

Научная статья

УДК 550.4; 551.2.03; 551.2.21; 551.2.22; 552.11; 552.122; 552.33; 553.086

doi: 10.17223/25421379/22/2

УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ НЕФЕЛИНОВЫХ РУД КИЯ-ШАЛТЫРСКОГО МЕСТОРОЖДЕНИЯ НА ОСНОВЕ СТРУКТУРНОГО АНАЛИЗА ПОРОДООБРАЗУЮЩИХ МИНЕРАЛОВ (СЕВЕРО-ВОСТОЧНЫЙ СКЛОН КУЗНЕЦКОГО АЛАТАУ, СИБИРЬ)



Игорь Фёдорович Гертнер¹, Агабаба Асланович Мустафаев², Вера Алексеевна Крылова³, Дмитрий Николаевич Войтенко⁴

^{1, 2, 3} Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия

⁴ Технологическая компания Schlumberger, Москва, Россия

¹ labspm@ggf.tsu.ru

² alishka010593@gmail.com

³ krylova.vera1994@yandex.ru

⁴ dvoitenko@slb.com

Аннотация. Рассматриваются особенности ориентировки зерен нефелина, которые отражают особенности внедрения уртитового расплава, содержащего кумулятивный компонент кристаллов нефелина в качестве ранней фазы кристаллизации. Дополнительно изучена ориентировка интерстициального клинопироксена, который отражает позднюю стадию формирования уртитов. Отдельно рассмотрены особенности минералогического состава главных породообразующих минералов и особенности геохимического состава уртитов. Показаны особенности распределения редкоземельных элементов в кумулатах нефелина типа уртитов и их остаточных расплавов в виде пегматоидной фазы ийолитов.

Ключевые слова: щелочной магматизм, месторождение уртитов, оптические ориентировки нефелина и пироксена, РЗЭ, Кузнецкий Алатау, Центрально-Азиатский орогенический пояс

Источник финансирования: Структурный анализ нефелина выполнен за счет средств Государственного задания Министерства науки и высшего образования Российской Федерации (проект № 0721-2020-0041); анализ геохимических данных выполнен при поддержке Программы развития Томского государственного университета (Приоритет-2030, ИГ.49.2022).

Для цитирования: Гертнер И.Ф., Мустафаев А.А., Крылова В.А., Войтенко Д.Н. Условия формирования нефелиновых руд Кия-Шалтырского месторождения на основе структурного анализа породообразующих минералов (северо-восточный склон Кузнецкого Алатау, Сибирь) // Геосферные исследования. 2022. № 1. С. 33–47. doi: 10.17223/25421379/22/2

Original article

doi: 10.17223/25421379/22/2

CONDITIONS FOR THE FORMATION OF NEPHELINE ORES OF THE KIYA-SHALTYR DEPOSIT BASED ON STRUCTURE ANALYSIS OF ROCK-FORMING MINERALS (NORTH-EAST SLOPE OF THE KUZNETSK ALATAU RIDGE, SIBERIA)

Igor F. Gertner¹, Agababa A. Mustafaev², Vera A. Krylova³, Dmitry N. Voitenko⁴

^{1, 2, 3} National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia

⁴ Schlumberger Technology Company, Moscow, Russia

¹ labspm@ggf.tsu.ru

² alishka010593@gmail.com

³ krylova.vera1994@yandex.ru

⁴ dvoitenko@slb.com

Abstract. Questions of the formation of the structure of the Kiya-Shaltyr deposit of nepheline ores have been raised many times. However, there were quite a few questions about the origin of this deposit. The absolute age of the Sm-Nd method, taking into account the error, showed almost the same age of both urtites and gabbroids at the level of 405–400 Ma. From the contact of the urtite body and the gabbroids, as well as their close interaction, it is quite difficult to determine their formation. In this paper, we show the features of the orientation of nepheline grains, which reflect the features of the introduction of an urtite melt containing a cumulative component of nepheline crystals as an early phase of crystallization. Additionally, the orientations of

interstitial clinopyroxene, which reflects the late stage of urtite formation, were studied. The variety of orientations of the rock-forming minerals of the urtites of the Kiya-Shaltyr pluton can be interpreted from the perspective of several probable processes of introduction of the foidolite melt. First, the specifics of this melt suggested its porridge-like state, in which there was a sufficiently large number of early nepheline crystals, which could lead to heterogeneity of its geochemical composition. The presence of different types of nepheline and pyroxene orientations can be considered as probable combinations of laminar filling of the intrusive chamber with the subsequent complication of turbulence. The features of the mineralogical composition of the main rock-forming minerals and the features of the geochemical composition of urtites are considered separately. The distribution of rare-earth elements in nepheline cumulates of the urtite type and their residual melts in the form of the pegmatoid phase of ijolites is also shown, which allowed us to determine the lower REE content in urtites in relation to micro-ijolites, pegmatoid ijolites and nepheline syenites, which complete the formation of the Kiya-Shaltyr pluton. This point is one of the confirmations of the cumulative nature of urtites, since nepheline is not a rare earth concentrator, and higher REE concentrations in micro-ijolites and pegmatoid ijolites are due to their accumulation in the residual melt and concentrations in clinopyroxene. The presence of a negative Nb-Ta anomaly and the relative enrichment of Rb, Sr, and U indicate a probable interaction of the plume substance with the previously formed accretion complexes of the subduction zones.

Keywords: *Alkaline magmatism, urtite deposit, optical orientations of nepheline and pyroxene, REE, Kuznetsk Alatau Ridge, Central Asian orogenic belt*

Source of financing: Structural analysis of nepheline was carried out with funding of the State assignment of the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project No. 0721-2020-0041). The analysis of geochemical data was supported by the Tomsk State University Development Programme (Priority-2030, IG.49.2022).

For citation: Gertner, I.F., Mustafaev, A.A., Krylova, V.A. & Voitenko, D.N. (2022) Conditions for the formation of nepheline ores of the Kiya-Shaltyr deposit based on structure analysis of rock-forming minerals (north-east slope of the Kuznetsk Alatau ridge, Siberia). *Geosfernye issledovaniya – Geosphere Research*. 1. pp. 33–47. doi: 10.17223/25421379/22/2

Введение

Вопросы формирования структуры Кия-Шалтырского месторождения поднимались много раз. Однако возникало достаточно много вопросов о происхождении этого месторождения. Одним из первых его исследователей Б.В. Дроздовым [Дроздов, 1978, 1990] была предложена модель формирования месторождения с учетом двух разрывных структур северо-восточного и юго-западного простирания, которые предполагали комбинацию трещин сдвигового и разрывного характера. Вторым аспектом оставалась последовательность внедрения уртитов и габброидов. Более раннее внедрение уртитов Б.В. Дроздов обосновывал на основании прорыва этого тела плагиоклазовыми порфиритами. Однако наши геохимические исследования показали, что данные породы не являются ассоциирующими с реальными габброидами, а скорее представляют более позднюю эпоху магматизма [Войтенко, 2007]. Реальные оценки Sm-Nd методом с учетом ошибки показали практически одинаковый возраст как уртитов, так и габброидов на уровне 405–400 млн лет [Войтенко, 2007; Vrublevskii et al., 2014; Vrublevskii et al., 2020; Vrublevskii et al., 2021]. Контакты уртитового тела и габброидов достаточно сложные и отражают активное их взаимодействие, что подтверждает их близкое формирование (рис. 1).

Тем не менее мы склоняемся к точке зрения о более позднем внедрении уртитового расплава по отношению к телу габброидов, с которым эта интрузия контактирует. Третьим вариантом формирования

выступала гипотеза ликвации. Однако она не имела реальной основы, так как обогащение глиноземом магматических расплавов приводит к подавлению данного процесса.

Особенности структурной позиции и строения Кия-Шалтырского плутона

Главным аспектом геотектонической позиции данного объекта выступает его приуроченность к складчато-надвиговому ансамблю карбонатно-терригенных толщ раннего кембрия (устькундатская и усинская свиты). Спецификой строения данного массива выступает пространственное сочленение трех интрузивных тел, представленных уртитом, пойкилитовым и трахитоидным габбро. Первые два имеют ярко выраженное северо-западное простирание. Последнее, скорее, субмеридиональное, на основании чего считается последней фазой внедрения. Это простирание сопоставимо с ориентировкой Дедовогорского габброидного плутона, расположенного в 7 км к юго-западу.

Непосредственная позиция Кия-Шалтырского плутона приурочена к ядру антиклинальной складки, которая выступила главным препятствием для развития основного сдвигового нарушения и обеспечила изменение его траектории на криволинейную, в результате чего сформировалась полость отрыва типа pull-apart, или зона сдвига-раздвига. Собственно конфигурация основного тела уртитов как раз отвечает данному сценарию, хотя не захватывает его глубинных горизонтов.

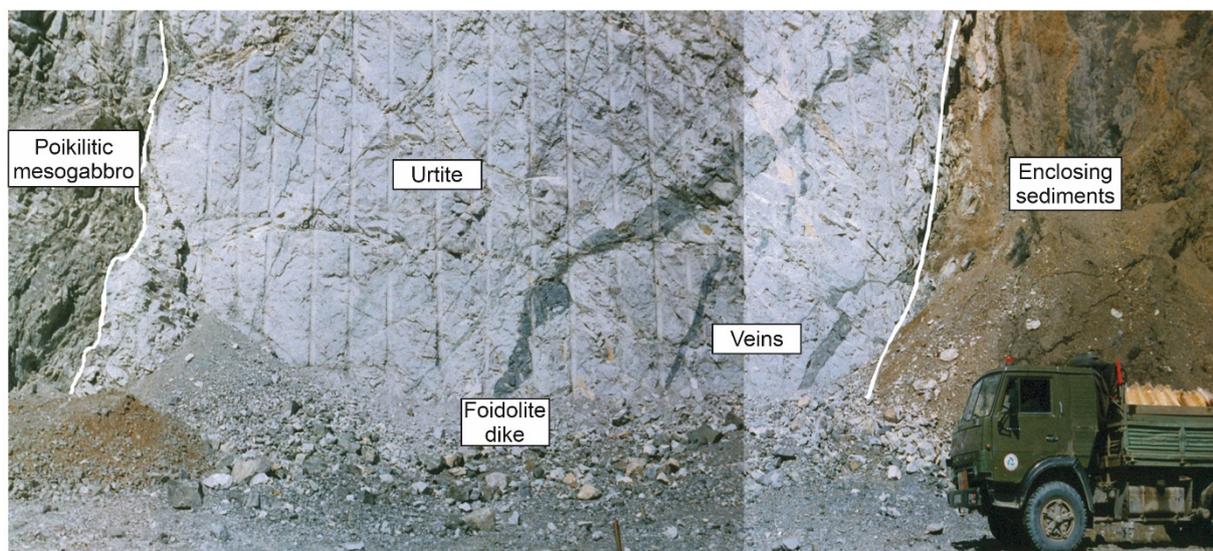


Fig. 1. Тектонические контакты Кия-Шалтырского месторождения нефелиновых руд [Войтенко, 2007]

Poikilitic mesogabbro – пойкилитовое мезогаббро, urtite – уртит, enclosing sediments – вмещающие отложения, foidolite dike – дайка фойдолитов, veins – жилы

Fig. 1. Tectonic contacts of the Kiya-Shaltyrskii nepheline ore deposit [Voitenko, 2007]

Poikilitic mesogabbro, urtite, enclosing sediments, foidolite dike, veins

В качестве подводящего наиболее крупного канала предполагался канал в юго-западной части основного уртитового тела, где в 1960-х гг. буровыми скважинами было установлено ийолитовое тело ограниченного размера и округлой формы, которое находилось на границе основного тела северо-западного и юго-восточного простирания (зоны отрыва).

Однако дополнительные исследования уже в 2000-х гг. показали, что похожий подводящий канал, вероятно, существовал и на севере основного тела и был представлен теми же ийолитами с обильными вкраплениями нефелина [Опарин и др., 2011]. В этом отношении разнообразие структурных особенностей собственно уртитов можно интерпретировать с позиций внедрения нескольких порций уртитовой магмы.

Структура Кия-Шалтырского интрузивного массива представляет собой комбинацию трех интрузивных тел, сложенных ультраосновными фойдолитами (уртитами и их дайковой разновидностью в виде пегматоидных ийолитов, микроийолитов и ийолит-порфиров с включениями полнокристаллических уртитов). Другим интрузивным телом выступает меланократовое и мезократовое габбро пойкилитовой структуры. Третьим элементом является лейкократовое трахитоидное габбро, интрузивное тело которого имеет в отличие от северо-восточного простирания более выраженную субмеридиональную ориентировку (рис. 2). Одним из аргументов более позднего формирования этой габброидной фазы выступила именно его ориентировка, которая отражала

изменение тектонической обстановки в регионе. Тем не менее подобное субмеридиональное простирание характерно и для Дедовогорского массива со сходным составом габброидов и близким геохронологическим возрастом, по данным Sm-Nd изотопам около 400 млн лет [Vrublevskii et al., 2014].

Внедрение уртитового расплава в полость сдвига вдоль консолидированной ранее интрузии пойкилитовых габброидов, с учетом вертикальной сдвиговой составляющей, скорее всего, и обеспечило реальную конфигурацию тела фойдолитов. Реальное развитие сдвигового нарушения вполне могло способствовать формированию зон отрыва внутри самого уртитового тела, которые выполняли дайки пегматоидных ийолитов в качестве остаточного расплава, а также формирование полости отрыва на юго-западном фланге массива вокруг тела габброидов.

Внедрение фазы трахитоидного габбро, скорее, отражало более поздние тектонические события, связанные с разрывными нарушениями в процессе постоянно развивающихся сдвиговых движений или с изменением тектонического режима, приведшего развитию субмеридионального рифтогенеза в виде серии грабенов.

Методика измерений

Концентрации редких и рассеянных элементов измерялись в Национальном исследовательском Томском государственном университете (Томск) методом ICP-MS (Agilent 7500, США).

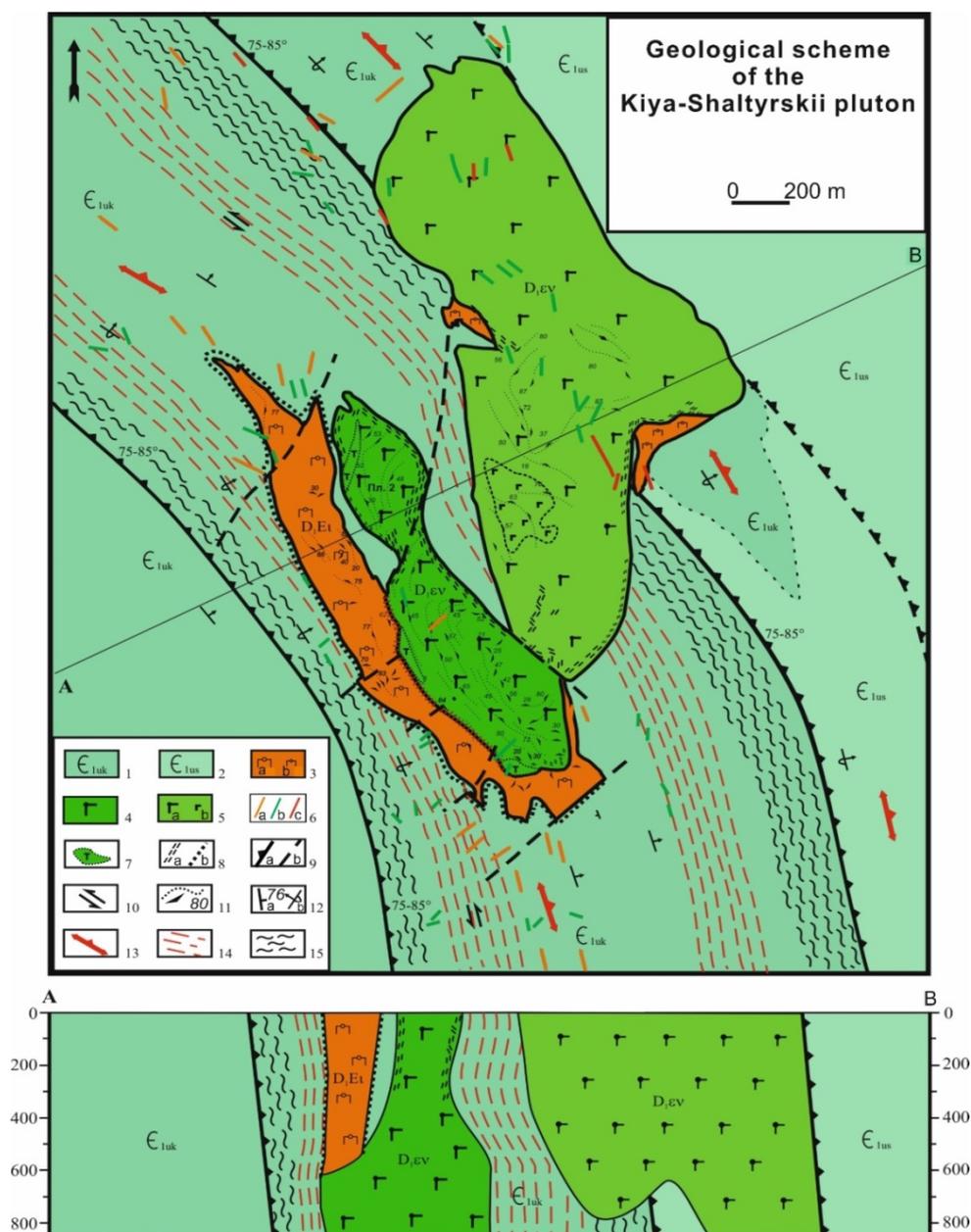


Рис. 2. Схема геологического строения Кия-Шалтырского plutона

Составлена по материалам [Мостовской, 1972; Гринева, 1990] с детализацией [Войтенко, 2007]. Условные обозначения: 1–2 – отложения нижнего кембрия: 1 – усть-кундатская свита; 2 – усинская свита; 3–7 – интрузивные образования: 3 – уртиты (а), ийолиты (б); 4 – пойкилитовое мелано- и мезогаббро; 5 – трахитоидное лейкогаббро (а), порфировидное трахитоидное лейкогаббро (б); 6 – дайковые образования (вне масштаба): фойдолиты (а), субщелочные и щелочные габброиды (б), нефелиновые и щелочные сиениты (с); 7 – тералиты; 8 – эндоконтактные пироксениты (а), ореол скарнированных пород (б); 9 – плоскости надвигов (а), плоскости второстепенных разломов (б); 10 – направление смещения в зоне пластических деформаций; 11 – элементы залегания структур анизотропии (трахитоидности, минеральной уплощенности и расслоенности); 12 – элементы: нормального (а) и опрокинутого залегания (б) слоистости нижнекембрийских отложений; 13 – залегание осевой плоскости надвиговой антиформы; 14 – зона пластических деформаций в известняках и 15 – в эффузивно-карбонатной толще

Fig. 2. Geological scheme of the Kiya-Shaltyr pluton

Compiled on the basis of materials [Mostovskoi, 1972; Grinev, 1990] with detail [Voitenko, 2007]. Legend: 1–2 – Lower Cambrian deposits: 1 – Ust-Kundat formation; 2 – Usinskaya formation; 3–7 – intrusive formations: 3 – urtites (a), ijolites (b); 4 – poikilitic melano- and mesogabbro; 5 – trachytoid leucogabbro (a), porphyritic trachytoid leucogabbro (b); 6 – dike swarm (out of scale): foidolites (a), subalkaline and alkaline gabbroids (b), nepheline and alkaline syenites (c); 7 – theralites; 8 – endocontact pyroxenites (a), halation of skarnated rocks (b); 9 – planes of thrusts (a), planes of secondary faults (b); 10 – direction of displacement in the zone of plastic deformation; 11 – elements of occurrence of structures of anisotropy (trachytoid, mineral flattening and layering); 12 – elements: normal (a) and inverted (b) bedding of the Lower Cambrian deposits; 13 – occurrence of the axial flatness of the thrust antiform; 14 – zone of plastic deformation in limestones and 15 – in effusive-carbonate strata

Для выполнения масс-спектрального анализа с индуктивно связанной плазмой образец массой 0,1 г обрабатывался 10 мл фтороводородной кислотой с 4-часовым выдерживанием в открытой системе при температуре ~ 70 °С, после чего добавлялось 2 мл концентрата азотной кислоты (HNO₃). Образцы подвергались микроволновому воздействию в закрытой системе при мощности 700 Вт с постепенным поднятием температуры до 200 °С. После этого образец выпаривался досуха, дважды обрабатывался 6,2 М HCl, затем вновь выпаривался и обрабатывался концентратом HNO₃, после чего сухой остаток переводился в 15%-й раствор HNO₃. В качестве внутреннего стандарта использовался индий. Непосредственно перед проведением ICP-MS-измерений образец разбавляли до концентрации азотной кислоты в 3 %-м растворе. Фактор разбавления составил 1 000 [Аношкина и др., 2012].

Специфика минерального и геохимического состава уртитов массива

Главным элементом состава нефелина в урритах выступает содержание кальсилитового и анортитового минералов. Для уртитов характерна повышенная концентрация кальциевого компонента, что может быть связано с взаимодействием с вмещающими карбонатными породами. Пироксен также соответствует фассаиту, что подтверждает данное мнение. Для пегматоидных и дайковых разновидностей характерно повышенное содержание калия в составе нефелина и более умеренное содержание кальция в структуре пироксена с увеличением содержания щелочей [Войтенко и др., 2004].

Особенностью геохимического состава фойдолитов Кия-Шалтырского плутона выступает разная степень накопления редкоземельных (РЗЭ) и редких элементов в конкретных разновидностях горных пород. Главным фактором спектров таких компонентов является низкое содержание РЗЭ и остальных микроэлементов в урритах по отношению к микройолитам, пегматоидным ийолитам и нефелиновым сиенитам, которые завершают формирование данного массива (рис. 3, а). Этот момент является одним из подтверждений кумулятивной природы уртитов, так как нефелин не является концентратором редких земель. Более высокие концентрации РЗЭ в микройолитах и пегматоидных ийолитах обусловлены их накоплением в остаточном расплаве и концентраций в клинопироксене.

Для габброидов наблюдаются схожие тренды распределения данных элементов (рис. 3, б), что может свидетельствовать о едином мантийном источнике в виде плюма. Данный аспект остается пока

под вопросом, так как изотопные характеристики фойдолитов и габброидов различаются [Войтенко, Гертнер, 2003; Vrublevskii et al., 2014]. Единственным отличием является более крутой наклон спектров, отражающий более выраженный характер дифференциации исходной магмы или ее активное взаимодействие с коровым материалом [Покровский и др., 1998]. Отдельным моментом следует отметить положительную европиевую аномалию, проявленную в лейкократовом габбро, что отвечает накоплению основного плагиоклаза в данном типе пород Кия-Шалтырского плутона.

Особенностью распределения всего спектра редких элементов (рис. 4) является наличие ряда отрицательных и положительных аномалий. При этом следует отметить эту же тенденцию, что и в распределении РЗЭ (рис. 3). Собственно уртиты характеризуются более низкими концентрациями относительно микройолитов и пегматоидных ийолитов (рис. 4, а). Для данного спектра характерны отрицательные аномалии Th, Nb, Ta, которые свидетельствуют о формировании данных пород в условиях островодужной обстановки (IAB). Положительная аномалия стронция, в целом, подтверждает данный вывод.

Однако спектры как фойдолитов, так и габброидов (рис. 4, б) достаточно близки к базальтам океанических островов (OIB типа), которые связаны с проявлением мантийных плюмов и крупных изверженных провинций (LIP) [Ernst, 2014; Pearce et al., 2021]. В этом отношении мы соглашаемся с мнением ряда авторов, где декларируется сложная геодинамическая обстановка проявления щелочного магматизма на северном склоне Кузнецкого Алатау [Гертнер и др., 2013; Врублевский и др., 2014; Vrublevskii et al., 2014; Врублевский, 2015; Врублевский и др., 2016; Mustafayev et al., 2017; Макаренко, Котельников, 2018; Мустафаев и Гертнер, 2020; Mustafayev et al., 2020; Vrublevskii et al., 2020; Vrublevskii et al., 2021], сходная с Калифорнийской [Cole, Stewart, 2009; van Hinsbergen et al., 2020].

Петроструктурный анализ нефелиновых пород плутона

Принимая во внимание, что уртиты, как правило, характеризуются однородными текстурами, мы попытались оценить особенности их внутренней структурной организации на основании анализа кристаллооптической ориентировки нефелина и пироксена. Данный подход является не совсем стандартным, но предусматривает развитие нового метода для обоснования петрологических моделей формирования щелочных интрузий в регионе. Одним из новых направлений выступают физические методы исследований, основанные на диагностике ориентировок минеральных зерен ме-

тодом обратно отраженных электронов на основе современных детекторов (EBSD) [La Fontaine et al., 2017]. Интерпретация диаграмм плотностей оптических осей нефелина сопряжена с определенными трудностями, что объясняется несколькими факторами.

Уплотненность породообразующих минералов в урритах, в отличие от пойкилитового или трахитоидного габбро, слабо выражена и плохо фиксируется в полевых условиях. Агпаитовая структура урритов Кия-Шалтырского плутона (рис. 5) носит пойкилитовый характер, где идиоморфные кристаллы нефелина являются хадакристаллами по отношению к кристаллам пироксена – ойкокристаллам [Войтенко, 2002]. При преобладающих размерах нефели-

на 3–5 мм, размеры пироксена достигают 15–20 мм, что достаточно сильно сокращает количество замеров в пределах одного шлифа при микроструктурном анализе. Кристаллографическая форма нефелина, как известно, может быть или укорочена вдоль оси шестого порядка, или вытянута в зависимости от условий образования, что необходимо учитывать при анализе микроструктурных диаграмм. И несмотря на широкий спектр исследований в 1970-е и 1980-е гг. по изучению влияния стресса на предпочтительную кристаллографическую ориентировку породообразующих минералов, информация о петроструктуре нефелина немногочисленна [Елисеев, 1953; Галахов, 1959; Bonczar, Barsch, 1975].

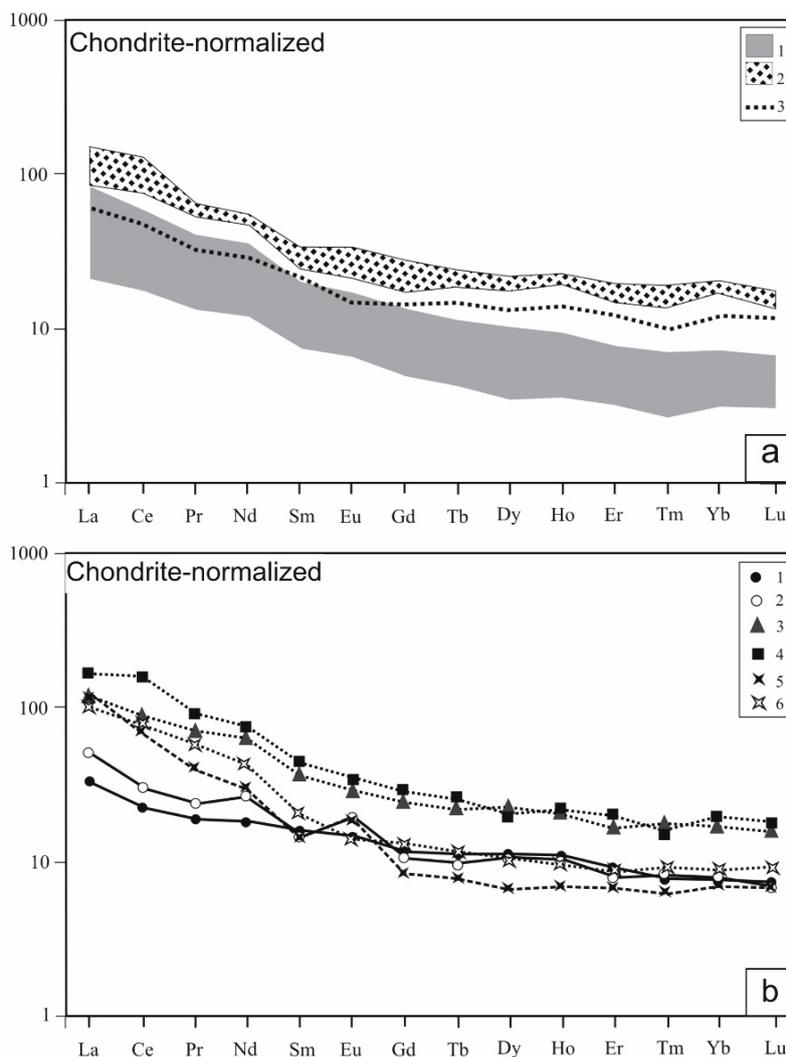


Рис. 3. Распределение редкоземельных элементов в породах Кия-Шалтырского плутона
 а – фойдолиты: 1 – урриты, 2 – микроийолиты; 3 – пегматоидные ийолиты (среднее по двум анализам); б – габбро, базальтоидные дайки и нефелиновые сиениты: 1 – пойкилитовое мелано-, мезогаббро (среднее по двум анализам), 2 – трахитоидное лейкогаббро; 3 – камптонит; 4 – трахидиабаз; 5 – нефелиновый сиенит; 6 – микросиенит. Содержания РЗЭ нормализованы по хондриту [Sun, McDonough, 1989]

Fig. 3. Distribution of rare earth elements in the rocks of the Kiya-Shaltyr pluton
 а – fooidolites: 1 – urtites, 2 – microijolites; 3 – pegmatoid ijolites (average for 2 test); б – gabbro, basaltoid dikes and nepheline syenites: 1 – poikilitic melano-, mesogabbro (average for 2 test), 2 – trachytoid leucogabbro; 3 – camptonite; 4 – trachydiabase; 5 – nepheline syenite; 6 – microsienite. REE contents are normalized to chondrite [Sun, McDonough, 1989]

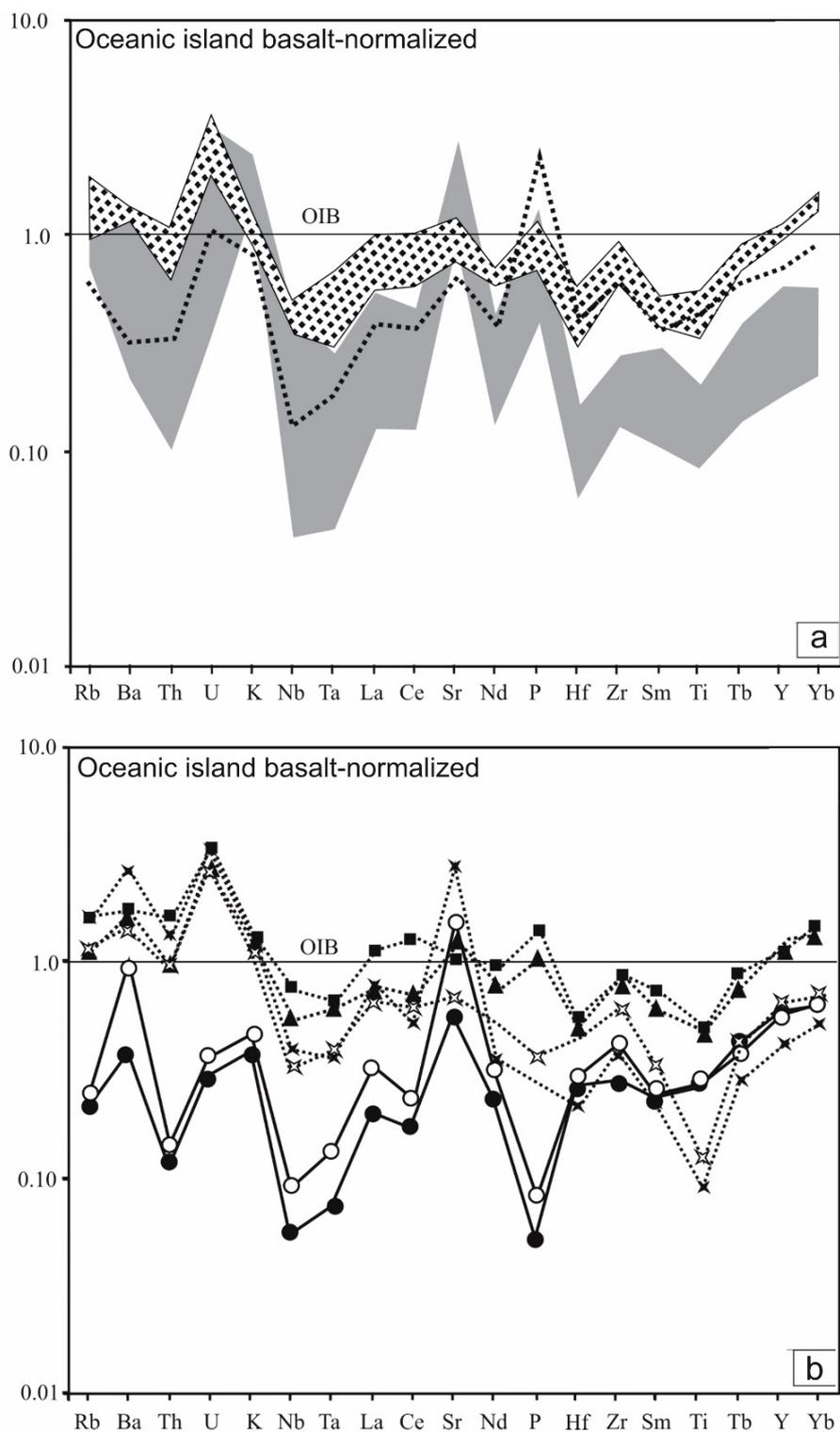


Рис. 4. Распределение редких элементов в породах Кия-Шалтырского плутона

a – фойдолиты; b – габбро, базальтоидные дайки и нефелиновые сиениты. Содержания редких элементов нормализованы на базальты океанических островов (OIB) по [Sun, McDonough, 1989]. Условные обозначения как на рис. 3

Fig. 4. Distribution of rare elements in the rocks of the Kiya-Shaltyr pluton

a – foidolites; b – gabbro, basaloid dikes and nepheline syenite. Trace element contents are normalized to oceanic island basalts (OIB) according to [Sun, McDonough, 1989]. Legend as in Figure 3

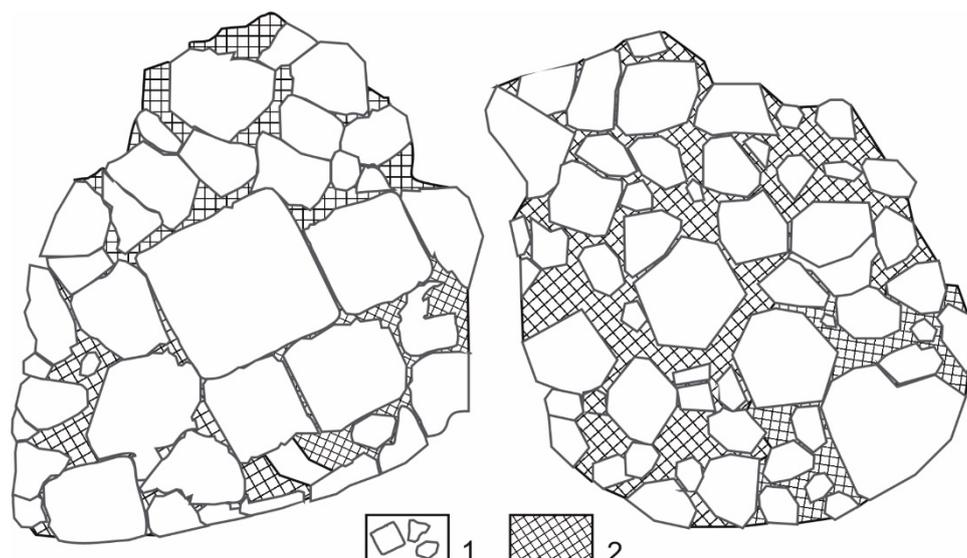


Рис. 5. Схема структуры нефелинового кумулата в уртитях Кия-Шалтырского плутона

1 – кумулятивные кристаллы нефелина (хадакрystalлы); 2 – интеркумулятивные кристаллы пироксена (ойкокрystalлы)

Fig. 5. Scheme of the structure of nepheline cumulate in urtites of the Kiya-Shaltyr pluton

1 – cumulative crystals of nepheline (hadacrystals); 2 – intercumulative pyroxene crystals (oikocrystals)

Тем не менее основные положения для проведения подобного анализа можно изложить по материалам предыдущих исследователей: скользящие движения в решетке минерала могут осуществляться по базопинакоиду и по граням призмы в направлении оптической оси. Данное утверждение хорошо иллюстрируется при изучении полос излома (kink-bands) в нефелине из локальных тектонических зон северо-восточного простирания в центральных и южных частях уртитового тела. Ширина подобных зон составляет 0,1–0,3 мм, они встречаются достаточно редко и обычно в виде одиночных полос излома, еще реже в виде групповых (до трех в пределах одного зерна). Основные смещения в нефелине происходили по грани призмы кристалла. Ориентировка оси сжатия образует острый угол с оптической осью C_v (L_6) (до 16°). Определенное направление видимого смещения достаточно условно, так как угол между плоскостями смещения и ограничения близок к 90° . Образование подобных структур в нефелине, возможно, происходило в поздние фазы деформации [Ramsay, 1962], которые связываются с блокировкой сдвиговых зон Центрального надвига в период становления и окончательного застывания уртитового тела. При этом возможна инверсия в ориентировке эллипсоида деформации по сравнению с отмеченной выше при анализе трещиноватости.

В частности, на диаграммах из южной части уртитового тела ориентировку $[001]$ возможно рас-

сматривать как направление заполнения расплавом камеры (обр. 21/5, 21/1, 23/5, 22/9). Подобная картина, только менее выраженная, отмечается и для ориентировок из центральной части уртитового тела, где более проявлено плоскостное ориентирование пироксена, нормально ориентированное к Nm, т.е. к $[010]$ (обр. GI-4, GI-3, 55/4, 55/3A, 20/4). Смешанный рисунок отмечается для ориентировок пироксенов, изученных в северной части уртитового тела, где, возможно, был ламинарный поток, который осложнялся турбулентным вариантом. Это можно отметить в ориентировках, которые изучались из приграничных зон уртитового тела.

Направление распространения расплава в разных частях камеры, включая ламинарные и турбулентные течения, могут отражать разные процессы. В качестве примера можно привести образец плагиопорфирита, где фенокристаллы плагиоклаза являются индикатором кинематики кристаллизующегося расплава в плоской камере (рис. 6).

Дайкообразная форма уртитового тела позволяет применять опыт исследователей, которые смоделировали и описали процесс заполнения расплавом плоской камеры [Базаров и др., 2002]. В этом случае поток поступающего через подводящий канал расплава в образующуюся камеру начинает перестраиваться в плоскостные и турбулентные течения. При этом вдоль границ камеры развиты плоскостные (ламинарные) течения, а в центральных и фронтальных частях уже активно преобладают явления тур-

булентности. Есть два варианта для обоснования данного эффекта внутреннего режима кристаллизации магматического расплава. Первый соответствует формированию естественных ячеек внутри камеры, который отражает ориентировку потоков разной температуры и плотности. Второй вариант может быть связан с внедрением дополнительной порции расплава из северного канала [Опарин и др., 2011].

Главным аспектом анализа оптической ориентировки нефелина остается его неоднородность, которая предполагает разные варианты кумулятивной сегрегации ранних кристаллов данного минерала [Ageeva et al., 2012].

Среди микроструктурных узоров нефелина (уртиты Кия-Шалтырского плутона) можно выделить пять основных типов. Первый из них характеризуется отчетливой линейной ориентировкой нефелина, когда его оптические оси формируют значительные по плотности максимумы на стереодиаграммах вблизи центра (т.е. вертикальная ориентировка). Подобный узор наблюдается в породах южной части уртитового тела, в зоне субвертикальной полости отрыва и предполагаемого подводящего канала (рис. 7, обр. 21/5; 23/5).

Второй тип также соответствует линейной ориентировке, но с формированием субгоризонтальных максимумов, совмещенных с плоскостью минеральной уплощенности и, по-видимому, трассирующего линейное направление течения магматического расплава в камере (рис. 7, обр. 29/20). В чистом виде этот тип проявлен исключительно в зонах эндоконтакта основной северо-западной ветви уртитового тела.

В то же время в центральной части последнего преобладает третий плоскостной тип петроструктурного узора нефелина, с резко выраженным максимумом плотности оптических осей, ориентированных субперпендикулярно к контактам уртитового тела и минеральной уплощенности (рис. 7, обр. 55/4).

Четвертый тип ориентировок обнаруживает поясовое распределение максимумов вдоль минеральной уплощенности (обр. GI-4), а пятый фиксируется поясом максимумов оптической оси минерала, ортогонально расположенным к плоскости минеральной уплощенности. Более сложные узоры наблюдаются в смешанных типах ориентировок оптической оси нефелина (обр. 31/3, 20/4).



Рис. 6. Дайка плагиопорфирита

Фенокристаллы плагиоклаза (серо-белые включения) фиксируют в крайних частях ламинарное, в центральных – турбулентное течение материала

Fig. 6. A plagioporphyrite dike

Plagioclase phenocrystals (gray-white inclusions) fix a laminar flow in the outer parts, and a turbulent flow of the material in the central parts

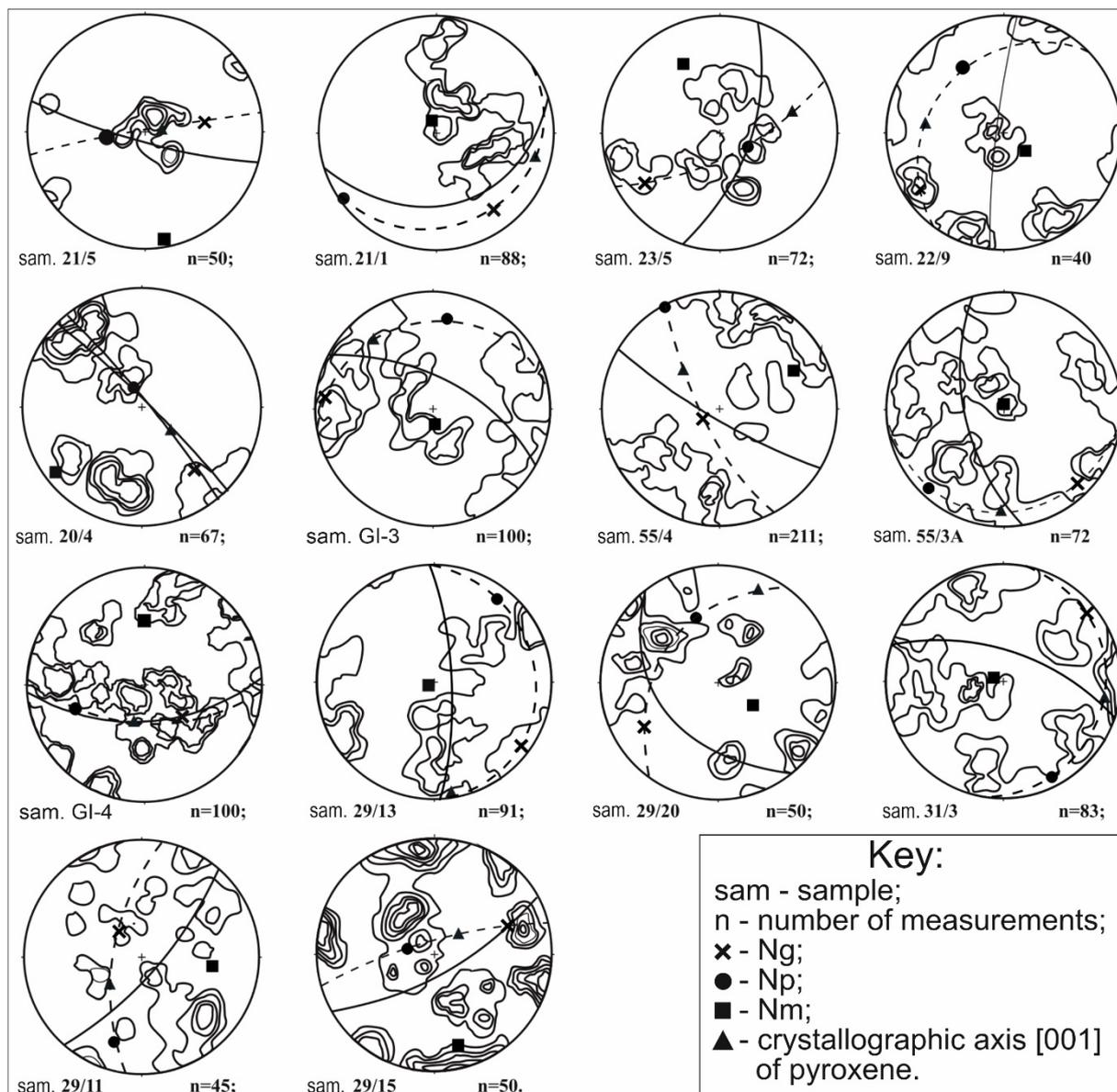


Рис. 7. Диаграммы ориентировки оптической оси нефелина в урритах Кия-Шалтырского плутона

Стереографическая сетка Вульфа, проекция с верхней полусферы, изолинии 1,0–3,0%. Сплошные дуги – плоскости минеральной уплощенности в урритах; пунктирные – плоскость оптической индикатрисы пироксена Ng-Np

Fig. 7. Diagrams of orientation of the optical axis of nepheline in urtites of the Kiya-Shaltyr pluton

Wolfe's stereographic grid, projection from the upper hemisphere, isocline's 1,0–3,0%. Solid arcs – planes of mineral flattening in urtites; dashed – the plane of the optical indicatrix of pyroxene Ng-Np

Пространственное положение основных петроструктурных узоров в урритах, возможно, указывает на то, что в общей массе нефелина присутствуют кристаллы двух морфологических типов – удлиненные и уплощенные вдоль оси шестого порядка [Войтенко, 2002; Войтенко, Гертнер, 2003]. Удлиненные характеризуют линейность в породе (1-й и 2-й типы), которая в южной части урритового тела вертикальная и отражает непосредственное внедре-

ние расплава, а в северной – субгоризонтальная. Третий тип фиксирует преобладание в породе уплощенных кристаллов нефелина, которые создают планпараллельную директивную текстуру. Их положение контролировалось в большей степени не направлением, а плоскостью ламинарного течения в магматической камере. Выявленные особенности кристаллографической ориентировки нефелина можно объяснить кумулятивной природой его зерен,

которые приспособлялись к существующим кинематическим условиям внедрения магмы.

Тенденция смены ориентировки с юга на север от субвертикальной до горизонтальной в плоскости минеральной уплощенности и более сложные узоры ориентировки в северной части позволяют сделать предположение, что заполнение камеры «кашеобразным» расплавом происходило именно в этом направлении. Учитывая, что по геофизическим и геологическим данным основной подводящий канал предполагается на юге, в точке V-образного сочленения северной и южной ветвей уртитового тела, такая модель вполне допустима [Макаренко и др., 1988]. Однако нельзя забывать вероятной роли дополнительного магматического канала в северной части уртитового тела [Опарин и др., 2011].

Наблюдаемая тенденция разворота оптической оси нефелина из плоскости уплощенности до перпендикулярного к ней положения становится понятной, если принять слабо выраженное удлинение ранних кристаллов. В этом случае, по мере удаления от подводящего канала, закономерности ориентировки кумулусной фазы, т.е. нефелина, должны быть менее отчетливыми и в большей степени контролироваться плоскостью течения, а не его линейной направленностью. Пироксен кристаллизовался уже из интеркумулусной жидкости, и, по-видимому, его ориентировка может служить индикатором условий окончательной консолидации уртитов [Войтенко, Гертнер, 2003].

Предыдущими исследователями показывался выдержанный количественно-минералогический состав уртитов [Андреева, 1968; Бозин, 1968; Мостовской, 1972; Дроздов, Чайко, 1972; Гринев, 1990; Уваров и др., 2002]. В основном это было обусловлено самой агпайтовой структурой уртитов и их достаточно однородной текстурой.

Тем не менее в последние годы появились работы, в которых рассматриваются неоднородности уртитового тела по основным петрохимическим параметрам [Сазонов и др., 2000; Вульф, 2003]. С учетом принятых структурных положений такой факт тесно связан с условиями как заполнения своеобразной по форме образования камеры, так и с необычными процессами кристаллизации уртитового расплава и указывает на слабо проявленную неоднородность количественно-минералогического состава уртитов. В первую очередь выступает ориентировка кристаллов нефелина и пироксена (рис. 7). Вторым элементом следует считать соотношение нефелина и пироксена, которое отражает определенную внутреннюю расслоенность данной интрузии. Третьим фактором можно рассматривать явление ликвационных процессов, связанных с осаждением сульфидных минералов. Данный элемент имеет место в теле уртитов и проявлен в виде серии линз сплошных халькопирит-пирротиновых руд, которые были зафиксированы в северной и южной частях основного уртитового тела (рис. 8). В них была установлена серебряно-сульфидная минерализация [Gertner et al., 2020].

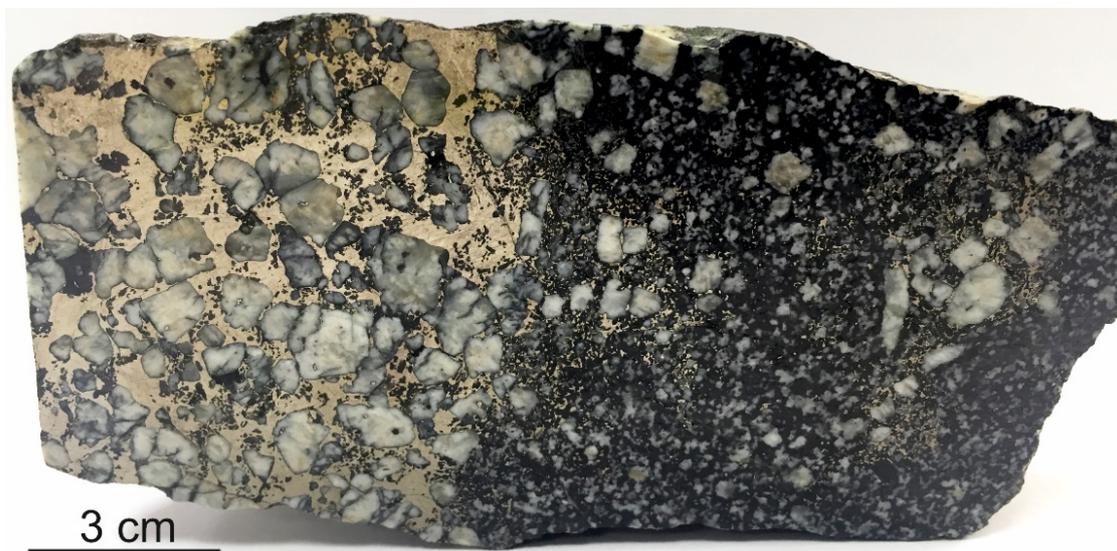


Рис. 8. Сульфидная минерализация в фойдолитах Кия-Шалтырского плутона
Контакт между уртитами и дайкой ийолит-порфира

Fig. 8. Sulfide mineralization in foidolites of the Kia-Shaltyr pluton
It is the contact between urtites and ijolite dike

Заключение

Таким образом, минералогические и геохимические особенности габброидов и фойдолитов Кия-Шалтырского плутона показывают разные характеристики, что подразумевает их разные источники вещества [Войтенко, 2007]. Вполне возможно, что это было проявлением единого мантийного плюма на рубеже девона. Специфика геохимии щелочных и субщелочных пород указывает на нестандартную геодинамическую обстановку его проявления. Скорее всего, она отвечала сложному режиму, сопоставимому с Калифорнийским вариантом.

Разнообразие ориентировок породообразующих минералов уртитов Кия-Шалтырского плутона можно интерпретировать с позиции нескольких вероятных процессов внедрения фойдолитового расплава. Во-первых, специфика данного расплава предполагала его кашеобразное состояние, в котором было

достаточно большое количество ранних кристаллов нефелина, что и могло привести к неоднородности его геохимического состава. Об этом свидетельствуют результаты исследования редкоземельных элементов.

Начальное внедрение предполагает ламинарное течение, что выражено в краевых зонах. Далее внутри самой камеры реализуются уже конвекционные процессы, обусловленные формированием отдельных ячеек, где происходит перераспределение фенокристаллов нефелина и остаточного расплава. Второй вариант предполагает смешение магмы из двух каналов, которое и привело к формированию турбулентных потоков и развитию разных типов ориентировки нефелина и пироксена. В любом случае, наличие разных типов ориентировок нефелина и пироксена можно рассматривать в качестве вероятных комбинаций ламинарного заполнения интрузивной камеры с последующим осложнением турбулентности.

Список источников

- Андреева Е.Д. Щелочной магматизм Кузнецкого Алатау. М. : Наука, 1968. 169 с.
- Аношкина Ю.В., Асочакова Е.М., Бухарова О.В., Тишин П.А. Усовершенствование схем химической пробоподготовки углеродистых пород с последующим анализом высокозарядных элементов методом масс-спектрометрии с индуктивно-связанной плазмой // Вестник Томского государственного университета. 2012. Т. 359. С. 178–181.
- Базаров Л.Ш., Гордеева В.И., Шевченко В.С., Петрушин Е.И. Экспериментальное моделирование процессов массовой кристаллизации в объеме плоской камеры // Петрология. 2002. Т. 10, № 5. С. 532–542.
- Бозин А.В. Петрология Кия-Шалтырского, Кургузуського и Горячегогорского массивов (Кузнецкий Алатау) : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Красноярск, 1968. 35 с.
- Войтенко Д.Н. Микроструктурный анализ нефелина из уртитов Кия-Шалтырского плутона (Кузнецкий Алатау) // Труды международного научного симпозиума им. академика М.А. Усова «Проблемы геологии и освоения недр». Томск : Изд-во НТЛ, 2002. С. 73.
- Войтенко Д.Н., Гертнер И.Ф. Особенности микроструктурного строения уртитов Кия-Шалтырского плутона (Кузнецкий Алатау) // Проблемы геологии и географии Сибири : материалы научн. конф. Т. 3. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2003. С. 156–158.
- Войтенко Д.Н., Селятицкий А.М., Гертнер И.Ф., Врублевский В.В. Уртиты Кия-Шалтырского массива: изменчивость химического состава породообразующих минералов как отражение структурно-петрологических условий их формирования // Петрология магматических и метаморфических комплексов : материалы Всерос. конф. Томск : Изд-во Том. гос. ун-та, 2004. Вып. 4. С. 75–85.
- Войтенко Д.Н. Петрология Кия-Шалтырского массива (Кузнецкий Алатау) : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 2007. 22 с.
- Врублевский В.В., Гертнер И.Ф., Тишин П.А., Баянова Т.Б. Возрастной диапазон циркона и источники щелочных пород Кургузуського интрузива, Кузнецкий Алатау: первые изотопные U–Pb- (SHRIMP-II) и Sm–Nd-данные // Доклады Академии наук. 2014. Т. 459, № 5. С. 601–606.
- Врублевский В.В. Источники и геодинамические условия петрогенезиса Верхнепетропавловского щелочно-базитового интрузивного массива (средний кембрий, Кузнецкий Алатау, Сибирь) // Геология и геофизика. 2015. Т. 56, № 3. С. 488–515.
- Врублевский В.В., Гринев О.М., Изох А.Э., Травин А.В. Геохимия, изотопная (Nd–Sr–O) триада и ^{40}Ar – ^{39}Ar возраст палеозойских щелочно-мафитовых интрузий Кузнецкого Алатау (на примере Белогорского плутона) // Геология и геофизика. 2016. Т. 57, № 3. С. 592–602.
- Вульф М.В. Неоднородность химического состава нефелиновой руды и золотоплатиноносность Кия-Шалтырского месторождения : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Красноярск, 2003. 17 с.
- Галахов А.В. Рискорриты Хибинского щелочного массива. М. : Наука, 1959. 170 с.
- Гертнер И.Ф., Врублевский В.В., Тишин П.А., Гутierrez-Алонсо Г., Баянова Т.Б., Серов П.С. Временные рубежи, источники магм и формационный статус палеозойских фельдшпатоидных интрузий Северо-Востока Кузнецкого Алатау // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту) : материалы конф. Иркутск, 2013. Вып. 11. С. 71–73.
- Гринев О.М. Эволюция щелочно-габброидного магматизма Кузнецкого Алатау : автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. Томск, 1990. 19 с.
- Дроздов Б.В., Чайко В.Я. Структура и генезис Кия-Шалтырского нефелинового месторождения. Фонды ФГУГП. Новокузнецк : Кузбасс, ТФГИ, 1972.
- Дроздов Б.В. К вопросу о формировании уртитов Кия-Шалтырского месторождения (Кузнецкий Алатау). Нефелиновое сырье. М. : Наука, 1978. С. 71–74.
- Дроздов Б.В. Нефелиновые интрузивные и эффузивные породы Кузнецкого Алатау // Советская геология. 1990. № 11. С. 85–96.

- Елисеев Н.А. Структурная петрология. Л. : Изд-во ЛГУ, 1953. 309 с.
- Макаренко Н.А., Осипов П.В., Гринев О.М., Номоконова Г.Г., Рихванов Л.П. Геолого-геофизические особенности рудоносных щелочно-габброидных массивов Марининской тайги и критерии контроля нефелинового оруденения. Люберцы : ВИНТИ, 1988. 180 с.
- Макаренко Н.А., Котельников А.Д. Кашпарский кембро-ордовикский габбро-диорит-кварцмонцодиорит-сиенитовый комплекс – новое петрографическое подразделение на восточном склоне Кузнецкого Алатау // Геосферные исследования. 2018. № 2. С. 52–71.
- Мостовской А.И. Условия формирования щелочных массивов и связанных с ними нефелиновых руд в Кузнецком Алатау. Нефелиновое сырье. М. : Наука, 1978. С. 66–70.
- Мустафаев А.А., Гертнер И.Ф. Изотопно-геохимический (Sm–Nd, Rb–Sr, REE, HFSE) состав Университетского фойдолит-габбрового плутона, Кузнецкий Алатау, Сибирь // Вестник Санкт-Петербургского университета. Науки о Земле. 2020. Т. 65, № 4. С. 681–701.
- Опарин И.А., Баргесян О.М., Гринев О.М. Кия-Шалтырский габбро-уртитовый массив – эталон месторождения высоко-сортных уртитовых руд и его дальнейшая судьба // Современные проблемы географии и геологии : материалы Всерос. молодежной науч. конф. с междунар. участием. Томск : Изд-во Том. ун-та, 2011. С. 225–227.
- Покровский Б.Г., Андреева Е.Д., Врублевский В.В., Гринев О.М. Природа контаминации щелочно-габброидных интрузий южного обрамления Сибирской платформы по данным изотопии стронция и кислорода // Петрология. 1998. Т. 6, № 3. С. 259–273.
- Сазонов А.М., Леонтьев С.И., Гринев О.М., Звягина Е.А., Чекушин В.С., Бетхер М.Я. Геология и золотоплатиноносность нефелиновых пород Западной Сибири. Томск : Изд-во Том. политехн. ун-та, 2000. 248 с.
- Уваров А.Н., Черных А.И., Уварова Н.М. и др. Геологическое строение и полезные ископаемые листа N-45-XI (Белогорск). Информационный отчет Едиганской партии по геологическому доизучению масштаба 1:200 000, проведенному в 2000–2002 гг. : в 3 кн. и 1 папке. Елань : ФГУ ГП Запсибгеолсъемка, 2002. 647 с.
- Ageeva O.A., Abart R., Habler G., Borutzky B.Ye., Trubkin N.V. Oriented feldspar-feldspathoid intergrowths in rocks of the Khibiny massif: genetic implications // Miner. Petrol. 2012. V. 106. P. 1–17.
- Bonczar L.J., Barsch G.R. Elastic and thermoelastic constants of nepheline // J. Appl. Physics. 1975. Vol. 46, No. 10. P. 4339–4340.
- Cole R.B., Stewart B.W. Continental margin volcanism at sites of spreading ridge subduction: Examples from southern Alaska and western California // Tectonophysics. 2009. V. 464. P. 118–136.
- Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge : Cambridge University Press, 2014. 667 p.
- Gertner I.F., Grinev O.M., Vrublevskii V.V., Sazonov A.M., Oparin I.A., Tishin P.A., Krasnova T.S., Mustafaev A.A. Plume-Related Alkaline Basic Magmatism of the Kuznetsk Alatau: The Kia-Shaltyr Complex // Geological Tour of Devonian and Ordovician Magmatism of Kuznetsk Alatau and Minusinsk Basin / ed. by R.E. Ernst, V.V. Vrublevskii, P.A. Tishin. Netherlands : Springer, 2020. P. 21–41.
- La Fontaine A., Piaolo S., Trimby P., Yang L., Cairney J.M. Laser-Assisted Atom Probe Tomography of Deformed Minerals: A Zircon Case Study // Microscopy and Microanalysis. 2017. V. 23, No. 02. P. 404–413.
- Mustafayev A.A., Gertner I.F., Serov P.A. Features of geology and composition of rocks from the alkaline-gabbroic University massif (N-E Kuznetsk Alatau ridge, Siberia) // IOP Conference «Earth and Environmental Science». 2017. V. 319. 012026.
- Mustafayev A.A., Gertner I.F., Ernst R.E., Serov P.A., Kolmakov Y.V. The Paleozoic-Aged University Foidolite-Gabbro Pluton of the Northeastern Part of the Kuznetsk Alatau Ridge, Siberia: Geochemical Characterization, Geochronology, Petrography and Geophysical Indication of Potential High-Grade Nepheline Ore // Minerals. 2020. V. 10, No. 10. 1128. DOI: 10.3390/min10121128
- Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record // Lithos. 2021. V. 392–393, No. 106068. DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106068
- Ramsay J.G. The geometry of conjugate fold systems // Geol. Mag. 1962. V. 99, No. 6. P. 516–526.
- Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // Magmatism in the ocean basins / eds. by A.D. Saunders, M.J. Norry // Geol. Soc. Special Publ. 1989. No. 42. P. 313–345.
- van Hinsbergen D.J.J., Spakman W., de Boorder H., van Dongen M., Jowitt S.M., Mason P.R.D. Arc type magmatism due to continental edge plowing through ancient subduction enriched mantle // Geophysical Research Letters. 2020. V. 47. e2020GL087484.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Tishin P.A. Isotope (U–Pb, Sm–Nd, Rb–Sr) geochronology of alkaline basic plutons of the Kuznetsk Alatau // Russian Geology and Geophysics. 2014. V. 55, No. 11. P. 1598–1614.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Mustafaev A.A. Multiple intrusion stages and mantle sources of the Paleozoic Kuznetsk Alatau alkaline province, Southern Siberia: Geochemistry and Permian U–Pb, Sm–Nd ages in the Goryachegorsk ijolite-foyaite intrusion // Int. Geol. Rev. 2020. V. 63. P. 2215–2231. DOI: 10.1080/00206814.2020.1830312
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F. Paleozoic Alkaline-Mafic Intrusions of the Kuznetsk Alatau, Their Sources and Conditions for Magma Generation // Petrology. 2021. V. 29, No. 1. P. 24–53.

References

- Andreeva E.D. *Shchelochnoy magmatizm Kuznetskogo Alatau* [Alkaline magmatism of the Kuznetsk Alatau]. Moscow: Nauka, 1968. 169 p. In Russian
- Anoshkina Yu.V., Asochakova E.M., Bukharova O.V., Tishin P.A. Improvement of chemical sample preparation chart for carbonaceous rocks and high field strength elements (HFSE) analysis by ICP-MS method // Tomsk State University Journal. 2012. V. 359. pp. 178–181. In Russian
- Bazarov L.S., Gordeeva V.I., Shevchenko V.S., Petrushin E.I. Experimental modeling of mass crystallization processes in the volume of a flat chamber // Petrology. 2002. V. 10 (5). pp. 532–542. In Russian
- Bozin A.V. *Petrologiya Kiya-Shaltyrskogo, Kurgusul'skogo i Goryachegorskogo massivov (Kuznetskiy Alatau)* [Petrology of the Kiya-Shaltyrskii, Kurgusulskii and Goryachegorskii massifs (Kuznetsk Alatau)]. Autoref. dis. ... candidate of geol.-min. sciences. Krasnoyarsk. 1968. 35 p. In Russian

- Voitenko D.N. *Mikrostrukturnyy analiz nefelina iz urtitov Kiya-Shaltyrskogo plutona (Kuznetskiy Alatau)* [Microstructural analysis of nepheline from urtites of the Kiya-Shaltyrsky pluton (Kuznetsk Alatau)] // Simp. im. Ak. M.A. Usov "Problems of geology and development of mineral resources". Tomsk: "Publishing House of NTL", 2002. p. 73. In Russian
- Voitenko D.N., Gertner I.F. *Osobennosti mikrostrukturnogo stroyeniya urtitov Kiya-Shaltyrskogo plutona (Kuznetskiy Alatau)* [Features of the microstructural structure of the urtites of the Kiya-Shaltyrsky pluton (Kuznetsk Alatau)] // Problems of Geology and Geography of Siberia: mater. nauchn. konf. V. 3. Tomsk: "Publishing House of the Tomsk State University", 2003. pp. 156–158. In Russian
- Voitenko D.N., Selyatitsky A.M., Gertner I.F., Vrublevskii V.V. *Mineralogicheskoye svidetel'stvo lateral'noy neodnorodnosti urtitov Kiya-Shaltyrskogo plutona (Kuznetskiy Alatau)* [Urtites of the Kiya-Shaltyrsky massif: variability of the chemical composition of rock-forming minerals as a reflection of the structural and petrological conditions of their formation] // Mater. All-Russian Conference "Petrology of magmatic and metamorphic complexes". Issue 4. Tomsk: "Publishing House of the Tomsk State University", 2004. pp. 75–85. In Russian
- Voitenko D.N. *Petrologiya Kiya-Shaltyrskogo massiva (Kuznetskiy Alatau)* [Petrology of the Kiya-Shaltyrsky massif (Kuznetsk Alatau)]. Autoref. dis. ... cand.geol.- mineral sciences. Tomsk. 2007. 22 p. In Russian
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Tishin P.A., Bayanova T.B. Zircon age range and sources of alkaline rocks from the Kurgusul intrusion, Kuznetsk Alatau: The first U-Pb (SHRIMP II) and Sm-Nd isotope data // *Doklady Earth Sciences*. 2014. V. 459 (2). pp. 1576–1581.
- Vrublevskii V.V. Sources and geodynamic setting of petrogenesis of the Middle Cambrian Upper Petropavlovka alkaline basic pluton (Kuznetsk Alatau, Siberia) // *Russian Geology and Geophysics*. 2015. V. 56 (3). pp. 379–401.
- Vrublevskii V.V., Grinev O.M., Izokh A.E., Travin A.V. Geochemistry, isotope triad (Nd-Sr-O), and ⁴⁰Ar–³⁹Ar age of Paleozoic alkaline mafic intrusions of the Kuznetsk Alatau (by the example of the Belaya Gora pluton) // *Russian Geology and Geophysics*. 2016. V. 57(3). pp. 464–472.
- Vul'f M.V. *Neodnorodnost' khimicheskogo sostava nefelinovoy rudy i zolotoplatinonosnost' Kiya-Shaltyrskogo mestorozhdeniya* [Heterogeneity of the chemical composition of nepheline ore and gold-platinum content of the Kiya-Shaltyrskoye deposit] Autoref. dis. ... candidate of geol.-miner. sciences. Krasnoyarsk: 2003. 17 p. In Russian
- Galakhov A.V. *Rischorrity Khibinskogo shchelochnoogo massiva* [Rischorrites of the Khibiny alkaline massif]. Moscow: Nauka, 1959, 170 p. In Russian
- Gertner I.F., Vrublevskii V.V., Tishin P.A., Gutieres-Alonso G., Bayanova T.B., Serov P.S. *Vremennyye rubezhi, istochniki magm i formatsionnyy status paleozoyiskikh fel'dshpatoidnykh intruziy Severo-Vostoka Kuznetskogo Alatau* [Time boundaries, magma sources and the formation status of Paleozoic feldspathoid intrusions in the North-East of the Kuznetsk Alatau] / Mater. Conference "Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile belt (from the ocean to the continent)". Irkutsk. 2013. Issue 11. pp. 71–73. In Russian
- Grinev O.M. *Evolutsiya shchelochno-gabbroidnogo magmatizma Kuznetskogo Alatau* [Evolution of alkaline-gabbroid magmatism of the Kuznetsk Alatau]. Autoref. dis. ... candidate of geol.-min. sciences. Tomsk: 1990. 19 p. In Russian
- Drozdov B.V. *K voprosu o formirovaniy urtitov Kiya-Shaltyrskogo mestorozhdeniya (Kuznetskiy Alatau)* [On the formation of urtites of the Kiya-Shaltyrskii deposit (Kuznetsk Alatau). Nepheline raw materials]. Moscow: Nauka, 1978, pp. 71–74. In Russian
- Drozdov B.V., Chaiko V.Ya. *Struktura i genezis Kiya-Shaltyrskogo nefelinovogo mestorozhdeniya* [Structure and genesis of the Kiya-Shaltyrskii nepheline deposit]. FSUGP funds. Novokuznetsk: "Kuzbass, TFGI", 1972. In Russian
- Drozdov B.V. *Nefelinovyye intruzivnyye i effuzivnyye porody Kuznetskogo Alatau* [Nepheline intrusive and effusive rocks of the Kuznetsk Alatau] // *Soviet. geology*. 1990. No. 11. pp. 85–96. In Russian
- Eliseev N.A. *Strukturnaya petrologiya* [Structural petrology]. Leningrad: "LSU Publishing House", 1953. 309 p. In Russian
- Makarenko N.A., Osipov P.V., Grinev O.M., Nomokonova G.G., Rikhvanov L.P. *Geologo-geofizicheskiye osobennosti rudonosnykh shchelochno-gabbroidnykh massivov Mariinskoy taygi i kriterii kontrolya nefelinovogo orudneniya* [Geological and geophysical features of ore-bearing alkaline-gabbroid massifs of the Mariinsky taiga and criteria for monitoring nepheline mineralization]. Lyubertsy: "VINITI", 1988. 180 p. In Russian
- Makarenko N.A., Kotelnikov A.D. Kashparsky Kembro-Ordovician gabbro-diorite-quartz-monzodiorite-syenite complex – a new petrographic subdivision on the eastern slope of the Kuznetsk Alatau // *Geosphere Research*. 2018. No. 2. pp. 52–71. In Russian
- Mostovskoi A.I. *Usloviya formirovaniya shchelochnykh massivov i svyazannykh s nimi nefelinovykh rud v kuznetskom Alatau* [Conditions for the formation of alkaline massifs and associated nepheline ores in the Kuznetsk Alatau. Nepheline raw materials]. Moscow: Nauka, 1978. pp. 66–70. In Russian
- Mustafaev A.A., Gertner I.F. Isotope-geochemical (Sm–Nd, Rb–Sr, REE, HFSE) composition of the University foidolite-gabbro pluton, Kuznetsk Alatau, Siberia // *Vestn. St. Petersburg Univer. Earth Sci.* 2020. V. 65 (4). pp. 681–701. In Russian
- Oparin I.A., Bargesyan O.M., Grinev O.M. *Kiya-Shaltyrskiy gabbro-urtitovyy massiv – etalon mestorozhdeniya vysokosortnykh urtitovykh rud i ego dal'neyshaya sud'ba* [Kiya-Shaltyrskii gabbro-urtite massif-etalon deposit of high-grade urtite ores and its further fate] // Mater. Vseros. youth scientific conference with internat. with the participation of "Modern problems of geography and geology". Tomsk: "Publishing House of the Tomsk State University", 2011. pp. 225–227. In Russian
- Pokrovsky B.G., Andreeva E.D., Vrublevskii V.V., Grinev O.M. Contamination mechanisms of alkaline-gabbroid intrusions in the southern framing of the Siberian platform: evidence from strontium and oxygen isotopic compositions // *Petrology*. 1998. V. 6 (3). pp. 237–251.
- Sazonov A.M., Leontiev S.I., Grinev O.M., Zvyagina E.A., Chekushin V.S., Bether M.Ya. *Geologiya i zolotoplatinonosnost' nefelinovykh porod Zapadnoy Sibiri* [Geology and gold-platinum bearing of nepheline rocks of Western Siberia]. Tomsk: "Publishing House of Tomsk Polytechnic University", 2000. 248 p. In Russian
- Uvarov A.N., Chernykh A.I., Uvarova N.M. et al. *Geologicheskoye stroyeniye i poleznyye iskopayemyye lista N-45-XI (Belogorsk). Informatsionnyy otchet Ediganskoy partii po geologicheskomu doizucheniyu masshtaba 1:200 000, provedennomu v 2000–2002 gg. (v 3–kh knigakh i 1 papke)* [Geological structure and minerals of sheet N-45-XI (Belogorsk). Information report of the Edigan party on the geological survey of the scale of 1:200 000, conducted in 2000–2002 (in 3 books and 1 folder)]. Elan: "FSU GP Zapsibgeolsemka", 2002. 647 p. In Russian
- Ageeva O.A., Abart R., Habler G., Borutzky B.Ye., Trubkin N.V. Oriented feldspar-feldspathoid intergrowths in rocks of the Khibiny massif: genetic implications // *Miner. Petrol.* 2012. V. 106. pp. 1–17.

- Bonczar L.J., Barsch G.R. Elastic and thermoelastic constants of nepheline // *J. Appl. Physics*. 1975. V. 46. No. 10. pp. 4339–4340.
- Cole R.B., Stewart B.W. Continental margin volcanism at sites of spreading ridge subduction: Examples from southern Alaska and western California // *Tectonophysics*. 2009. V. 464. pp. 118–136.
- Ernst R.E. Large Igneous Provinces. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2014. 667 p.
- Gertner I.F., Grinev O.M., Vrublevskii V.V., Sazonov A.M., Oparin I.A., Tishin P.A., Krasnova T.S., Mustafaev A.A. Plume-Related Alkaline Basic Magmatism of the Kuznetsk Alatau: The Kia-Shaltyr Complex. Geological Tour of Devonian and Ordovician Magmatism of Kuznetsk Alatau and Minusinsk Basin // Editors: R.E. Ernst, V.V. Vrublevskii, P.A. Tishin. Netherlands: Springer, 2020. pp. 21–41.
- La Fontaine A., Piazzolo S., Trimby P., Yang L., Cairney J.M. Laser-Assisted Atom Probe Tomography of Deformed Minerals: A Zircon Case Study // *Microscopy and Microanalysis*. 2017. V. 23 (02). pp. 404–413.
- Mustafayev A.A., Gertner I.F., Serov P.A. Features of geology and composition of rocks from the alkaline-gabbroic University massif (N-E Kuznetsk Alatau ridge, Siberia) // IOP Conference «Earth and Environmental Science», 2017. V. 319. 012026.
- Mustafaev A.A., Gertner I.F., Ernst R.E., Serov P.A., Kolmakov Y.V. The Paleozoic-Aged University Foidolite-Gabbro Pluton of the Northeastern Part of the Kuznetsk Alatau Ridge, Siberia: Geochemical Characterization, Geochronology, Petrography and Geophysical Indication of Potential High-Grade Nepheline Ore // *Minerals*. 2020. V. 10 (10). 1128. DOI: 10.3390/min10121128
- Pearce J.A., Ernst R.E., Peate D.W., Rogers C. LIP printing: Use of immobile element proxies to characterize Large Igneous Provinces in the geologic record // *Lithos*. 2021. V. 392–393 (106068). DOI: 10.1016/j.lithos.2021.106068
- Ramsay J.G. The geometry of conjugate fold systems // *Geol. Mag.* 1962. V. 99 (6). pp. 516–526.
- Sun S., McDonough W.F. Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes // *Magmatism in the ocean basins* / Eds. A.D. Saunders, M.J. Norry // *Geol. Soc. Special Publ.* 1989. No 42. pp. 313–345.
- Van Hinsbergen D.J.J., Spakman W., de Boorder H., van Dongen M., Jowitt S.M., Mason P.R.D. Arc type magmatism due to continental edge plowing through ancient subduction enriched mantle // *Geophysical Research Letters*. 2020. V. 47. e2020GL087484.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Tishin P.A. Isotope (U–Pb, Sm–Nd, Rb–Sr) geochronology of alkaline basic plutons of the Kuznetsk Alatau // *Russian Geology and Geophysics*. 2014. V. 55 (11). pp. 1598–1614.
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F., Gutiérrez-Alonso G., Hofmann M., Grinev O.M., Mustafaev A.A. Multiple intrusion stages and mantle sources of the Paleozoic Kuznetsk Alatau alkaline province, Southern Siberia: Geochemistry and Permian U–Pb, Sm–Nd ages in the Goryachegorsk ijolite-foyaite intrusion // *Int. Geol. Rev.* 2020. V. 63. pp. 2215–2231. DOI: 10.1080/00206814.2020.1830312
- Vrublevskii V.V., Gertner I.F. Paleozoic Alkaline-Mafic Intrusions of the Kuznetsk Alatau, Their Sources and Conditions for Magma Generation // *Petrology*. 2021. V. 29 (1). pp. 24–53.

Информация об авторах:

Гертнер И.Ф., кандидат геолого-минералогических наук, доцент, кафедра петрографии, заведующий лабораторией структурной петрологии и минерации, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: labspm@ggf.tsu.ru

Мустафаев А.А., младший научный сотрудник лабораторий: структурной петрологии и минерации, геохронологии и геодинамики, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: alishka010593@gmail.com

Крылова В.А., инженер-исследователь, лаборатория структурной петрологии и минерации; ассистент, кафедра петрографии; младший научный сотрудник, лаборатория геохронологии и геодинамики, геолого-географический факультет, Национальный исследовательский Томский государственный университет, Томск, Россия.

E-mail: krylova.vera1994@yandex.ru

Войтенко Д.Н., кандидат геолого-минералогических наук, руководитель технологической службы, Технологическая компания «Шлюмберже», Москва, Россия.

E-mail: dvoitenko@slb.com

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Information about the authors:

Gertner I.F., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Associate Professor of the Department of Petrography, Head of the Laboratory of Structural Petrology and Mineralogy, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: labspm@ggf.tsu.ru

Mustafaev A.A., Junior Researcher of Laboratories: Structural Petrology and Mineralogy, Geochronology and Geodynamics, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: alishka010593@gmail.com

Krylova V.A., Research Engineer, Laboratory of Structural Petrology and Mineralogy, Assistant of the Department of Petrography, Junior Researcher, Laboratory of Geochronology and Geodynamics, Faculty of Geology and Geography, National Research Tomsk State University, Tomsk, Russia.

E-mail: krylova.vera1994@yandex.ru

Voitenko D.N., Cand. Sci. (Geol.-Miner.), Head of the Technological Service, Schlumberger Technology Company, Moscow, Russia.

E-mail: dvoitenko@slb.com

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 26.03.2021; одобрена после рецензирования 06.11.2021; принята к публикации 18.03.2022.

The article was submitted 26.03.2022; approved after reviewing 06.11.2021; accepted for publication 18.03.2022