. а – РТ параметры кристаллизации породообразующих минералов, вкрапленники первой генерации: 1 – олигоклаза, 2 – андезина, 3 – андезина второй генерации, 4 – пироксена, 5 – амфибола, 6 – биотита; 7 – (I), (II), (III), (IV) – предполагаемые уровни кристаллизации минералов; б – фрагмент атрибутивного сейсмического разреза основных частот локальных волновых пакетов [84]; в – профиль 3-ДВ [84]: 8 – уровни промежуточных магматических очагов 1, 2, 3 порядков: 9 – Центрально-Алданского [85], 10 – Тыркандинского [86] рудных районов; 11 – район работ. Латинские буквенные обозначения геологических структур [1], террейны: TN – Тындинский, ANM – Нимнырский, EUC – Учурский; зоны тектонического меланжа: kl – Каларская, am – Амгинская, tr – Тыркандинская.

Fig. 10. Crystallization parameters of rock-forming minerals from andesites of the Polovinkinskaya Depression. а – РТ parameters of crystallization of rock-forming minerals, first generation phenocrysts: 1 – oligoclase, 2 – andesine, 3 – second generation andesine, 4 – pyroxene, 5 – amphibole, 6 – biotite; 7 – (I), (II), (III), (IV) – inferred levels of mineral crystallization; б – fragment of attributive seismic section of main frequencies of local wave packets [84]; в – 3-DV profile [84]: 8 – levels of intermediate magmatic foci of 1st, 2nd, 3rd orders: 9 – Central Aldan [85], 10 – Tyrkandinsky [86] ore regions; 11 – work area. Latin letter designations of geological structures [1], terrains: TN – Tynda, ANM – Nimnyr, EUC – Uchur; zones of tectonic melange: kl – Kalar, am – Amga, tr – Tyrkanda.

При накоплении магмы в камере меняются физические свойства среды, в том числе плотность и скорость распространения сейсмических волн [75, 76]. Именно эти локальные минимумы частоты на разрезе скорее всего и «подсветили» места, где могли формироваться такие очаги [77, 78]. Подобные аномалии встречаются и на уровнях промежуточных магматических очагов 1, 2, 3-го порядков в интервале глубин 32-15 км, 10-6 км, 3-0 км выделенных для мезо-

зойских щелочных и субщелочных интрузий Центрально-Алданского [85] и 22–14 км, 10–4 км, 3–0 км Тыркандинского [86] рудных районов (рис. 10 в), а также на уровнях, соответствующих РТ параметрам кристаллизации ксенолитов докембрийских пород из мезозойских интрузий Центрально-Алданского рудного района [87]. Такие образом, выделенные уровни минералообразования, с выделенными предшественниками геофизическими аномалиями [84], вероятно, отражают существовавшие в мезозое промежуточные магматические камеры (рис. 10).

Типоморфные характеристики амфиболов и биотитов служат индикаторами эволюции магматического расплава и термодинамических параметров кристаллизации [88]. Установленная динамика изменения фугитивности кислорода (от амфиболов $\log fO_2 = -4,67 \dots -12,75$ к биотитам $-15,02 \dots -18,38$) и активности воды (в биотитах $\log fH_2O = 2,53 - 1,62$) свидетельствует о формировании пород в восстановительных условиях, отвечающих буферам $NNO+3$, частично НМ для амфиболов и $NiNiO$ и НМ – биотитов (Рис. 6 в, 7 в, г). Подобный флюидный режим характерен для рудоносных (продуктивных) магматических систем [88]. Что в совокупности с проведенными в целом исследованиями, позволяет предположить эпитермальную природу рассматриваемого объекта. Генезис подобных месторождений нередко связан с металлогеническими поясами и зонами надсубдукционных магматических дуг окраинно-континентальной природы, ассоциирующих с известково-щелочным андезитовым магматизмом, кристаллизация которого проходила в восстановительных условиях [89, 90].-

Заключение

Проведенные впервые исследования породообразующих минералов андезитов Половинкинской впадины позволяют сделать следующие выводы:

На основании изучения петрографического и химического составов выделены следующие группы породообразующих минералов вкрапленников: моноклинных пироксенов – авгит и диопсид, плагиоклазов – андезин и олигоклаз первой генерации, андезин второй генерации, Са-амфиболов – эденит и паргасит; микролиты андезина поздней генераций, слюда – Mg-биотит.

Выявленный рост значений давления при падении температуры, высокая фугитивность кислорода и содержание воды в расплаве при кристаллизации андезина отвечают таковым андезитов островных дуг и активных континентальных окраин.

Состав и параметры термодинамических условий кристаллизации плагиоклазов и пироксенов в целом подтверждают мнение предшественников об участии субдущированной океанической коры Монголо-Охотского бассейна в формировании материнских мезозойских магматических очагов алданского комплекса.

Выявленные интервалы (I) 36–24 км, (II) 24–12 км, (III) 12–6 км и (IV) 6–2 км зависимости Р–Т условий кристаллизации породообразующих минералов от глубины, вероятно, отражают существовавшие в мезозое промежуточные магматические камеры.

Типоморфные характеристики амфиболов и биотитов, а также геологические предпосылки, в целом, являются благоприятными факторами обнаружения в пределах Половинкинской впадины продуктивных золоторудных систем эпитермального типа.

Литература

1. Парфенов Л.М., Кузмина М.И. *Тектоника, геодинамика и металлогения территории Республики Саха (Якутия)*. Москва, МАИК «Наука/Интерпериодика». 2001:571.
2. Кадик А.А., Максимов А.П., Иванов Б.В. *Физико-химические условия кристаллизации и генезис андезитов (на примере Ключевской группы вулканов)*. Москва, Наука. 1986:157.
3. Wood B.J., Turner S.P. Origin of primitive high-Mg andesite: Constraints from natural examples and experiments. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;283:59–66. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.032>.
4. Mitchell A.L., Grove T.L. Erratum to: Melting the hydrous, subarc mantle: the origin of primitive andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015;170:50. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1161-4>.

5. Straub S. M., Gómez, -Tuena A., Stuart F. M., Zellmer G. F., Espinasa-Perena R., Cai Y., et al. Formation of hybrid arc andesites beneath thick continental crust. *Earth Planet Sci. Lett.* 2011;303:337–347. doi:10.1016/j.epsl.2011.01.013.
6. Eichelberger, J.C. Andesitic volcanism and crustal evolution. *Nature.* 1978;275: 21–27. doi:10.1038/275021a0.
7. Hildreth W., and Moorbath S. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1988;98:455–489. doi:10.1007/bf00372365.
8. Дмитриева Н.В., Сафонова И.Ю., Симонов В.А., Котляров А.В., Карманов Н.С., Низаметдинов И.Р. Условия формирования андезитов острова Сулавеси (Индонезия). *Литосфера.* 2023;23(3):386–409. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-386-409>.
9. Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In Heinrich D. Holland and Karl K. Turekian (ed) *Treatise on Geochemistry.* Elsevier Science Publishing Company. 2003:593–659.
10. Reubi O., Blundy J. A dearth of intermediate melts at subduction zone volcanoes and the petrogenesis of arc andesites. *Nature.* 2009;461:1269–1273. <https://doi.org/10.1038/nature08510>.
11. Парфенов Л.М., Берзин Н.А., Ханчук А.И. Модель формирования орогенных поясов центральной и северо-восточной Азии. *Тихоокеанская геология.* 2003; 22(6):7–41.
12. Ханчук А.И. *Геодинамика, магматизм и металлогения Востока России.* Владивосток, Дальнаука. 2006:981.
13. Максимов Е.П., Уютов В.И., Никитин В.М. Центральнo-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия). *Тихоокеанская геология.* 2010; 29(2):3–26.
14. Полин В.Ф., Ханчук А.И., Мицук В.В., Сандимиров И.В., Игнатъев А.В., Веливецкая Т.А. Источники мезозойского полиформационного магматизма Кеткарско-Юнской магматической провинции Алдана: изотопные данные. *Доклады Академии наук.* 2013; 448(2):181–187.
15. Хомич В.Г., Борискина Н.Г. Природа позднемезозойских рудномагматических систем Алданского щита. *Литосфера.* 2016;(2):70–90.
16. Соловьев С.Г. *Металлогения шпононитового магматизма.* М.: Науч. Мир. 2014;2:472.
17. Ярмолюк В.В., Никифоров А.В., Козловский А.М., Кудряшов Е.А. Позднемезозойская магматическая провинция востока Азии: строение, магматизм и условия формирования. *Геотектоника.* 2014;(4):60–77. <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019360-77>
18. Перчук Л.Л. *Термодинамический режим глубинного петрогенеза.* Москва, Наука. 1973:318.
19. Ползунов Г.О. Оценка P-T и fO₂ условий кристаллизации монцититоидов Велиткенского гранит-мигматитового массива (арктическая Чукотка) по данным минеральной термобаро- и оксидометрии. *Тихоокеанская геология.* 2018;37(5):97–111. <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-5-97-111>.
20. Wang X., Hou T., Wang M., Zhang C., Zhang Z., Pan R., Marxer F., Zhang H. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems. *European Journal of Mineralogy.* 2021;33:621–637. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-621-2021>.
21. Архангельская В.В. Типоморфизм щелочных амфиболов различных рудоносных пород. *Новые данные о типоморфизме минералов.* 1980:225–227.
22. Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., Stowell, H.H., Sisson, V.B. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist.* 1987;72(3–4):231–239.
23. Коренбаум С.А. *Типоморфизм слюд магматических пород.* Москва, Наука. 1987:144.
24. Маркушев А.А., Татарин И.А. О минералогических критериях щелочности гранитоидов. *Изв. АН СССР. Сер. Геол.* 1965;3:20–37.
25. Wones D.R., Eugster H.P. Stability of biotite: experiment, theory and application. *American Mineralogist.* 1965;50(9):1228–1272.
26. Gündüz M., Asan K. MagMin_PT: An Excel-based mineral classification and geothermobarometry program for magmatic rocks. *Mineralogical Magazine.* 2023;87:1–9. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.113>.
27. Yavuz F. PYROX: A computer program for the IMA pyroxene classification and calculation scheme. *Computers & Geosciences.* 2001;27:97–107. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00059-5).
28. Ariskin A.A., Barmina G.S. COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrological applications. *Geochemistry International.* 2004;42:1–157.

29. Putirka K.D. Thermometers and Barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2008;69:61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>.
30. Bertrand P., Mercier J.-C.C. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system. *Earth and Planetary Science Letters*. 1985;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).
31. Nimis P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic to acid, tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1999;135:62–74. <https://doi.org/10.1007/s004100050498>.
32. Ridolfi F. Amp-TB2: An updated model for calcic amphibole thermobarometry. *Minerals*. 2021;11(3):324. <https://doi.org/10.3390/min11030324>.
33. Luhr J.F., Carmichael I.S.E., Varekamp, J.C. The 1982 eruptions of El Chichón volcano, Chiapas, Mexico: mineralogy and petrology of the anhydrite-bearing pumices. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1984;23(1–2):69–108. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90057-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90057-X).
34. Uchida E., Endo S., Makino M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits. *Resource Geology*. 2007;57(1):47–56. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2006.00004.x>.
35. Henry D.J., Guidotti C.V., Thomson J.A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *American Mineralogist*. 2005;90(2–3):316–328. <https://doi.org/10.2138/am.2005.1498>.
36. Молчанов А.В., Терехов А.В., Шатов В.В., Петров О.В., Кукушкин К.А., Козлов Д.С., Шатова Н.В. Золоторудные районы и узлы Алдано-Становой металлогенической провинции. *Региональная геология и металлогения*. 2017;71:93–111.
37. Котов А.Б. Граничные условия геодинамических моделей формирования континентальной коры Алданского щита. Автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора геолого-минералогических наук. Санкт-Петербург. 2003:79.
38. Максимов Е.П., Угрюмов А.Н. Геологическое строение центральной части Алданского щита. *Геология и петрология докембрия Алданского щита*. 1966:51–58.
39. Дзевановский Ю.К., МIRONЮК Е.П., Лагздина Г.Ю. История геологического развития Алданского щита. *Тектоника Сибири. Том 3. Тектоника Сибирской платформы*. 1970:132–141.
40. Кицул В.И., Богомолова Л.М., Дук В.Л. Отражение тектонической структуры фундамента Алданского щита в метаморфических и минеральных фациях. *Метаморфизм горных пород Урала*. 1979:41–46.
41. Радьков А.В., Молчанов А.В., Беленко Е.В., Козлов Д.С. *Государственная геологическая карта Российской Федерации. Масштаб 1:1 000 000 (третье поколение). Серия Алдано-Забайкальская. Лист О-52 – Томмот. Объяснительная записка*. Санкт-Петербург, СПб картфабрики ВСЕГЕИ. 2016:280.
42. Иванов А.И., Лоскутов Е.Е., Журавлев А.И., Иванов М.С., Кравченко А.А. Петрографический и петрогеохимический составы мезозойских (?) магматических пород Половинкинской впадины (Алдано-Становой щит). *Вестник СВФУ. Серия «Науки о Земле»*. 2024;№ 4:11–32. DOI: 10.25587/2587-8751-2024-4-11-32.
43. Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. *Introduction to the Rock forming Minerals*. London, Longman. 1992:506. <https://doi.org/10.1180/DHZ>.
44. Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., Ginzburg I.V., Ross M., Seifert F.A., Zussman J., Aoki K., Gottardi G. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*. 1988;73:1123–1133. <https://doi.org/10.1007/BF01226262>.
45. Leake B.E. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*. 1997;35(1):219–246.
46. Yavuz F. A revised program for microprobe-derived amphibole analyses using the IMA rules. *Computer & Geosciences*. 1999;25(8):909–927. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(99\)00055-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(99)00055-2).
47. Tischendorf G., Gottesmann B., Förster H.-J., Trumbull R.B. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineralogical Magazine*. 1997;61:809–834. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.409.05>.
48. Волюнец О.Н., Колосков А.В. *Плагноклазы четвертичных эффузивов и малоглубинных интрузивов Камчатки*. Москва, Наука. 1976:135.

49. Бакуменко И.Т. Исследование стекловатых и раскристаллизованных включений в магматических минералах. *Проблемы петрологии и генетической минералогии, т. II*. 1970:259-272.
50. Гриб Е.Н. *Бюллетень вулканологических станций АН СССР*. 1974;50.
51. Селянгин О.Б., *Бюллетень вулканологических станций АН СССР*. 1975;51.
52. Котляров А.В., Дмитриева Н.В., Симонов В.А. Сафонова И.Ю., Карманов Н.С. Условия кристаллизации плагиоклазов в эффузивных комплексах острова Сулавеси, Тихий океан. *Минералогия*. 2023;9(1)60-78. <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-1-4>
53. Johannes W., Holtz, F. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Berlin, Springer, 1996:335. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61049-3>
54. Deer W.A., Howie R. A., Zussman J. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. – 3rd ed. – *Mineralogical Society of Great Britain and Ireland*. London; 2013:498.
55. Best M. G. *Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd edition*. New York, John Wiley & Sons. 2003:729.
56. Winter J.D. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd edition*. Harlow, Pearson Education Limited. 2010:745.
57. Gill J.B. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin, Springer. 1981:390. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-68012-0>
58. Tatsumi Y. The Subduction Factory: How It Operates in the Evolving Earth. *GSA Today*. 2005;15(7):4–10. [http://doi.org/10.1130/1052-5173\(2005\)015\[4:TSFHIO\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/1052-5173(2005)015[4:TSFHIO]2.0.CO;2).
59. Carmichael I.S.E. The redox states of basic and silicic magmas: a reflection of their source regions? *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1991;106(2):129–141. <http://doi.org/10.1007/BF00306429>.
60. Frost B.R., Ballhaus C. Constraints on the origin of the oxidation state of mantle overlying subduction zones: an experimental study. *Journal of Geophysical Research*. 1998;103(B2):2677–2692.
61. Leterrier J., Maury R.C., Thonon P., Girard D., Marchal M. Clinopyroxene Composition as a Method of Identification of the Magmatic Affinities of Paleo-Volcanic Series. *Earth and Planetary Science Letters*. 1982;59:139-154. [http://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90122-4](http://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4).
62. Frenzel G., Muhe R., Stoffers P. Petrology of the volcanic rocks from the Lau basin, Southwest Pacific. *Geologisches Jahrbuch Reihe D*. 1990;D92:395–479.
63. Куренков С.А., Диденко А.Н., Симонов В.А. *Геодинамика палеоспрединга*. Москва, ГЕОС. 2002:249.
64. Великославинский С.Д., Котов А.Б., Сальникова Е.Б., Глебовицкий В.А., Ковач В.П., Загорная Н.Ю., Беляевский Н.А., Яковлева С.З., Федосеенко А.М. U-Pb-возраст Федоровской толщи Алданского гранулит-гнейсового мегакомплекса (Алданский щит). Докл. РАН. 2003;393(1):91–96.
65. Максимов Е.П., Уютов В.И., Никитин В.М. Центральнo-Алданская золото-урановорудная магматогенная система (Алдано-Становой щит, Россия). Тихоокеанская геология. 2010;29(2):3-26.
66. Бородин Н.С., Ферштатер Г.Б. *Петрология магматических гранитоидов (на примере Урала)*. Москва, Наука. 1975:288.
67. Кулаков И.Ю., Кукарина Е.В., Гордеев Е.И., Чебров В.Н., Верниковский В. А. Магматические источники в мантийном клине под вулканами Ключевской группы и Кизимен (Камчатка) по данным сейсмической томографии. *Геология и геофизика*. 2016;57. № 1:109–124.
68. Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Кулаков Р.Ю., Карманов Н.С. Физикохимические параметры кристаллизации расплавов в промежуточных надсубдукционных камерах (на примере вулканов Толбачинский и Ичинский, Камчатка). *Геология и геофизика*. 2016;57. № 7:1265–1291.
69. Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Кулаков И.Ю., Котляров А.В. Проблемы фильтрации флюидов и расплавов в зонах субдукции и общие вопросы теплофизического моделирования в геологии. *Геология и геофизика*. 2017;58. № 5:701–722.
70. Симонов В.А., Котляров А.В., Сафонова И.Ю. Геодинамика магматических систем в древних зонах субдукции. *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2017;15:246–248.
71. Симонов В.А., Котляров А.В., Ступаков С.И. Условия формирования бонинитов в палеоостроводужных комплексах Горного Алтая *Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту)*. Иркутск: Институт земной коры СО РАН. 2016;14:265–267.
72. de Silva S.L. Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology*. 1989;17:1102–1106. doi:10.1130/0091-7613(1989)017.

73. de Silva S.L., and Gosnold W.D. Episodic construction of batholiths: Insights from the spatiotemporal development of an ignimbrite flare-up. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 2007;167:320–335. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.07.015.
74. de Silva S.L., and Gregg P.M. Thermomechanical feedbacks in magmatic systems: Implications for growth, longevity, and evolution of large caldera-forming magma reservoirs and their supereruptions. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 2014;282:77–91. doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.06.001.
75. Ward K.M., Zandt G., Beck S.L., Christensen D.H., and McFarlin H. Seismic imaging of the magmatic underpinnings beneath the Altiplano-Puna volcanic complex from the joint inversion of surface wave dispersion and receiver functions. *Earth Planet S. C. Lett.* 2014;404:43–53. doi:10.1016/j.epsl.2014.07.022.
76. Ward K.M., Delph J.R., Zandt G., Beck S.L., and Ducea M.N. Magmatic evolution of a Cordilleran flare-up and its role in the creation of silicic crust. *Sci. Rep-uk* 7. 2017:9047. doi:10.1038/s41598-017-09015-5.
77. Chmielowski J., Zandt G., and Haberland C. The central andean altiplanopuna magma body. *Geophys Res. Lett.* 1999;26:783–786. doi:10.1029/1999gl900078.
78. Zandt G., Leidig M., Chmielowski J., Baumont D., and Yuan X. Seismic detection and characterization of the altiplano-puna magma body, central Andes. *Pure Appl. Geophys.* 2003;160:789–807. doi:10.1007/pl00012557.
79. Burns D.H. and de Silva S.L. Andesites and evolution of the continental crust: Perspectives from the Central Volcanic Zone of the Andes. *Front. Earth Sci.* 2023;10:961130. doi: 10.3389/feart.2022.961130.
80. Burns D.H., de Silva S.L., Tepley F.T., Schmitt A.K., and Loewen M.L. Recording the transition from flare-up to steady-state arc magmatism at the PuricoChascon volcanic complex, northern Chile. *Earth Planet Sci. Lett.* 2015;422:75–86. doi:10.1016/j.epsl.2015.04.002.
81. de Silva S.L., Zandt G., Trumbull R., Viramonte J.G., Salas G., and Jiménez N. “Large ignimbrite eruptions and volcano-tectonic depressions in the central Andes: A thermomechanical perspective,”. *Editors C. Troise, G. De Natale, and C. R. J. Kilburn (London: Geological Society)*. Mech. Activity Unrest A. T. Large Calderas. 2006;269:47–63.
82. Симонов, В.А., Масленников В.В. Физико-химические условия кристаллизации минералов-вкрапленников в базальтовых комплексах, вмещающих колчеданные месторождения Урала и Сибири. *Минералогия.* 2020;6.№ 4: 82-102. Doi 10.35597/2313-545X-2020-6-4-6.
83. Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Буслов М.М., Котляров А.В. Магматизм и геодинамика Палеоазиатского океана на венд-кембрийском этапе его развития. *Геология и геофизика.* 2005;46.№ 9:962–967.
84. Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal’nikov A.S. The recent structure and the assumed history of formation of the crust in the south-eastern segment of the North Asian craton along Reference Profile 3-DV. *Geodynamics & Tectonophysics.* 2014;5(3):785–798. doi:10.5800/GT-2014-5-3-0155.
85. Абрамов В.А. Глубинное строение Центрально-Алданского района. *Владивосток: Дальнаука.* 1995:180.
86. Иванов А.И., Кравченко А.А., Зайцев А.И., Лоскутов Е.Е., Журавлев А.И., Прокопьев И.Р. Особенности химического состава темноцветных минералов Желтулинского массива как отражение условий его формирования и глубинного строения (Южная Якутия). *Природные ресурсы Арктики и Субарктики.* 2017;22(4):17–21.
87. Kravchenko A.A., Smelov A.P., Popov N.V., Zaitsev A.I., Beryozkin V.I., Dobretsov V.N. First data on the composition and age of the lower crust of the central part of the Aldan-Stanovoy Shield: results of study of xenoliths from Mesozoic plutons. *Craton Formation and Destruction with special emphasis on BRICS cratons University of Johannesburg, South Africa. Workshop Abstract Volume.* 2012:62–63.
88. Foerster H.J. Halogen fugacities (HF, HCl) in melts and fluids. *A survey of published data. Zeitschrift für geologische Wissenschaften.* 1990;18(3):255-266.
89. Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. *Economic Geology.* 2003:315-343.
90. Simmons S.F., White N.C., John D.A. Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. *Economic Geology.* 2005:485–522.

References

1. Parfenov L.M., Kuzmina M.I. *Tectonics, geodynamics and metallogeny of the territory of the Republic of Sakha (Yakutia)*. Moscow: Nauka/Interperiodika; 2001:571 (in Russian).
2. Kadik A.A., Maksimov A.P., Ivanov B.V. *Physicochemical conditions of crystallization and genesis of andesites (using the Klyuchevskaya group of volcanoes as an example)*. Moscow: Nauka; 1986:157 (in Russian).
3. Wood B.J., Turner S.P. Origin of primitive high-Mg andesite: Constraints from natural examples and experiments. *Earth and Planetary Science Letters*. 2009;283:59–66. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2009.03.032>
4. Mitchell A.L., Grove T.L. Erratum to: Melting the hydrous, subarc mantle: the origin of primitive andesites. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 2015;170:50. <https://doi.org/10.1007/s00410-015-1161-4>
5. Straub S. M., Gómez, -Tuena A., Stuart F. M., et al. Formation of hybrid arc andesites beneath thick continental crust. *Earth Planet Sci. Lett.* 2011;303:337–347. doi:10.1016/j.epsl.2011.01.013.
6. Eichelberger, J.C. Andesitic volcanism and crustal evolution. *Nature*. 1978;275: 21–27. doi:10.1038/275021a0.
7. Hildreth W., Moorbath S. Crustal contributions to arc magmatism in the Andes of Central Chile. *Contrib. Mineral. Petrol.* 1988;98:455–489. doi:10.1007/bf00372365.
8. Dmitrieva N.V., Safonova I.Yu., Simonov V.A., et al. Conditions for the formation of andesites on the island of Sulawesi (Indonesia). *Lithosphere*. 2023;23(3):386–409 (in Russian). <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-3-386-409>.
9. Kelemen P.B., Hanghøj K., Greene A.R. One view of the geochemistry of subduction-related magmatic arcs, with an emphasis on primitive andesite and lower crust. In Heinrich D. Holland and Karl K. Turekian (ed) *Treatise on Geochemistry*. 2003:593–659.
10. Reubi O., Blundy J. A dearth of intermediate melts at subduction zone volcanoes and the petrogenesis of arc andesites. *Nature*. 2009;461:1269–1273. <https://doi.org/10.1038/nature08510>.
11. Parfenov L.M., Berzin N.A., Khanchuk A.I. Model of the formation of orogenic belts in Central and Northeast Asia. *Pacific Geology*. 2003; 22(6):7–41 (in Russian).
12. Khanchuk A.I. *Geodynamics, magmatism and metallogeny of the Russian East*. Vladivostok: Dalnauka; 2006:981 (in Russian).
13. Maksimov E.P., Uyutov V.I., Nikitin V.M. Central Aldan gold-uranium magmatic system (Aldan-Stanovoy shield, Russia). *Pacific Geology*. 2010; 29(2):3–26 (in Russian).
14. Polin V.F., Khanchuk A.I., Mitsuk V.V., et al. Sources of Mesozoic multifunctional magmatism in the Ketkap-Yun igneous province of Aldana: isotope data. *Reports of the Academy of Sciences*. 2013;448(2):181–187 (in Russian).
15. Khomich V.G., Boriskina N.G. The nature of the Late Mesozoic ore-magmatic systems of the Aldan Shield. *Lithosphere*. 2016;(2):70–90 (in Russian).
16. Soloviev S.G. Metallogeny of Shoshonitic magmatism. *Moscow: Scientific World*. 2014;2:472 (in Russian).
17. Yarmolyuk V.V., Nikiforov A.V., Kozlovsky A.M., Kudryashov E.A. Late Mesozoic igneous province of eastern Asia: structure, magmatism and formation conditions. *Geotectonics*. 2014;(4):60–77 (in Russian). <https://doi.org/10.31857/S0016-853X2019360-77>.
18. Perchuk L.L. *Thermodynamic regime of deep petrogenesis*. Moscow: Nauka; 1973:318 (in Russian).
19. Polzunenkov G.O. Estimation of P-T and fO₂ conditions of crystallization of monzonitoids of the Velitkenay granite-migmatite massif (Arctic Chukotka) based on mineral thermobar- and oxybarometry data. *Russian Journal of Pacific Geology*. 2018;37(5):97–111 (in Russian). <https://doi.org/10.30911/0207-4028-2018-37-5-97-111>.
20. Wang X., Hou T., Wang M., et al. A new clinopyroxene thermobarometer for mafic to intermediate magmatic systems. *European Journal of Mineralogy*. 2021;33:621–637. <https://doi.org/10.5194/ejm-33-621-2021>.
21. Arkhangelskaya V.V. Typomorphism of alkaline amphiboles from various ore-bearing rocks. *New data on mineral typomorphism*. 1980:225–227 (in Russian).
22. Hollister, L.S., Grissom, G.C., Peters, E.K., et al. Confirmation of the empirical correlation of Al in hornblende with pressure of solidification of calc-alkaline plutons. *American Mineralogist*. 1987;72(3–4):231–239.

23. Korenbaum S.A. *Typomorphism of micas in igneous rocks*. Moscow: Nauka; 1987:144 (in Russian).
24. Marakushev A.A., Tatarin I.A. On mineralogical criteria for the alkalinity of granitoids. *Izvestiya USSR Academy of Sciences. Ser. Geol.* 1965;3:20–37 (in Russian).
25. Wones D.R., Eugster H.P. Stability of biotite: experiment, theory and application. *American Mineralogist*. 1965;50(9):1228–1272.
26. Gündüz M., Asan K. MagMin_PT: An Excel-based mineral classification and geothermobarometry program for magmatic rocks. *Mineralogical Magazine*. 2023;87:1–9. <https://doi.org/10.1180/mgm.2022.113>
27. Yavuz F. PYROX: A computer program for the IMA pyroxene classification and calculation scheme. *Computers & Geosciences*. 2001;27:97–107. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(00\)00059-5](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(00)00059-5)
28. Ariskin A.A., Barmina G.S. COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrological applications. *Geochemistry International*. 2004;42:1–157.
29. Putirka K.D. Thermometers and Barometers for volcanic systems. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry*. 2008;69:61–120. <https://doi.org/10.2138/rmg.2008.69.3>
30. Bertrand P., Mercier J.-C.C. The mutual solubility of coexisting ortho- and clinopyroxene: toward an absolute geothermometer for the natural system? *Earth and Planetary Science Letters*. 1985;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).
31. Nimis P. Clinopyroxene geobarometry of magmatic rocks. Part 2. Structural geobarometers for basic to acid, tholeiitic and mildly alkaline magmatic systems. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1999;135:62–74. <https://doi.org/10.1007/s004100050498>
32. Ridolfi F. Amp-TB2: An updated model for calcic amphibole thermobarometry. *Minerals*. 2021;11(3):324. <https://doi.org/10.3390/min11030324>
33. Luhr J.F., Carmichael I.S.E. Varekamp, J.C. The 1982 eruptions of El Chichón volcano, Chiapas, Mexico: mineralogy and petrology of the anhydrite-bearing pumices. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 1984;23(1–2):69–108. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(84\)90057-X](https://doi.org/10.1016/0377-0273(84)90057-X)
34. Uchida E., Endo S., Makino M. Relationship between solidification depth of granitic rocks and formation of hydrothermal ore deposits. *Resource Geology*. 2007;57(1):47–56. <https://doi.org/10.1111/j.1751-3928.2006.00004.x>
35. Henry D.J., Guidotti C.V., Thomson J.A. The Ti-saturation surface for low-to-medium pressure metapelitic biotites: Implications for geothermometry and Ti-substitution mechanisms. *American Mineralogist*. 2005;90(2–3):316–328. <https://doi.org/10.2138/am.2005.1498>.
36. Molchanov A.V., Terekhov A.V., Shatov V.V., et al. Gold ore districts and nodes of the Aldan-Stanovoy metallogenic province. *Regional Geology and Metallogeny*. 2017;71:93–111 (in Russian).
37. Kotov A.B. Boundary conditions of geodynamic models for the formation of the Aldan Shield continental crust. Abstract of a dissertation for the degree of Doctor of Geological and Mineralogical Sciences. St. Petersburg. 2003:79 (in Russian).
38. Maksimov E.P., Ugryumov A.N. Geological structure of the central part of the Aldan Shield. *Precambrian Geology and Petrology of the Aldan Shield*. 1966:51–58 (in Russian).
39. Dzevanovsky Yu.K., Mironyuk E.P., Lagzdina G.Yu. History of the geological development of the Aldan Shield. *Tectonics of Siberia. Volume 3. Tectonics of the Siberian Platform*. 1970:132–141 (in Russian).
40. Kitsul V.I., Bogomolova L.M., Duk V.L. Reflection of the tectonic structure of the Aldan Shield basement in metamorphic and mineral facies. *Metamorphism of Ural Rocks*. 1979:41–46 (in Russian).
41. Radkov A.V., Molchanov A.V., Belenko E.V., Kozlov D.S. *State Geological Map of the Russian Federation. Scale 1:1,000,000 (third generation). Aldan-Transbaikalian Series. Sheet O-52 – Tommot. Explanatory Note*. St. Petersburg, St. Petersburg Map Factory VSEGEI. 2016:280 (in Russian).
42. Ivanov A.I., Loskutov E.E., Zhuravlev A.I., et al. Petrographic and petrogeochemical compositions of Mesozoic (?) igneous rocks of the Polovinkinskaya depression (Aldan-Stanovoy shield). *Vestnik of NEFU. Earth Sciences*. 2024;4:11–32 (in Russian). doi: 10.25587/2587-8751-2024-4-11-32.
43. Deer W. A., Howie R. A., Zussman J. *Introduction to the Rock-forming Minerals*. London, Longman. 1992:506. <https://doi.org/10.1180/DHZ>
44. Morimoto N., Fabries J., Ferguson A.K., et al. Nomenclature of pyroxenes. *American Mineralogist*. 1988;73:1123–1133. <https://doi.org/10.1007/BF01226262>
45. Leake B.E. Nomenclature of amphiboles: report of the subcommittee on amphiboles of the international mineralogical association, commission on new minerals and mineral names. *The Canadian Mineralogist*. 1997;35(1):219–246.

46. Yavuz F. A revised program for microprobe-derived amphibole analyses using the IMA rules. *Computer & Geosciences*. 1999;25(8):909–927. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(99\)00055-2](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(99)00055-2)
47. Tischendorf G., Gottesmann B., Förster H.-J., Trumbull R.B. On Li-bearing micas: estimating Li from electron microprobe analyses and an improved diagram for graphical representation. *Mineralogical Magazine*. 1997;61:809–834. <https://doi.org/10.1180/minmag.1997.061.409.05>
48. Volynets O. N., Koloskov A. V. *Plagioclases of Quaternary effusives and shallow intrusions of Kamchatka*. Moscow: Nauka; 1976:135 (in Russian).
49. Bakumenko I. T. Study of glassy and decrystallized inclusions in igneous minerals. *Problems of Petrology and Genetic Mineralogy, Vol. II*. 1970:259–272 (in Russian).
50. Grib E. N. *Bulletin of Volcanological Stations of the USSR Academy of Sciences*. 1974;50 (in Russian).
51. Selyangin O. B. *Bulletin of Volcanological Stations of the USSR Academy of Sciences*. 1975;51. (in Russian).
52. Kotlyarov A.V., Dmitrieva N.V., Simonov V.A., et al. Crystallization conditions of plagioclases in effusive complexes of Sulawesi Island, Pacific Ocean. *Mineralogy*. 2023;9(1)60–78 (in Russian). <https://doi.org/10.35597/2313-545X-2023-9-1-4>.
53. Johannes W., Holtz, F. *Petrogenesis and Experimental Petrology of Granitic Rocks*. Berlin, Springer, 1996:335. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-61049-3>
54. Deer W.A., Howie R.A., Zussman J. *An Introduction to the Rock-Forming Minerals*. 3rd ed. London: Mineralogical Society of Great Britain and Ireland; 2013:498.
55. Best M. G. *Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd edition*. New York, John Wiley & Sons. 2003:729.
56. Winter J.D. *Principles of Igneous and Metamorphic Petrology. 2nd edition*. Harlow, Pearson Education Limited, 2010:745.
57. Gill J.B. *Orogenic Andesites and Plate Tectonics*. Berlin, Springer. 1981:390. <http://doi.org/10.1007/978-3-642-68012-0>
58. Tatsumi Y. The Subduction Factory: How It Operates in the Evolving Earth. *GSA Today*. 2005;15(7)4–10. [http://doi.org/10.1130/1052-5173\(2005\)015\[4:TSFHIO\]2.0.CO;2](http://doi.org/10.1130/1052-5173(2005)015[4:TSFHIO]2.0.CO;2)
59. Carmichael I.S.E. The redox states of basic and silicic magmas: a reflection of their source regions? *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 1991;106(2)129–141. <http://doi.org/10.1007/BF00306429>
60. Frost B.R., Ballhaus C. Constraints on the origin of the oxidation state of mantle overlying subduction zones: an experimental study. *Journal of Geophysical Research*. 1998;103(B2)2677–2692.
61. Leterrier J., Maury R.C., Thonon P., et al. Clinopyroxene Composition as a Method of Identification of the Magmatic Affinities of Paleo-Volcanic Series. *Earth and Planetary Science Letters*. 1982;59:139–154. [http://doi.org/10.1016/0012-821X\(82\)90122-4](http://doi.org/10.1016/0012-821X(82)90122-4).
62. Frenzel G., Muhe R., Stoffers P. Petrology of the volcanic rocks from the Lau basin, Southwest Pacific. *Geologisches Jahrbuch Reihe D*. 1990;D92:395–479.
63. Kurenkov S.A., Didenko A.N., Simonov V.A. *Geodynamics of paleospreading*. Moscow: GEOS; 2002:249 (in Russian).
64. Velikoslavinsky S.D., Kotov A.B., Salnikova E.B., et al. U-Pb age of the Fedorovskaya sequence of the Aldan granulite-gneiss megacomplex (Aldan shield). *Doklady Earth Sciences*. 2003;393(1):91–96 (in Russian).
65. Maksimov E.P., Uyutov V.I., Nikitin V.M. Central Aldan gold-uranium ore magmatic system (Aldan-Stanovoy Shield, Russia). *Russian Journal of Pacific Geology*. 2010;29(2):3–26 (in Russian).
66. Borodina N.S., Fershtater G.B. *Petrology of igneous granitoids (using the Urals as an example)*. Moscow: Nauka; 1975:288 (in Russian).
67. Kulakov I.Yu., Kukarina E.V., Gordeev E.I., et al. Magmatic sources in the mantle wedge beneath the Klyuchevskoy and Kizimen volcanoes (Kamchatka) based on seismic tomography data. *Geology and Geophysics*. 2016;(57)1:109–124 (in Russian).
68. Dobretsov N.L., Simonov V.A., Kotlyarov A.V., et al. Physicochemical parameters of melt crystallization in intermediate suprasubduction chambers (using the Tolbachik and Ichinsky volcanoes, Kamchatka as an example). *Geology and Geophysics*. 2016;57, No. 7:1265–1291 (in Russian).
69. Dobretsov N.L., Simonov V.A., Kulakov I.Yu., Kotlyarov A.V. Problems of fluid and melt filtration in subduction zones and general issues of thermophysical modeling in geology. *Geology and Geophysics*. 2017;(58)5:701–722 (in Russian).

70. Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Safonova I.Yu. Geodynamics of magmatic systems in ancient subduction zones. *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent)*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2017;15:246–248 (in Russian).
71. Simonov V.A., Kotlyarov A.V., Stupakov S.I. Conditions of boninite formation in paleoisland-arc complexes of the Altai Mountains. *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from ocean to continent)*. Irkutsk: Institute of the Earth's Crust SB RAS. 2016;14:265–267 (in Russian).
72. de Silva S.L. Altiplano-Puna volcanic complex of the central Andes. *Geology*. 1989;17:1102–1106. doi:10.1130/0091-7613(1989)017.
73. de Silva S.L., Gosnold W.D. Episodic construction of batholiths: Insights from the spatiotemporal development of an ignimbrite flare-up. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 2007;167:320–335. doi:10.1016/j.jvolgeores.2007.07.015.
74. de Silva S.L., Gregg P.M. Thermomechanical feedbacks in magmatic systems: Implications for growth, longevity, and evolution of large caldera-forming magma reservoirs and their supereruptions. *J. Volcanol. Geoth. Res.* 2014;282:77–91. doi:10.1016/j.jvolgeores.2014.06.001.
75. Ward K.M., Zandt G., Beck S.L., et al. Seismic imaging of the magmatic underpinnings beneath the Altiplano-Puna volcanic complex from the joint inversion of surface wave dispersion and receiver functions. *Earth Planet S. C. Lett.* 2014;404:43–53. doi:10.1016/j.epsl.2014.07.022.
76. Ward K.M., Delph J.R., Zandt G., et al. Magmatic evolution of a Cordilleran flare-up and its role in the creation of silicic crust. *Sci. Rep-uk* 7. 2017:9047. doi:10.1038/s41598-017-09015-5.
77. Chmielowski J., Zandt G., Haberland C. The central andean altiplanopuna magma body. *Geophys. Res. Lett.* 1999;26:783–786. doi:10.1029/1999gl900078.
78. Zandt G., Leidig M., Chmielowski J., et al. Seismic detection and characterization of the altiplano-puna magma body, central Andes. *Pure Appl. Geophys.* 2003;160:789–807. doi:10.1007/pl00012557.
79. Burns D.H., de Silva S.L. Andesites and evolution of the continental crust: Perspectives from the Central Volcanic Zone of the Andes. *Front. Earth Sci.* 2023;10:961130. doi:10.3389/feart.2022.961130.
80. Burns D.H., de Silva S.L., Tepley F.T., Schmitt A.K., Loewen M.L. Recording the transition from flare-up to steady-state arc magmatism at the PuricoChascon volcanic complex, northern Chile. *Earth Planet Sci. Lett.* 2015;422:75–86. doi:10.1016/j.epsl.2015.04.002.
81. de Silva S.L., Zandt G., Trumbull R., et al. “Large ignimbrite eruptions and volcano-tectonic depressions in the central Andes: A thermomechanical perspective,”. In: C. Troise, G. De Natale, and C. R. J. Kilburn (eds). (London: Geological Society). *Mech. Activity Unrest A. T. Large Calderas*. 2006;269:47–63.
82. Simonov, V.A., Maslennikov V.V. Physicochemical conditions of crystallization of phenocryst minerals in basalt complexes hosting massive sulfide deposits of the Urals and Siberia. *Mineralogy*. 2020;6(4):82–102 (in Russian). Doi 10.35597/2313-545X-2020-6-4-6.
83. Dobretsov N.L., Simonov V.A., Buslov M.M., Kotlyarov A.V. Magmatism and geodynamics of the Paleoasian Ocean at the Vendian-Cambrian stage of its development. *Geology and Geophysics*. 2005;46(9):962–967 (in Russian).
84. Goshko E.Yu., Efimov A.S., Sal'nikov A.S. The recent structure and the assumed history of crust formation in the southeastern segment of the North Asian craton along Reference Profile 3-DV. *Geodynamics & Tectonophysics*. 2014;5(3):785–798 (in Russian). doi:10.5800/GT-2014-5-3-0155.
85. Abramov, V.A. Deep structure of the Central Aldan region. *Vladivostok: Dal'nauka*. 1995:180 (in Russian).
86. Ivanov A.I., Kravchenko A.A., Zaitsev A.I., et al. Chemical composition of dark-colored minerals in the Dzheltulinsky massif as a reflection of its formation conditions and deep structure (Southern Yakutia). *Natural resources of the Arctic and Subarctic*. 2017;22(4):17–21 (in Russian).
87. Kravchenko A.A., Smelov A.P., Popov N.V., et al. First data on the composition and age of the lower crust of the central part of the Aldan-Stanovoy Shield: results of study of xenoliths from Mesozoic plutons. *Craton Formation and Destruction with special emphasis on BRICS cratons University of Johannesburg, South Africa*. Workshop Abstract Volume. 2012:62–63.
88. Foerster H.J. Halogen fugacities (HF, HCl) in melts and fluids. *A survey of published data. Zeitschrift für geologische Wissenschaften*. 1990;18(3):255–266.
89. Sillitoe R.H., Hedenquist J.W. Linkages between Volcanotectonic Settings, Ore-Fluid Compositions, and Epithermal Precious Metal Deposits. *Economic Geology*. 2003:315–343.
90. Simmons S.F., White N.C., John D.A. Geological Characteristics of Epithermal Precious and Base Metal Deposits. *Economic Geology*. 2005:485–522.

Сведения об авторах

ИВАНОВ Алексей Иванович – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, ResearcherID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, SPIN: 7715-0867, e-mail: leps_2002@mail.ru

ИВАНОВ Мичил Спартакович – младший научный сотрудник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus Author ID: 57212410522, SPIN: 6254-7142, e-mail: ivanov.michil@bk.ru

ЖУРАВЛЕВ Анатолий Иванович – ведущий инженер, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, SPIN: 1793-5956, e-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

ЛОСКУТОВ Евгений Евгеньевич – кандидат геолого-минералогических наук, старший научный сотрудник, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370, e-mail: loskutov@diamond.ysn.ru

About the authors

Alexey I. IVANOV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5485-3127>, Researcher ID: JBR-7954-2023, Scopus Author ID: 57674640500, SPIN: 7715-0867. E-mail: leps_2002@mail.ru

Michil S. IVANOV – junior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0204-1653>, ResearcherID: AAL-7447-2021, Scopus Author ID: 57212410522, SPIN: 6254-7142. E-mail: ivanov.michil@bk.ru

Anatolii I. ZHURAVLEV – leading engineer, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0115-5146>, ResearcherID: AAC-6095-2019, Scopus Author ID: 57200217371, SPIN: 1793-5956. E-mail: ai.zhuravlevgeo@gmail.com

Evgeniy E. LOSKUTOV – Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), senior researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russian Federation, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-7491-1067>, ResearcherID: AAO-4823-2021, Scopus Author ID: 57205150102, SPIN: 3030-3370. E-mail: loskutov@diamond.ysn.ru

Вклад авторов

Иванов А.И. – разработка концепции, методология, верификация и анализ литературных и архивных данных по лабораторно-аналитическим исследованиям, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта;

Иванов М.С. – разработка концепции, методология, верификация и анализ литературных и архивных данных по лабораторно-аналитическим исследованиям, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта;

Журавлев А.И. – разработка концепции, методология, верификация и анализ литературных и архивных данных по лабораторно-аналитическим исследованиям, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта;

Лоскутов Е.Е. – разработка концепции, методология, верификация и анализ литературных и архивных данных по лабораторно-аналитическим исследованиям, проведение исследования, администрирование данных, создание черновика рукописи, редактирование рукописи, визуализация, руководство исследованием, администрирование проекта.

Authors' contributions

Alexey I. Ivanov – concept development, methodology, verification and analysis of literary and archival data on laboratory analytical studies, conducting research, data administration, creating a draft manuscript, editing the manuscript, visualization, research management, project administration;

Michil S. Ivanov – concept development, methodology, verification and analysis of literary and archival data on laboratory analytical studies, conducting research, data administration, creating a draft manuscript, editing the manuscript, visualization, research management, project administration;

Anatolii I. Zhuravlev – concept development, methodology, verification and analysis of literary and archival data on laboratory analytical studies, conducting research, data administration, creating a draft manuscript, editing the manuscript, visualization, research management, project administration;

Evgeniy E. Loskutov – concept development, methodology, verification and analysis of literary and archival data on laboratory analytical studies, conducting research, data administration, creating a draft manuscript, editing the manuscript, visualization, research management, project administration.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Conflict of Interest

The authors declare no conflict of interest.

Поступила в редакцию / Submitted 14.08.2026

Поступила после рецензирования / Revised 02.09.2026

Принята к публикации / Accepted 21.09.2026