

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ ПАРАМЕТРЫ УЛЬТРАОСНОВНЫХ
МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ СЕВЕРО-ВОСТОКА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ
(данные по расплавленным включениям в хромшпинелиде)**

**В.А. Симонов^{1,2,3}, Ю.Р. Васильев^{1,2}, А.В. Котляров^{1,3}, Е.И. Николенко⁴,
Т.А. Алифирова¹, В.В. Шарыгин¹, С. Аулбах^{5,6}**

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

³Казанский федеральный университет, 420008, Казань, ул. Кремлевская, 18, Россия

⁴ALROSA (ZIMBABWE) Ltd., 19 Van Praagh Ave., Milton Park, Harare, Zimbabwe

⁵Institut für Geowissenschaften, Goethe-Universität, Frankfurt am Main, 60323, Frankfurt, Germany

⁶Frankfurt Isotope and Element Research Center (FIERCE), Goethe-Universität Frankfurt,
Frankfurt am Main, 60323, Frankfurt, Germany

Экспериментальные исследования и анализ силикатных включений свидетельствуют о магма-тогенном происхождении части хромшпинелидов из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы. Составы расплавленных включений в хромшпинелиде показывают участие щелочных (калиевых) магм при их кристаллизации. При этом преобладают данные о развитии магматических систем, близких к расплавам Гулинского ультраосновного массива на севере Сибирской платформы. Исследования особенностей распределения редких и редкоземельных элементов в расплавленных включениях в хромшпинелиде говорят о существовании нескольких магматических систем. Прежде всего, это магмы, формировавшие ультраосновные массивы типа Гулинского и имеющие тесную связь с развитием меймечитов и пикритов Маймеча-Котуйской провинции. Также это плюмовые магматические системы, связанные с развитием кимберлитов, лампрофиров и(или) других континентальных «горячих точек». В целом результаты анализа состава расплавленных включений свидетельствуют о возможности существования нескольких типов первичных источников хромшпинелидов северо-востока Сибирской платформы, что подтверждает полученные ранее данные о гетерогенном характере отложений алмазоносного карнийского яруса верхнего триаса. Расчетное моделирование с помощью известных программ COMAGMAT, PETROLOG, WinPLtb, а также Ol-Sp геотермометров на основе данных по расплавленным включениям в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы позволило выяснить *PT*-параметры кристаллизации минералов магматических пород, являющихся источниками рассмотренных хромитов. Определена температура ликвидусной кристаллизации хромшпинелидов — 1324—1275 °С. Установлены параметры образования оливина (около 4.5—4.1 кбар, 1510—1150 °С) и клинопироксена (3.2—1.0 кбар, 1285—1200 °С) во включениях в хромшпинелиде.

Ультраосновные магматические системы, северо-восток Сибирской платформы, расплавленные включения в хромшпинелиде, PT-параметры магматических процессов

**PHYSICOCHEMICAL PARAMETERS OF ULTRABASIC MAGMATIC SYSTEMS
OF THE NORTHEASTERN SIBERIAN PLATFORM
(data on melt inclusions in chromian spinel)**

V.A. Simonov, Yu.R. Vasil'ev, A.V. Kotlyarov, E.I. Nikolenko, T.A. Alifirova, V.V. Sharygin, S. Aulbach

Experimental studies and analysis of silicate inclusions testify to the magmatic genesis of part of chromian spinel from the Triassic deposits of the northeastern Siberian Platform. The compositions of melt inclusions in the chromian spinel show the participation of alkaline (potassic) magmas in their crystallization. Most data indicate the presence of magmatic systems similar to melts in the Guli ultrabasic massif in the northern Siberian Platform. Studies of the distribution of trace and rare-earth elements in the melt inclusions show the existence of several magmatic systems. These are, first of all, magmas that formed Guli-type ultrabasic massifs and gave rise to meimechites and picrites in the Maimecha–Kotui province. There are also plume-related magmatic systems with kimberlites, lamprophyres, and/or other continental “hot spots”. The composition of the melt inclusions suggests the existence of several types of the primary sources of chromian spinel in the northeastern Siberian Platform, which confirms the earlier data on the heterogeneous composition of the deposits of the diamondiferous Carnian (Upper Triassic) Stage. Applying computer modeling with the well-known COMAGMAT, PETROLOG, and WinPLtb programs as well as the Ol–Sp geothermometers based on the melt inclusions in

chromian spinel from the Triassic deposits of the northeastern Siberian Platform, we have determined the P - T conditions of crystallization of minerals in the igneous rocks being the sources of the examined chromites. The temperature of liquidus crystallization of chromian spinel is 1324–1275 °C. The P - T conditions of formation of olivine and clinopyroxene inclusions in it are estimated at ca. 4.5–4.1 kbar, 1510–1150 °C and 3.2–1.0 kbar, 1285–1200 °C, respectively.

Ultrabasic magmatic systems, northeastern Siberian Platform, melt inclusions in chromian spinel, P - T conditions of magmatic processes

ВВЕДЕНИЕ

Исследования последних лет показали, что хромшпинелид является хорошим «микроконтейнером» фрагментов среды, из которой он кристаллизовался, благодаря своей химической и физической устойчивости к вторичным процессам [Kamenetsky et al., 2001, 2002; Shimizu et al., 2001; Симонов и др., 2009б, 2011, 2015, 2016а, б; Ionov et al., 2011; Borisova et al., 2012; и др.]. Часто в интенсивно преобразованных породах только хромшпинелид сохраняет свои свойства и, соответственно, содержит данные о первичных магматических процессах. В связи с этим особое значение приобретают исследования в хромшпинелиде расплавных силикатных включений, несущих прямую информацию о физико-химических параметрах магматических систем.

В случае Сибирской платформы с помощью изучения расплавных включений в хромшпинелиде ранее оказалось возможным выявить особенности кристаллизации из расплавов дунитов концентрически-зональных ультраосновных массивов (Кондерский, Инаглинский и Чадский), располагающихся в структурах юго-востока Сибирской платформы [Симонов и др., 2017]. Получена также информация по расплавным включениям в хромшпинелиде Гулинского ультрабазитового массива (Маймеч-Котуйская провинция, север Сибирской платформы) [Симонов и др., 2016а, 2017].

В последнее время на основе экспедиционных исследований и аналитической обработки собранного материала накоплена представительная информация по хромшпинелидам из осадочных ассоциаций северной части Сибирской платформы [Николенко и др., 2018]. При этом с помощью экспериментальных термобарогеохимических исследований получены первые данные по прогретым расплавным включениям в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы [Симонов и др., 2019, 2020]. В то же время важные вопросы, связанные с источниками поступления материала

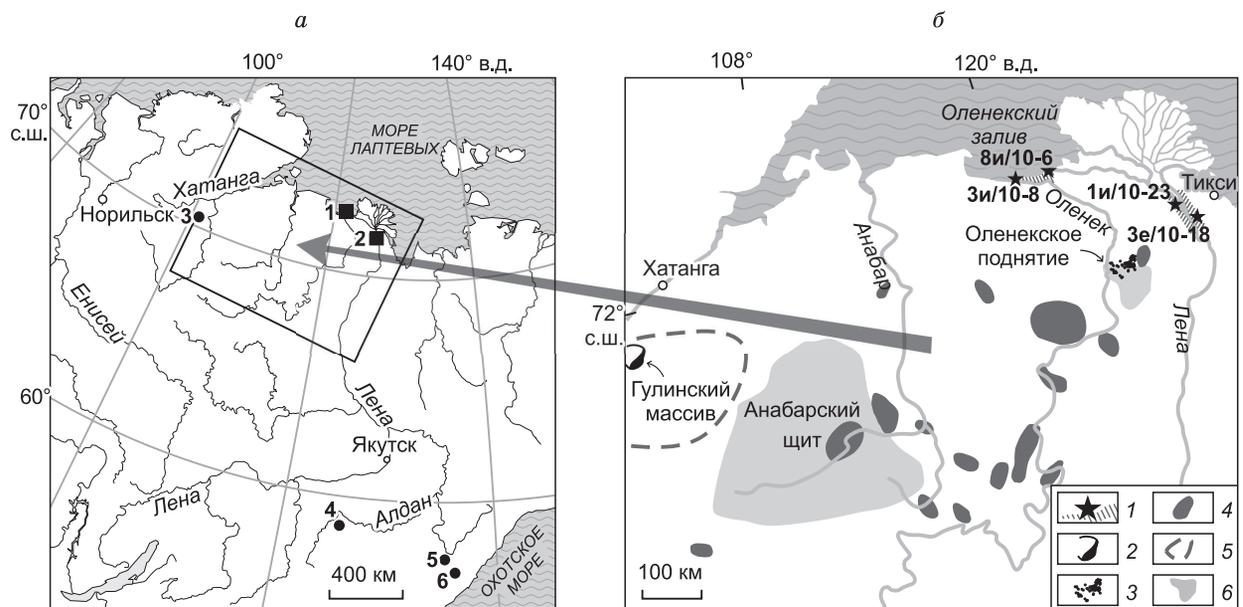


Рис. 1. Расположение изученных комплексов пород.

a: 1 — устье р. Оленек и побережье Оленекского залива; 2 — низовья р. Лена; 3—6 — ультраосновные массивы: Гулинский (3), Инагли (4), Кондер (5), Чад (6). *б*: 1 — участки детальных исследований; 2 — ультраосновные массивы; 3 — К-щелочные вулканы; 4 — кимберлитовые поля; 5 — граница Маймеч-Котуйской провинции; 6 — выступы фундамента Сибирской платформы. Звездами отмечено расположение детально изученных проб с расплавными включениями в хромшпинелиде. Рисунок составлен на основе данных из работы [Николенко и др., 2018].

в осадочные серии северо-востока Сибирской платформы, несмотря на ведущиеся в этом направлении работы [Граханов и др., 2009, 2010; Проскурин и др., 2012; Летникова и др., 2013, 2014; Николенко и др., 2018; и др.], требуют дальнейших детальных исследований. Особое значение имеют проблемы выяснения характеристик магматических комплексов (включая физико-химические параметры их формирования), являющихся источниками минералов тяжелых фракций из осадочных отложений. Как показали наши работы, перспективным путем решения этих вопросов является использование данных по расплавленным силикатным включениям в хромшпинелиде.

В связи с этим большое значение имеет информация о том, что в алмазоносных отложениях верхнего триаса на северо-востоке Сибирской платформы широко распространены хромшпинелиды, в которых были найдены первичные полифазные включения, образовавшиеся при захвате расплава в процессе кристаллизации хромшпинелида [Николенко и др., 2018].

В целом основой настоящей статьи послужили оригинальные результаты исследования расплавленных включений в хромшпинелидах, отобранных в различных районах Полярной Сибири (рис. 1), включая Гулинский ультрабазитовый массив как возможный источник хромшпинелидов в осадочных сериях. Анализ состава прогретых и закаленных первичных включений позволил получить новые данные о физико-химических параметрах ультраосновных магматических систем этого региона. Наиболее детально были изучены пробы, отобранные на побережье моря Лаптевых (Оленекский залив), в нижнем течении р. Лена и в приустьевой части р. Оленек. Все пробы характеризуются наличием в тяжелой фракции минералов, часто находящихся в парагенезисе с алмазами — хромистый пироп, хромшпинелид, пикроильменит.

При проведении работ большое внимание уделялось сравнительному анализу результатов исследования включений в хромшпинелиде севера Сибирской платформы и данных по эталонным магматическим комплексам, присутствующим на Сибирской платформе и включающим кимберлиты, пикриты, лампрофиры, меймечиты и дуниты из ультраосновных массивов.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Основой работ по выяснению характеристик магматических систем, наиболее вероятно являющихся источниками хромшпинелидов в осадочных комплексах северо-востока Сибирской платформы, послужили результаты исследований расплавленных силикатных включений в этом минерале.

Необходимо отметить, что хромшпинелид в большинстве случаев заметно окрашен и слабо пропускает свет. В результате практически невозможно вести наблюдения за находящимися в нем включениями в ходе нагрева до высоких температур. В связи с этим была применена методика экспериментов с использованием микрокамеры на основе силитового нагревателя [Симонов и др., 2009а, 2011, 2017]. Мономинеральная проба (до 100—200 зерен фракции 0.50—0.25 мм) помещалась в графитовый мини-контейнер с внутренними размерами в первые миллиметры. Контейнеры закрывались графитовыми крышками и подвергались нагреву в микротермокамере. В ходе высокотемпературных опытов в этих миниконтейнерах при температурах свыше 1100 °С создавались восстановительные условия в результате реакции кислорода с графитом, что позволило сохранять хромшпинелид (и находящиеся в нем включения), несмотря на экстремальные условия экспериментов.

Опыты при высокой температуре проводились на основе методической информации из предыдущих работ, посвященных исследованиям расплавленных включений в минералах [Магматогенная кристаллизация..., 1975; Соболев и др., 1976; Бакуменко, 1986; Симонов, 1993; Sobolev, Danyushevsky, 1994; и др.], с учетом малой вязкости расплавов (характерных для базит-ультрабазитовых комплексов) и сведения к минимуму возможности реакции матрицы хромшпинелида-хозяина с расплавом во включении: нагрев до 1000—1100 °С (8—10 мин), дальнейший нагрев до 1330—1340 °С (10 мин), закалка. Для преобразования расплава во включениях в гомогенное стекло проводилась закалка в воде.

Выбор температурного режима (нагрев до 1330—1340 °С) определялся, прежде всего, тем, что основной задачей высокотемпературных экспериментов было расплавить содержимое силикатных включений в хромшпинелиде и получить при закалке гомогенное стекло. В связи с этим большое значение имеют результаты предыдущих многочисленных экспериментов с хромшпинелидами из других объектов Сибири, Урала и Атлантического океана, проведенных авторами и показавших, что нагрев до 1300—1340 °С достаточен для расплавления содержимого включений в хромшпинелиде из базит-гипербазитовых комплексов и получения гомогенного стекла при закалке [Симонов и др., 2009а, 2011, 2016а, 2017].

Прогретые и закаленные пробы помещали в алюминиевые кольца, заливали эпоксидной смолой, и в дальнейшем зерна хромшпинелида вскрывали при шлифовке и полировке. Каждое зерно хромшпинелида в препарате (количество зерен могло достигать 100—200 штук) изучалось в отраженном свете на рудном микроскопе с целью поиска силикатных включений. Повторной шлифовке препарат не подвергался.

Все экспериментальные работы с расплавленными включениями в хромшпинелиде проводились в лаборатории геодинамики и магматизма Института геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН

(ИГМ СО РАН, г. Новосибирск). Исследования составов минералов и расплавных включений были выполнены в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН и в ИГМ СО РАН (г. Новосибирск).

Стекла и микрофазы (оливин, клинопироксен и другие минералы) во включениях, а также вмещающие их хромшпинелиды из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы анализировались микрорентгеноспектральным методом с помощью микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe [Королюк и др., 2008]. Результаты проведенных нами анализов содержаний основных элементов на этом приборе превышают пределы обнаружения. В связи с этим установленные содержания элементов являются достоверными. В ходе проведения анализа силикатных фаз использовался стандарт О-145 (пироп из кимберлитовой тр. Обнаженная). При анализе основных элементов в хромшпинелиде применялся хромит (UV-126) из кимберлитовой тр. Удачная Восточная. Стандарты обязательно проверялись дважды — в начале и в конце серии замеров.

Содержания редких и редкоземельных элементов в прогретых и закаленных расплавных включениях в хромшпинелиде из осадочных отложений верхнего триаса северо-востока Сибирской платформы изучались в Институте наук о Земле при Университете Гете во Франкфурте-на-Майне в Германии (Institute for Geosciences at Goethe-University Frankfurt on Main, Germany) с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (Thermo Scientific ELEMENT XR, ICPMS), соединенного с эксимерным лазером (RESolution, CompexPro 102, Coherent), с использованием эталона NIST 612 для калибровки чувствительности и Si для количественной оценки [Aulbach, Viljoen, 2015]. Для контроля точности анализа измерено базальтовое стекло BIR-1G.

С целью получения наиболее представительных выводов и для сравнительного анализа использована информация, находящаяся в базе данных GEOROC [GEOROC <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>].

Параметры кристаллизации минералов, а также особенности эволюции расплавов, принимавших участие в формировании магматических комплексов севера Сибирской платформы, были выяснены с помощью расчетного моделирования на основе данных по расплавным включениям в хромшпинелиде с применением программ PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004].

Температуру образования оливина оценили с помощью минералогических (Ol-Sp) геотермометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] на основе данных по составам оливина в расплавных включениях и хромшпинелида-хозяина.

Для определения *PT*-условий образования клинопироксена применена программа WinPLtb, основанная на соотношениях составов пироксена и расплава, из которого он кристаллизуется (Clinopyroxene-Liquid Thermobarometry) [Yavuz, Yildirim, 2018]. При этом использованы данные по составам клинопироксена во включениях из хромшпинелидов, а состав расплава был оценен на основе изучения прогретых включений в хромшпинелиде.

Результаты расчетов с использованием составов минералов были протестированы в сравнении с *PT*-параметрами, полученными на основе данных по расплавным включениям в хромшпинелиде с помощью программ PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] и COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004].

Подобный методический подход для выяснения условий формирования магматогенных комплексов путем расчетного моделирования на основе составов расплавных включений в минералах с использованием хорошо известных программ был применен нами ранее в случае эталонных магматических систем Камчатки [Добрецов и др., 2019; Симонов и др., 2021].

В конце методического раздела считаем необходимым рассмотреть некоторые проблемы сохранности содержимого включений в хромшпинелиде при высоких температурах. Это связано с тем, что высокотемпературные эксперименты с расплавными включениями в хромшпинелиде мы вынуждены проводить вне визуального контроля за процессами плавления их содержимого. Следует отметить, что вопросы герметичности пограничной зоны включение—хромшпинелид были рассмотрены как со стороны минерала-хозяина, так и изнутри расплавного включения. К сожалению, мы не имеем возможности проводить детальный анализ пограничных зон вокруг каждого расплавного включения в хромшпинелиде. Для решения принципиальных вопросов взаимодействия содержимого включения и хромшпинелида-хозяина вполне достаточным и достоверным является рассмотрение эталонных систем, в число которых, в частности, входят хорошо известные ультраосновные массивы Урала и Сибирской платформы.

В частности, в случае образцов гипербазитов из Нижнетагильского массива (Урал) выполнены методические работы по изучению состава хромшпинелида-хозяина в непосредственной близости от границы прогретого расплавного включения. Анализы проводились на разных расстояниях от границы включения: 2, 3, 7, 11, 17, 24 мкм. Сравнение аналитических данных показало, что отличия в составе хромшпинелида можно видеть только для наиболее близкой точки (2 мкм от включения) [Симонов и др., 2016б]. Данный эффект объясняется захватом части силикатного содержимого самого включения,

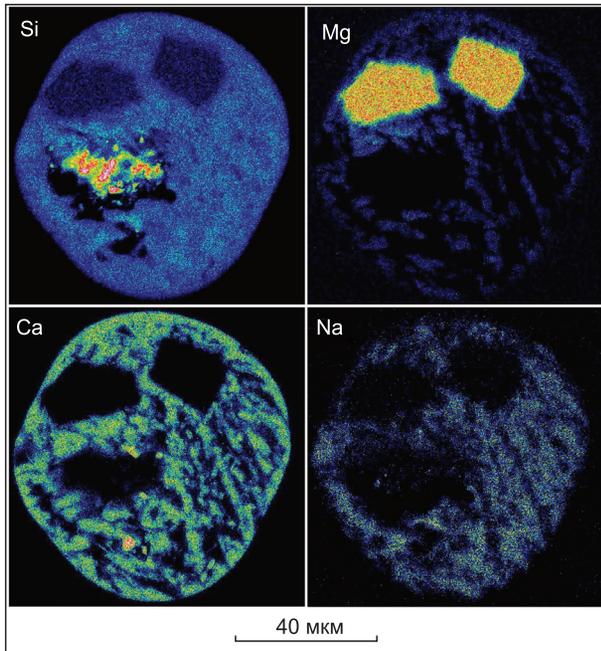


Рис. 2. Распределение химических элементов по площади расплавленного включения в хромшпинелиде.

Сканирующий микроскоп MIRA 3 LMU.

так как вещество анализировалось фактически на границе включения, о чем прямо свидетельствуют заметные содержания в результатах анализа SiO_2 (около 1.84 мас. %), отсутствующего в других случаях. Таким образом, не обнаруживается следов миграции элементов из включения, и не видно процессов взаимодействия силикатного расплава с матрицей хромшпинелида-хозяина, что прямо свидетельствует о герметичности содержимого включений в ходе высокотемпературных экспериментов.

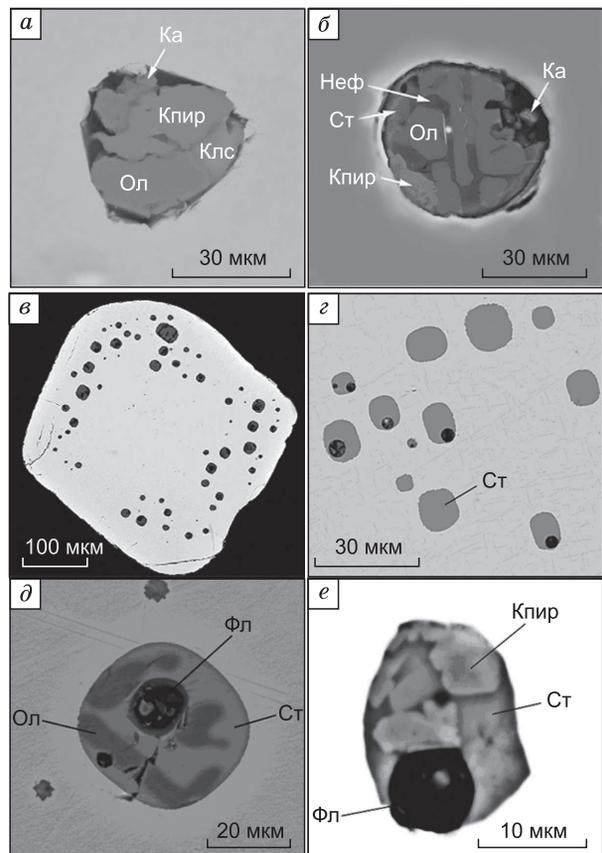
Площадное сканирование позволило получить новые данные о распределении химических элементов внутри содержимого расплавленных включений в хромшпинелиде из Гулинского ультраосновного массива (север Сибирской платформы) [Sharygin et al., 2019]. С помощью электронного

сканирующего микроскопа были проанализированы включения, не подвергавшиеся высокотемпературным экспериментам, т. е. находящиеся в природном естественном состоянии. Полученные данные могут служить в качестве иллюстрации экстремальных ситуаций, в которых бывают расплавленные включения. Во-первых, максимально контрастные составы расплава (силикатно-щелочной), захваченного во включении, и минерала-хозяина (хромшпинелид). Во-вторых, очень высокие температуры (более 1350 °С). В-третьих, продолжительное время существования высокотемпературного расплава (учитывая масштаб массива, он остывал очень медленно), превышающее в тысячи раз время выдержки включений в ходе опытов.

Результаты детального сканирования приведены на рис. 2, где хорошо видны четкие границы включения (без всяких внешних каемок в хромшпинелиде) в случае площадного распределения всех контрастных по отношению к составу хромита элементов — Si, Mg (отчетливо видны яркие кристаллики оливина внутри включения), Ca, Na. Таким образом, влияние диффузии на пограничную зону включения—хромшпинелид здесь (как и в случае прогретого включения в хромшпинелиде Нижнетагильского массива) не отмечается. При этом отсутствие признаков диффузии может не являться бесспорным доказательством герметичности включений. Совершенно необходимо учитывать все имеющиеся свидетельства разгерметизации включений: наличие трещин (как проходящих сквозь включения, так и начинающихся от их границ), нечеткие («плавающие») границы включения, присутствие следов выброса расплава из

Рис. 3. Расплавленные включения в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы.

a, б — негретые включения, *в–е* — экспериментально прогретые включения, Ол — оливин, Кпир — клинопироксен, Неф — нефелин, Клс — кальсилит, Ка — кальцит, Ст — стекло, Фл — флюид. Микроанализатор JEOL JXA-8100 SuperProbe.



включения, аномальные размеры газового пузырька, появление нескольких газовых пузырьков и другие. Следует подчеркнуть, что в своей работе мы использовали информацию только по тем прогретым расплавленным включениям, для которых отсутствуют все отмеченные выше дефекты. Это хорошо видно на рис. 3, *в—е* и на фотографиях в Приложении №1 (см. доп. материалы <https://sibran.ru/upload/medialibrary/b0a/b0a0b141ee5d43d22828d910e245ae9e.pdf>). В то же время мы не отрицаем наличия вокруг некоторых включений (см. рис. 3, *б*) определенных зон, причина появления которых остается неясной, и поэтому эти объекты нами не использовались для реконструкции *PT*-параметров магматических процессов.

ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ КОМПЛЕКСОВ ПОРОД СЕВЕРА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ, СОДЕРЖАЩИХ ИЗУЧЕННЫЕ ХРОМШПИНЕЛИДЫ

Основой проведенных работ послужили коллекции пород, собранные авторами во время экспедиций в районах Полярной Сибири, включая прибрежные участки в низовьях рек Лена и Оленек, а также на побережье моря Лаптевых. Среди изученных ассоциаций выделяются два основных объекта, содержащих хромшпинелиды. Прежде всего, это триасовые отложения северо-востока Сибирской платформы, а также ультраосновные магматические комплексы Гулинского массива (см. рис. 1), играющие главным образом роль источников эталонных данных по расплавленным включениям в хромшпинелиде.

Триасовые отложения северо-востока Сибирской платформы. Отбор проб осадочных отложений верхнего триаса проводили в этом регионе во время совместных экспедиционных работ сотрудники ИГМ СО РАН (г. Новосибирск) и СНИИГГиМС (г. Новосибирск).

Опробование грубообломочных отложений осуществлялось параллельно с описанием разрезов на 11 известных обнажениях триасовых отложений. Объем отобранных проб осадочных отложений варьировался от 30 до 1000 л. Все изученные пробы характеризуются наличием в тяжелой фракции минералов, часто находящихся в парагенезисе с алмазами, таких как хромистый пирроп, хромшпинелид, пикроильменит. В целом выделено и изучено 759 монофракций хромшпинелида. При этом было установлено, что только в некоторых пробах находятся хромшпинелиды с полифазными силикатными включениями [Николенко и др., 2018]. Дальнейшие исследования показали, что расплавленные силикатные включения (в случае которых удалось провести высокотемпературные эксперименты и изучить состав прогретого содержимого) присутствуют в хромшпинелидах из четырех проб, отобранных на трех разных участках исследованного региона: устье р. Оленек (пр. 3и/10-8, участок № 1), побережье Оленекского залива (пр. 8и/10-6, участок № 2), нижнее течение р. Лена (пробы 3е/10-18, 1и/10-23, участок № 3). Расположение проб с расплавленными силикатными включениями в хромшпинелиде отмечено звездами на рис. 1.

Гулинский ультраосновной массив располагается в северной части Маймеча-Котуйской магматической провинции на севере Сибирской платформы. Его открытая часть в виде полосы шириной 10—12 км вытянута в северо-восточном направлении на 60 км, занимая водораздел рек Маймеча и Котуй. Основной объем массива выполняют дуниты, контактирующие с пермотриасовыми вулканическими породами онкучакской и тыванкитской свит Маймеча-Котуйской провинции, а также с меймечитами маймеченской свиты [Васильев, Золотухин, 1975; Егоров, 1991; Vasiliev, Zolotukhin, 1995; Васильев, Гора, 2012; Симонов и др., 2017]. В целом Гулинский массив сложен разнообразными породами от ультраосновного до щелочного составов, а также карбонатитами. Установлена последовательность формирования: дуниты—клинопироксениты—мелилитолиты (щелочные породы якупирангит-уртитового ряда)—сиениты—карбонатиты [Васильев, Золотухин, 1975]. Наиболее изучены нами дуниты (содержащие клинопироксен), в акцессорном хромшпинелиде из которых были исследованы расплавленные включения [Симонов и др., 2016а, 2017].

ХРОМШПИНЕЛИДЫ С РАСПЛАВНЫМИ ВКЛЮЧЕНИЯМИ

В ходе исследования собранных коллекций основное внимание уделялось анализу составов хромшпинелидов (содержащих расплавленные включения) из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы, на детально опробованных участках в приустьевой части р. Оленек (участок № 1), побережья Оленекского залива (№ 2), района нижнего течения р. Лена (№ 3). Наиболее детально изучены хромшпинелиды (с расплавленными включениями) из участков № 2 и 3 (рис. 4, табл. 1). В Приложении № 2 (см. доп. материалы) помещены все аналитические данные по хромшпинелидам из опробованных участков, использованные при построении диаграмм на рис. 4.

К настоящему времени опубликован значительный объем данных по составам хромшпинелидов этого региона. Ранее по результатам изучения ассоциации хромшпинелида из отложений карнийского яруса были сделаны выводы о существовании по меньшей мере двух типов первичных источников этого минерала, одним из которых являются кимберлиты, вторым, вероятно, щелочные или умеренно ще-

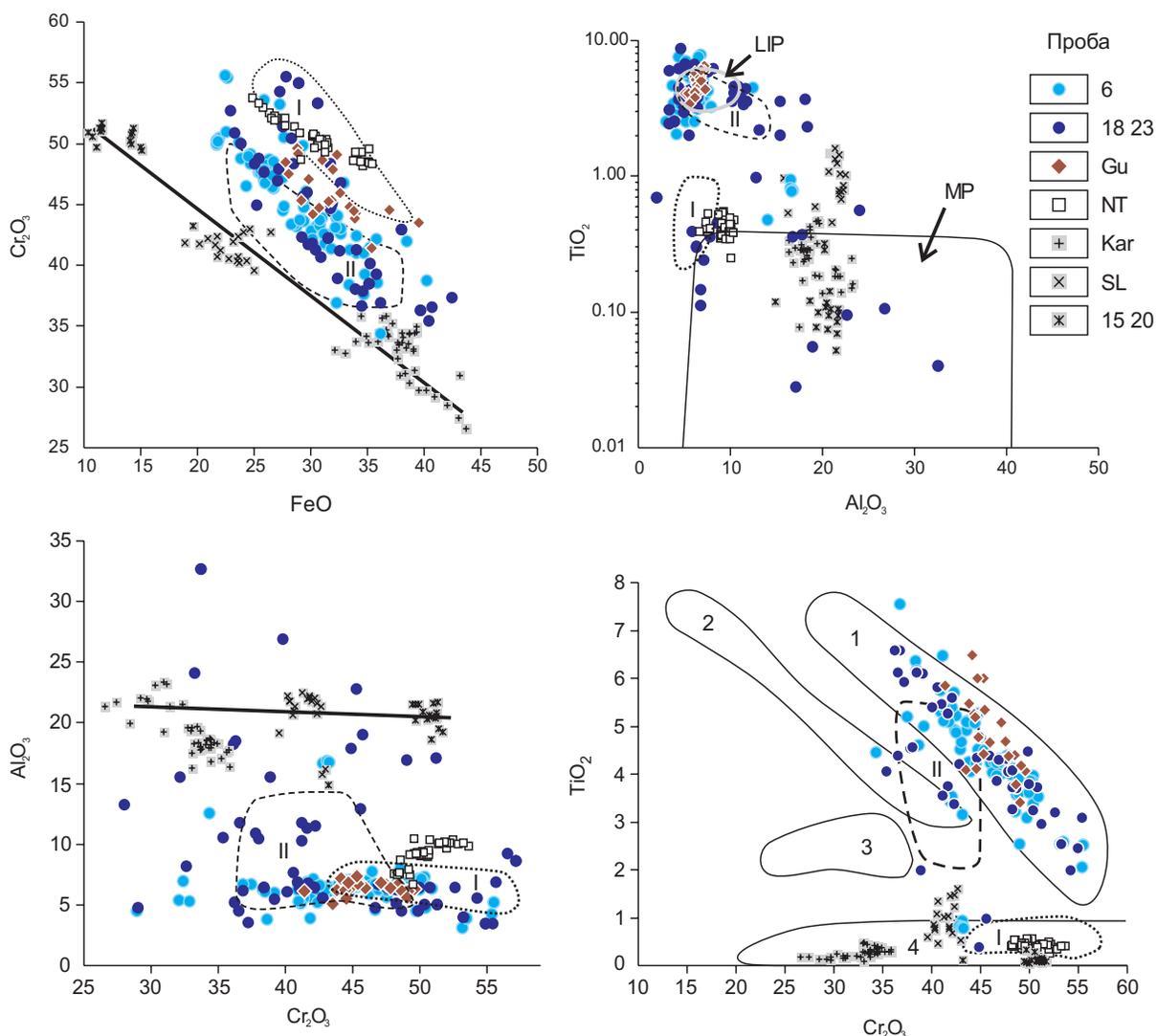


Рис. 4. Составы хромшпинелидов (мас. %), содержащих расплавные включения.

Хромшпинелиды: из триасовых отложений побережья Оленекского залива (6) и нижнего течения р. Лена (18 23); из дунитов Гулинского (Gu), Нижнетагильского (Урал, NT) и Карашатского (Южная Тува, Kar) массивов; из ультраосновных пород Срединно-Атлантического хребта в зонах разломов Сьерра-Леоне (SL) и 15°20' (15 20). Поля хромшпинелидов из дунитов Сибирской платформы (I, массивы Кондер, Инагли, Чад) и из меймечитов (II). Хромшпинелиды из мантийных перидотитов (MP) и крупных изверженных провинций (LIP). На диаграмме $TiO_2-Cr_2O_3$: 1 — хромшпинелиды Гулинского массива (включая данные по меймечитам); 2—4 — составы, возможные для кимберлитов, в том числе (4) — вероятные для алмазоносных кимберлитов. Рисунок составлен с использованием данных из работ [Васильев, Золотухин, 1975; Kamenetsky et al., 2001; Симонов, Ковязин, 2009; Симонов и др., 2009а, 2017; Heinonen, Luttinen, 2010; Соболев и др., 2013].

лочные вулканиды, широко распространенные в пределах северо-востока Сибирской платформы [Соболев и др., 2013; Николенко и др., 2018].

Необходимо отметить, что в породах вулканического генезиса могут присутствовать две генетически различные разновидности хромшпинелидов (магматического и мантийного происхождения). В кимберлитах (как и в других подобных породах) присутствуют микрофенокристаллы, которые кристаллизуются из расплава на этапе внедрения магматического тела. Размер таких микрокристаллов обычно не превышает 0.1 мм [Mitchell, 1986; Гаранин и др., 2009]. Источником макрокристаллов хромшпинелидов в кимберлитах и подобных им породах являются дезинтегрированные шпинельсодержащие породы верхней мантии [Schulze, 1996; Sobolev, Logvinova, 2005; Гаранин и др., 2009].

В хромшпинелидах, источником которых являются породы верхней мантии, силикатные включения встречаются редко. По данным предыдущих исследований [Соболев, Логвинова, 2004], только 0.3 % мантийных хромшпинелидов из кимберлитов и лампроитов содержат включения пирропа.

Таблица 1. Представительные анализы (мас. %) хромшпинелидов с расплавленными включениями из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы

№ п/п	№ анализа	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	NiO	V ₂ O ₅	Сумма	Cr#
1	12	2.50	5.18	55.56	22.51	0.25	13.55	0.22	0.12	99.91	87.80
2	8	3.21	7.95	48.61	26.41	0.17	12.75	0.22	0.15	99.53	80.40
3	7	3.42	3.82	41.90	38.50	0.50	10.72	0.27	0.11	99.31	88.04
4	12	3.85	7.01	50.27	21.80	0.26	15.65	0.31	0.17	99.37	82.78
5	16	4.91	6.04	43.57	29.43	0.31	14.35	0.29	0.15	99.08	82.86
6	23	3.51	5.52	42.14	35.85	0.40	10.86	0.20	0.08	98.64	83.67
7	25	4.29	6.18	47.00	25.91	0.31	15.00	0.31	0.12	99.19	83.62
8	27	2.04	4.19	55.37	22.65	0.31	14.21	0.23	0.10	99.16	89.87
9	35	4.50	6.40	43.01	32.72	0.37	11.80	0.31	0.16	99.33	81.84
10	107	5.14	6.79	41.66	31.32	0.28	14.19	0.34	0.12	99.90	80.45
11	109	3.52	6.33	50.96	22.62	0.25	15.86	0.29	0.05	99.93	84.37
12	112	4.30	6.19	46.97	26.16	0.27	15.28	0.33	0.10	99.63	83.59
13	113	6.15	6.02	38.51	35.95	0.31	12.22	0.33	0.16	99.68	81.10
14	118	5.39	7.07	42.12	30.19	0.28	14.04	0.33	0.11	99.57	80.00
15	120	7.54	6.61	36.85	32.34	0.26	15.44	0.37	0.13	99.57	78.90
16	126	4.49	6.45	45.39	29.46	0.30	13.34	0.29	0.10	99.88	82.53
17	132	4.22	6.67	46.74	25.99	0.26	15.30	0.31	0.07	99.59	82.47
18	142	4.03	6.62	44.03	32.42	0.50	11.60	0.25	0.13	99.72	81.70
19	144	5.75	5.24	40.99	34.72	0.31	11.86	0.31	0.12	99.36	84.00
20	145	3.76	6.61	48.49	26.80	0.29	13.43	0.26	0.09	99.79	83.11
21	6	2.44	3.40	54.96	28.98	0.43	9.13	0.14	0.24	99.86	91.56
22	246	5.45	6.31	41.10	32.63	0.31	13.02	0.30	0.10	99.27	81.39
23	247	2.94	5.02	51.32	27.59	0.27	12.04	0.22	0.13	99.60	87.28
24	254	3.37	11.48	42.30	29.28	0.27	12.67	0.22	0.19	99.83	71.20
25	256	3.25	5.08	48.30	31.73	0.35	10.40	0.15	0.08	99.40	86.44
26	264	2.44	3.40	54.96	28.98	0.43	9.13	0.14	0.24	99.86	91.55
27	276	4.53	10.86	37.84	34.60	0.31	11.27	0.24	0.18	99.91	70.04
28	277	4.19	5.54	42.85	38.05	0.43	8.13	0.20	0.22	99.71	83.85
29	280	4.06	6.45	48.26	25.05	0.26	14.72	0.29	0.14	99.26	83.38
30	281	4.05	10.51	35.38	40.42	0.39	8.69	0.20	0.23	99.94	69.31
31	284	3.75	11.27	41.68	29.81	0.29	12.52	0.28	0.18	99.82	71.27
32	4	2.53	3.94	53.30	30.62	0.39	8.64	0.15	0.15	99.82	90.07
33	2	6.11	6.40	38.46	35.20	0.32	12.61	0.29	0.14	99.59	80.12
34	213	5.90	3.46	37.28	42.49	0.35	10.06	0.27	0.08	99.93	87.85
35	218	5.80	7.63	40.59	30.96	0.31	14.03	0.30	0.13	99.80	78.12
36	225	3.22	5.00	50.41	28.32	0.29	12.20	0.25	0.08	99.83	87.12
37	227	2.53	3.96	53.32	30.62	0.39	8.64	0.15	0.15	99.86	90.03
38	232	3.85	4.73	46.74	32.68	0.31	11.39	0.20	0.06	99.97	86.90
39	240	3.78	6.43	49.99	23.92	0.26	14.94	0.28	0.07	99.71	83.91
40	243	4.38	11.71	36.63	34.56	0.31	11.81	0.21	0.16	99.86	67.72

Примечание. Хромшпинелиды монофракций минералов с расплавленными включениями из триасовых отложений побережья Оленекского залива (№ 1—20, пр. 8и/10-6) и нижнего течения р. Лена (№ 21—31, пр. 3е/10-18; № 32—40, пр. 1и/10-23) на северо-востоке Сибирской платформы. Cr# = 100Cr/(Cr + Al). Составы хромшпинелидов установлены с помощью микрорентгеноспектрального метода с использованием микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe.

В предлагаемой статье рассматриваются хромшпинелиды, в которых найдены расплавленные силикатные включения. Соответственно, при обработке полученной информации с целью сравнительного анализа использовались в основном данные по магматогенным хромшпинелидам (содержащим расплавленные включения) из эталонных базит-ультрабазитовых комплексов Сибирской платформы, юга Сибири, Урала и современных океанических областей [Kamenetsky et al., 2001; Симонов и др., 2009а, б, 2016а, б, 2017; Симонов, Ковязин, 2009].

Исследования показали, что основная часть изученных хромшпинелидов (с расплавленными включениями) из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы по соотношению Cr_2O_3 — FeO располагается (см. рис. 4) преимущественно между полями минералов из океанических пород и из концентрически-зональных ультраосновных массивов Сибирской платформы, наиболее соответствуя хромшпинелидам из меймечитов Маймеча-Котуйской провинции и из дунитов Гулинского массива. Часть хромшпинелидов района нижнего течения р. Лена сопоставима с минералами из концентрически-зональных платиноносных массивов Сибирской платформы (Кондер, Инагли и Чад) и Урала (Нижнегагильский) (см. рис. 4).

На диаграмме TiO_2 — Al_2O_3 рассмотренные хромшпинелиды образуют компактную группу с максимальными содержаниями титана, перекрывающуюся с данными по минералам из меймечитов, из Гулинского массива и из крупных изверженных провинций (LIP). При этом заметная часть хромшпинелидов района нижнего течения р. Лена приурочена к данным по хромшпинелидам из мантийных перидотитов (MP) и ультраосновных океанических комплексов. Сходство с океаническими хромшпинелидами подтверждается и по соотношению Al_2O_3 — Cr_2O_3 (см. рис. 4).

Данные по изученным хромшпинелидам на диаграмме TiO_2 — Cr_2O_3 в большинстве случаев соответствуют тренду 1, включающему составы хромшпинелидов Гулинского плутона (а также информацию по минералам из меймечитов). При этом заметное количество хромшпинелидов попадает в поля составов минералов, возможных для кимберлитов, в том числе вероятных для алмазоносных кимберлитов (см. рис. 4).

РАСПЛАВНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В ХРОМШПИНЕЛИДЕ

В хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы были найдены первичные расплавленные включения (10—60 мкм), располагающиеся равномерно в центральных частях зерен либо формирующие прямолинейные зоны роста, параллельные граням кристаллов. Формы включений округлые, равновесные с вмещающим хромшпинелидом и часто имеют заметную огранку. До высокотемпературных экспериментов включения содержат обычно несколько микрофаз, среди которых преобладают оливин и клинопироксен. Присутствуют также нефелин, кальсилит, кальцит и стекло (рис. 3, а, б).

После высокотемпературных экспериментов и закалки включения в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы по своему фазовому составу разделяются преимущественно на два типа: с преобладанием стекла и с кристаллическими фазами. Первые содержат визуально-гомогенное стекло или стекло + флюидный пузырек (см. рис. 3, Приложение № 1 в доп. материалах). Эти данные прямо свидетельствуют, что содержимое включений было полностью расплавлено. Сферическая форма флюидного пузырька говорит о его формировании в равновесной системе газ—жидкость (расплав) (см. рис. 3, в).

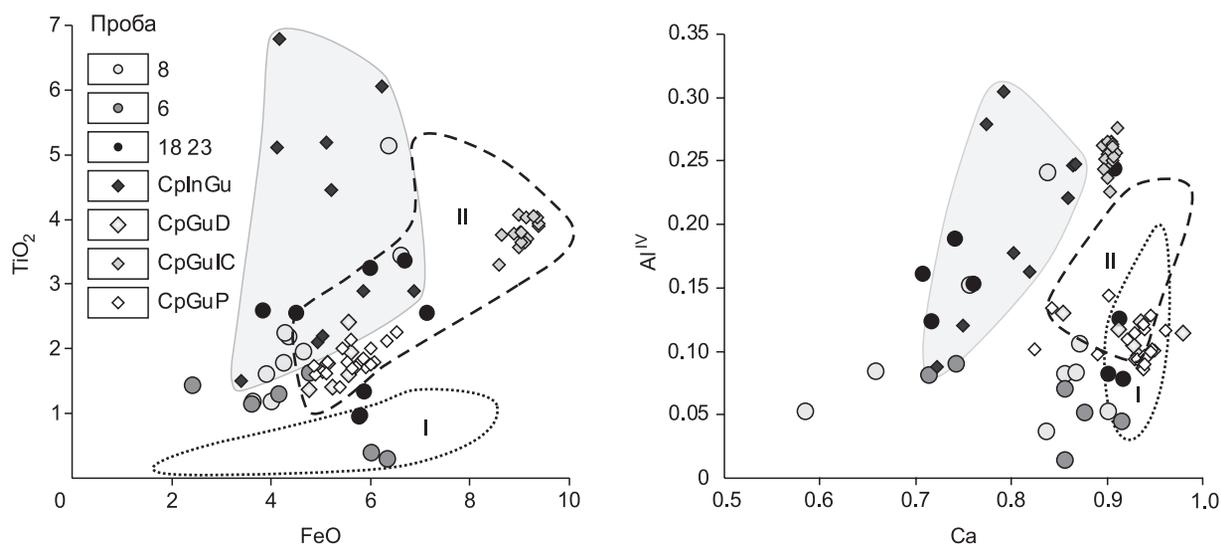


Рис. 5. Составы (мас. %) клинопироксена из расплавленных включений в хромшпинелиде.

8, 6, 18 23 — пробы из участков в устье р. Оленек (8), на побережье Оленекского залива (6) и в нижнем течении р. Лена (18 23); клинопироксен Гулинского массива: из расплавленных включений в хромшпинелиде (CpInGu), из дунитов (CpGuD), из интеркумulus дунитов (CpGuIC), из пироксенитов (CpGuP). Поля клинопироксенов: I — из ультраосновного массива Кондер, Сибирская платформа (данные авторов); II — из меймечитов севера Сибирской платформы. Рисунок составлен с использованием данных из работ [Васильев, Золотухин, 1975; Коненко, 1982; Elkins Tanton et al., 2007].

Таблица 2. Представительные анализы (мас. %) клинопироксена в прогретых расплавных включениях в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	NiO	Сумма	Mg#
1	15	46.68	5.14	4.61	0.88	6.38	0.09	13.93	20.77	0.55	0.02	99.04	79.55
2	17	52.13	1.77	1.88	1.08	4.26	0.10	16.46	21.71	0.38	0.04	99.79	87.32
3	18	53.67	1.17	1.15	0.89	4.03	0.12	17.19	21.34	0.39	0.02	99.97	88.36
4	19	52.46	1.59	1.56	1.22	3.93	0.10	16.92	22.15	0.35	0.05	100.33	88.47
5	22	52.97	1.18	1.44	0.41	3.65	0.07	16.29	22.89	0.51	0.03	99.44	88.83
6	28	50.09	3.43	4.01	1.40	6.64	0.12	14.90	19.15	0.80	0.05	100.58	79.99
7	34	51.27	2.24	2.71	0.87	4.31	0.06	15.80	22.02	0.33	0.04	99.62	86.74
8	11	52.27	1.61	1.48	1.18	4.79	0.13	15.33	21.65	1.03	0.03	99.50	85.08
9	11	54.80	1.28	1.07	1.18	4.17	0.08	15.92	22.06	0.77	0.03	101.36	87.17
10	12	53.23	1.44	1.28	1.67	2.44	0.04	15.95	23.26	0.50	0.04	99.83	92.10
11	14	52.49	0.29	2.48	1.50	6.35	0.17	17.99	18.25	0.40	0.06	99.97	83.46
12	15	52.15	0.39	2.52	1.54	6.04	0.19	17.55	18.92	0.50	0.02	99.81	83.81
13	35	50.67	2.54	3.21	1.07	4.51	0.11	17.56	18.06	0.71	н. а.	98.44	87.40
14	37	46.96	3.25	6.18	0.60	6.01	0.09	12.91	22.65	0.60	0.03	99.29	79.28
15	5	49.38	3.36	4.17	1.79	6.71	0.12	14.08	18.98	0.84	0.03	99.46	78.91
16	6	52.25	0.95	2.45	0.75	5.78	0.10	14.68	22.91	0.61	0.03	100.50	81.90
17	6	50.54	1.32	2.96	0.66	5.88	0.10	14.43	22.98	0.61	0.02	99.50	81.38
18	6	52.41	0.96	1.47	0.87	5.82	0.12	14.94	23.34	0.64	0.03	100.60	82.07

Примечание. Клинопироксен в расплавных включениях в хромшпинелидах из триасовых отложений района устья р. Оленек (№ 1—7, пр. 3и/10-8), побережья Оленекского залива (№ 8—12, пр. 8и/10-6) и нижнего течения р. Лена (№ 13—18, пр. 3с/10-18) на северо-востоке Сибирской платформы. Mg# = 100Mg/(Mg + Fe²⁺). н. а. — содержание элемента не анализировалось. Составы клинопироксенов установлены с помощью микрорентгеноспектрального метода с использованием микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe.

В случае других включений, несмотря на высокие температуры опытов (до 1330—1340 °С), сохраняется оливин в виде недоплавленных реликтов с округлыми краями в гомогенном стекле (см. рис. 3, д). Присутствуют также включения, в которых (несмотря на быструю закалку в воде) из расплава успевают образоваться ограненные кристаллики клинопироксена (см. рис. 3, е).

Следует отметить, что разделение изученных нами включений преимущественно на два типа (с преобладанием стекла и с кристаллическими фазами) является реальным фактом. Количественные соотношения этих типов включений можно было бы оценить при наблюдении за поведением включений непосредственно в ходе высокотемпературных экспериментов. К сожалению, мы вынуждены проводить опыты без визуального контроля в специальных графитовых миниконтейнерах (для создания восстановительной обстановки). Таким образом, о состоянии прогретых включений после закалки мы можем судить только после их вскрытия по случайным разрезам, что не дает нам оснований говорить о количественном соотношении включений с разным фазовым содержанием.

Изучение состава кристаллических фаз, находящихся внутри включений, имеет большое значение не только для выяснения химических особенностей расплава, из которого кристаллизовался хромшпинелид, но и для определения *PT*-параметров магматических систем. Как показали исследования, в рассмотренных прогретых включениях среди кристаллитов преобладают оливин и клинопироксен. Составы пироксена приведены в табл. 2.

Анализ оливина из прогретых расплавных включений в хромшпинелидах триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы показал, что по преобладающим значениям форстеритового компонента (86—93 мол. %) его состав близок к оливину в расплавных включениях в хромшпинелидах из Гулинского массива, а также к породообразующему оливину из дунитов Гулинского массива. При сравнении с данными из работ [Соболев и др., 2009; Sobolev et al., 2009] видно, что форстеритовые характеристики оливина из расплавных включений в хромшпинелидах согласуются с информацией по оливинам из меймечитов, из ксенолитов кимберлитовой тр. Удачная и из алмазов Сибирского кратона.

Клинопироксен из расплавных включений в хромшпинелидах из района нижнего течения р. Лена в целом соответствует по составу пироксенам в расплавных включениях в хромшпинелиде из дунитов

Гулинского массива. В то же время пироксен из включений районов устья р. Оленек и побережья Оленекского залива существенно отличается по повышенным содержаниям кальция и минимальным количествам алюминия (рис. 5). Согласно соотношениям минералов En—Wo—Fs, клинопироксены в прогретых включениях из разных участков опробования отличаются. В частности, пироксены района устья р. Оленек являются диопсидами и эндиопсидами, пироксены района нижнего течения Лены представляют собой салиты и эндиопсиды, а района побережья Оленекского залива — диопсиды.

ПЕТРОХИМИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ХРОМШПИНЕЛИДАХ

Отмеченные выше особенности внутреннего строения разных типов прогретых и закаленных включений (см. рис. 3, в—е) важны для выяснения составов расплавов, при участии которых кристаллизовались изученные акцессорные хромшпинелиды из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы. В случае полного расплавления содержащего химические характеристики расплавов устанавливаются путем прямого анализа гомогенных стекол прогретых включений. При наличии недоплавленных и новообразованных минералов анализ химических составов кристалликов и стекол позволяет рассчитать по соотношениям этих фаз валовой состав включений. В результате проведенных работ был получен представительный материал (в ходе петрохимического анализа использованы данные о составах 45 включений, включая 11 полностью гомогенизированных и закаленных в стекло) по первичным прогретым расплавленным включениям в хромшпинелидах северо-востока Сибирской платформы. Были рассмотрены составы расплавленных включений в хромшпинелидах из триасовых отложений всех трех детально опробованных участков: в приустьевой части р. Оленек, побережья Оленекского залива, района нижнего течения Лены (табл. 3).

По соотношению MgO—SiO₂ (рис. 6) составы включений в рассмотренных хромшпинелидах показывают эволюцию магматизма от пикритов (MgO до 29—31 мас. %, III) через пикробазальты (IV) и магнезиальные базальты (V) к оливиновым базальтам (VI) с ростом содержания кремнезема. При этом в области пикробазальтов и оливиновых базальтов наблюдается реверсивное направление (со снижением SiO₂) к щелочным породам (I), практически совпадающее с трендом развития магматических систем ультраосновного Гулинского массива на севере Сибирской платформы. В целом наблюдается сходство эволюции составов расплавленных включений в хромшпинелидах из осадочных отложений северо-востока Сибирской платформы и из дунитов Гулинского массива (см. рис. 6).

Сравнительный анализ полученной информации по расплавленным включениям в хромшпинелидах, отобранных на различных участках, показывает определенные отличия магматических систем. В частности, для побережья Оленекского залива характерно присутствие двух контрастных типов расплавов (пикритового и щелочного), точки составов которых попадают в поля пикритовых порфиритов (II) и щелочных пород (I) Маймеча-Котуйского района. В случае участка в районе нижнего течения Лены устанавливается эволюция от пикритов к пикробазальтам. Для приустьевой части р. Оленек характерны расплавы пикробазальтового состава (см. рис. 6).

На вариационных диаграммах, показывающих зависимость содержания петрохимических компонентов от количества MgO (рис. 7), можно отметить общую закономерность распределения элементов во включениях из хромшпинелидов триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы, близ-

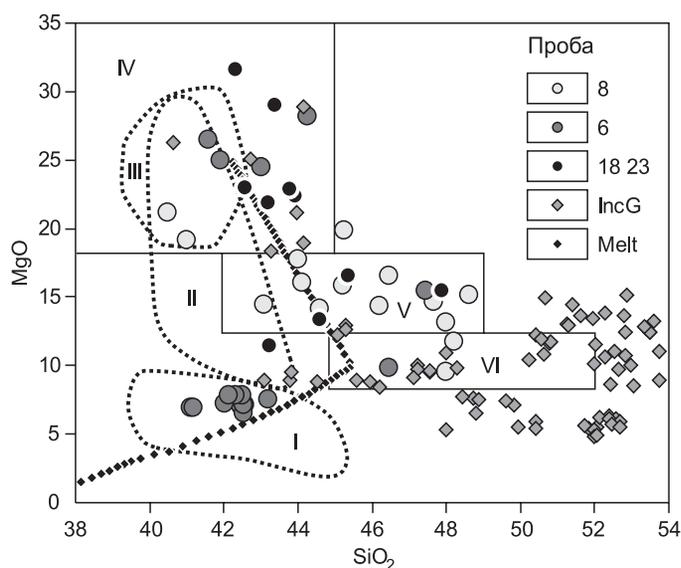


Рис. 6. Диаграмма MgO—SiO₂ (мас. %) для расплавленных включений в хромшпинелиде.

8, 6, 18 23 — пробы из участков в устье р. Оленек (8), на побережье Оленекского залива (6) и в нижнем течении р. Лена (18 23). IncG — расплавленные включения в хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива, Melt — изменение состава пикритового расплава, согласно результатам расчетного моделирования с помощью программы PLUTON [Лавренчук, 2004], на основе данных по высокомагнезиальным расплавленным включениям в хромшпинелидах из дунитов Гулинского массива [Симонов и др., 2017]. Поля составов: I — щелочные породы Гулинского массива [Васильев, Золотухин, 1975]; II — гомогенизированные расплавленные включения в оливине меймечитов [Соболев и др., 1991, 2009]; III — пикритовые порфириты Маймеча-Котуйского района [Васильев, Золотухин, 1975]; поля составов пород: IV — пикриты, V — пикробазальты, VI — оливиновые базальты [Магматические..., 1983; Петрографический кодекс..., 2009].

Таблица 3. Представительные составы (мас. %) прогретых расплавных включений в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы

№ п/п	№ анализа	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Cr ₂ O ₃	FeO	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	Сумма	Размер, мкм
1	14	43.08	4.52	6.34	0.82	10.88	0.18	14.41	13.21	2.02	2.04	н. а.	97.50	49
2	15	43.99	4.26	5.37	0.67	9.16	0.15	17.79	11.89	1.69	1.81	»	96.79	33
3	16	44.59	4.56	5.98	0.68	9.59	0.15	14.17	12.85	1.98	2.02	»	96.57	25
4	17	45.20	3.82	5.48	0.88	9.98	0.17	15.83	12.72	1.83	1.84	»	97.76	29
5	18	47.99	3.78	4.87	1.08	8.27	0.16	13.11	15.91	1.49	1.65	»	98.30	27
6	19	46.44	3.38	4.77	0.97	8.57	0.15	16.52	14.18	1.39	1.59	»	97.97	24
7	21_1	40.47	5.54	5.28	0.53	7.17	0.11	21.17	12.41	1.99	1.41	»	96.08	70
8	21_2	41.01	5.65	5.90	0.31	7.48	0.10	19.19	13.38	2.15	1.45	»	96.64	58
9	22	48.20	2.32	6.84	0.36	7.57	0.12	11.70	14.57	2.82	2.68	»	97.18	59
10	25	44.11	4.40	6.18	0.76	7.59	0.12	16.02	13.05	1.83	2.28	»	96.35	33
11	27	45.26	3.57	5.25	0.87	7.57	0.11	19.86	11.31	1.50	1.78	»	97.07	28
12	28	48.01	4.50	8.48	1.10	9.54	0.16	9.51	12.69	1.93	2.42	»	98.34	19
13	30	48.63	3.63	6.19	1.10	7.49	0.12	15.12	10.99	1.63	2.84	»	97.73	20
14	32	47.68	3.56	5.43	0.84	8.44	0.13	14.67	12.09	1.86	2.77	»	97.47	24
15	34	46.21	3.62	6.25	0.84	6.87	0.10	14.31	14.37	1.78	1.61	»	95.97	37
16	2	42.59	11.25	5.50	0.80	10.21	0.19	7.13	14.51	1.79	2.23	0.77	96.97	27
17	3	42.48	11.25	5.46	0.89	10.27	0.20	7.03	14.49	1.63	2.26	0.86	96.82	28
18	4	42.55	12.57	5.43	0.97	10.03	0.21	6.54	14.10	1.29	2.15	0.83	96.68	25
19	5	42.53	12.95	5.53	0.95	9.98	0.19	7.14	13.87	1.89	2.18	0.83	98.03	20
20	6	42.49	11.03	5.41	0.87	9.97	0.19	7.78	14.38	1.92	2.27	0.83	97.13	28
21	7	42.31	11.02	5.45	0.92	9.91	0.19	7.83	14.36	1.90	2.27	0.79	96.93	27
22	8	42.04	12.41	5.42	0.78	10.10	0.18	7.21	14.20	1.88	2.20	0.81	97.23	26
23	9	41.10	14.75	5.53	1.15	10.09	0.16	6.93	13.71	1.74	2.11	0.84	98.10	16
24	10	43.21	11.94	5.47	0.86	9.89	0.17	7.49	14.12	1.74	2.19	0.80	97.88	26
25	11	42.15	12.40	5.35	0.79	10.30	0.15	7.84	14.26	1.75	2.16	0.89	98.02	27
26	12	41.20	14.80	5.52	0.88	10.02	0.15	6.91	13.79	1.79	2.08	0.84	97.97	23
27	2А	55.60	0.37	8.84	1.06	8.35	0.18	10.27	11.51	2.48	0.56	0.36	99.58	30
28	2Б	55.57	0.37	8.77	1.06	8.32	0.18	10.35	11.59	2.45	0.55	0.36	99.58	19
29	2В	55.64	0.37	8.92	1.05	8.38	0.18	10.18	11.42	2.50	0.56	0.37	99.57	14
30	3	41.59	4.06	4.71	0.69	9.44	0.16	26.51	8.50	1.44	1.26	0.63	99.00	55
31	7	43.01	4.51	5.15	0.78	9.07	0.14	24.47	9.03	1.49	1.43	н.а.	99.08	55
32	10	41.91	3.33	4.76	1.23	8.34	0.12	24.99	10.21	1.76	1.30	»	97.94	12
33	11	47.45	1.97	3.18	1.16	10.92	0.18	15.44	14.36	2.62	2.14	»	99.44	30
34	12	44.27	1.57	2.97	1.03	6.68	0.09	28.20	10.05	1.11	1.43	»	97.38	17
35	13	46.46	2.77	6.58	1.86	7.50	0.14	9.81	15.89	2.63	1.61	»	95.25	10
36	35	47.89	4.26	6.79	0.97	6.90	0.11	15.43	11.67	1.87	2.07	»	97.97	22
37	36	42.58	3.31	4.81	1.06	6.92	0.08	22.94	11.70	1.85	2.04	»	97.30	24
38	37	43.24	3.15	9.10	0.53	9.16	0.15	11.40	15.40	1.76	2.52	»	96.41	58
39	1	43.94	2.88	5.95	1.15	7.47	0.12	22.32	10.33	2.12	2.33	»	98.61	15
40	2	43.20	2.90	5.71	1.37	8.28	0.14	21.87	10.71	2.09	2.37	»	98.63	16
41	3	43.79	2.76	5.59	1.15	7.72	0.13	22.84	10.60	2.00	2.32	»	98.91	16
42	5	44.58	4.50	6.97	1.52	12.78	0.17	13.37	10.92	2.11	1.54	»	98.47	22
43	6	45.36	1.43	5.95	0.75	9.22	0.17	16.59	14.35	2.51	2.12	»	98.45	44
44	8	43.39	3.33	4.07	1.13	6.59	0.10	28.99	9.87	1.08	0.65	»	99.19	15
45	9	42.31	0.23	1.46	0.66	3.92	0.07	31.57	17.80	0.85	0.16	»	99.01	27

Примечание. Прогретые расплавные включения в хромшпинелидах из триасовых отложений района устья р. Оленек (№ 1—15, пр. 3и/10-8), побережья Оленевского залива (№ 16—35, пр. 8и/10-6) и нижнего течения р. Лена (№ 36—38, пр. 3е/10-18; № 39—45, пр. 1и/10-23) на северо-востоке Сибирской платформы. 16—26 — стекла прогретых гомогенизированных расплавных включений. Все остальные данные — расчетные валовые составы прогретых включений, содержащих недоплавленные фазы оливина и новообразованные кристаллики клинопироксена. н. а. — содержание элемента не анализировалось. Составы включений установлены с помощью микрорентгеноспектрального метода с использованием микроанализатора JEOL JXA-8100 SuperProbe.

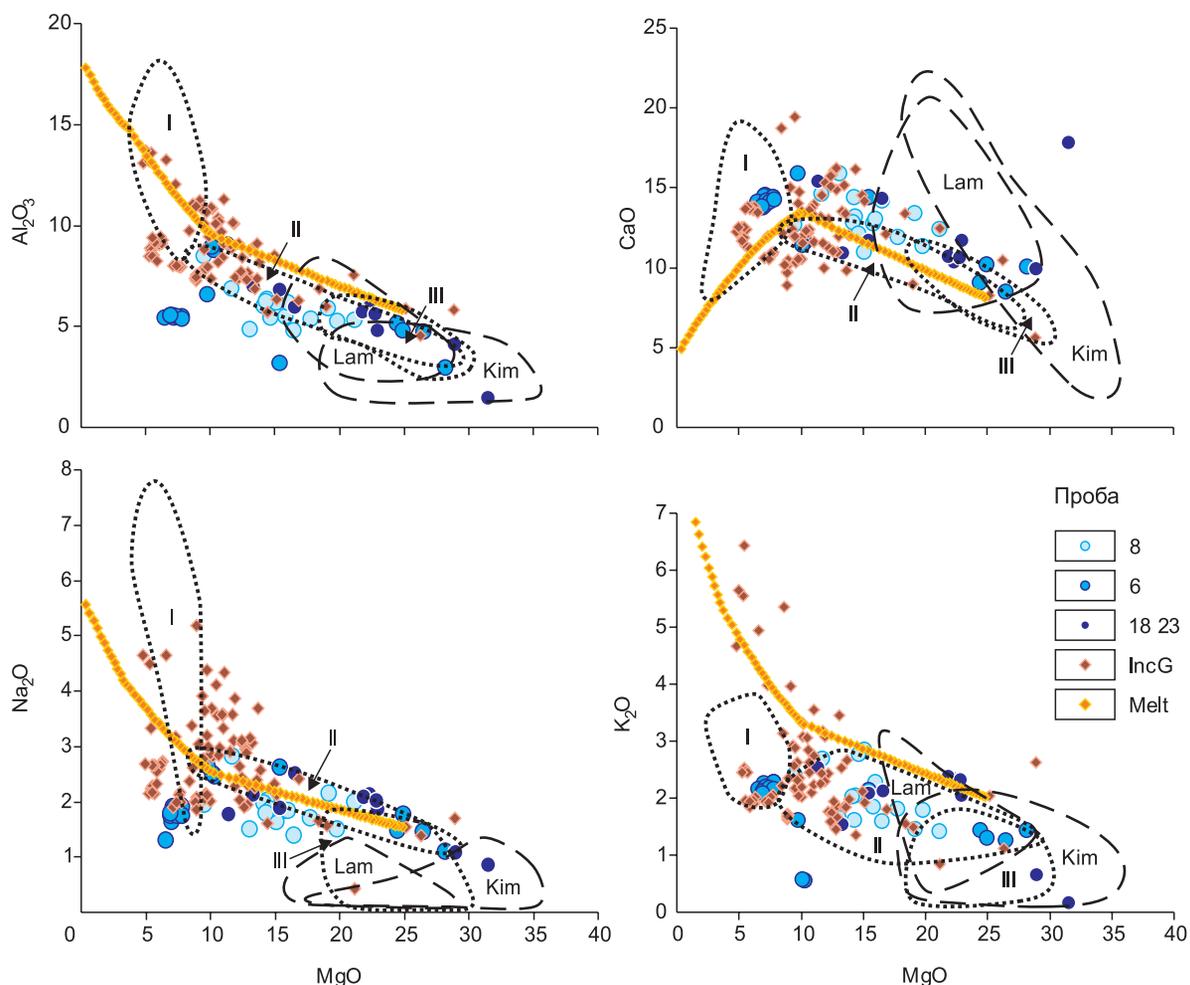


Рис. 7. Составы (мас. %) расплавных включений в хромшпинелиде.

8, 6, 18 23 — пробы из участков в устье р. Оленек (8), на побережье Оленекского залива (6) и в нижнем течении Лены (18 23), IncG — расплавные включения в хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива, Melt — изменение состава пикритового расплава, согласно результатам расчетного моделирования с помощью программы PLUTON [Лавренчук, 2004], на основе данных по высокомагнезиальным расплавным включениям в хромшпинелидах из дунитов Гулинского массива [Симонов и др., 2017]. I—III — см. на рис. 6. Поля пород Сибирской платформы: Kim — кимберлиты; Lam — лампрофиров [GEOROC...].

кую в целом к экспериментальным и расчетным (тренды эволюции расплавов) данным по магматизму Гулинского массива. В то же время на этих диаграммах данные по включениям из хромшпинелидов отдельных участков имеют определенные отличия. Хорошо видно, что включения из хромшпинелида побережья Оленекского залива наиболее близки к данным по Гулинскому массиву: составы включений в дунитах и щелочных пород. В случае районов в устье р. Оленек и в нижнем течении Лены большинство данных по включениям в хромшпинелиде располагаются фактически в полях гомогенизированных расплавных включений в оливине меймечитов. При этом наиболее магнезиальные включения в хромшпинелидах этих участков тесно ассоциируют с составами лампрофиров и кимберлитов Сибирской платформы (см. рис. 7).

На петрохимических диаграммах (см. рис. 6, 7) с целью сравнительного анализа показаны точки расплавных включений в хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива, составы которых можно увидеть в Приложении № 3 (см. доп. материалы).

ГЕОХИМИЯ РАСПЛАВНЫХ ВКЛЮЧЕНИЙ В ХРОМШПИНЕЛИДАХ

С помощью современных методов микроанализа расплавных включений в хромшпинелидах были рассмотрены некоторые особенности распределения редких и редкоземельных элементов в магматических системах северной части Сибирской платформы (табл. 4). Наиболее достоверные и представитель-

Таблица 4. Содержание редких, редкоземельных элементов (г/т) и воды (мас. %) в прогретых расплавленных включениях в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы

Элемент	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Th	1.22	5.63	1.80	3.08	5.78	8.22	6.52	7.76	6.95	8.06
Rb	9.5	43.9	11.1	21.3	40.2	68.1	52.5	60.8	59.0	75.3
Ba	89	411	118	241	454	1145	798	938	869	1135
Sr	96	448	162	449	853	1600	1192	1545	1444	1639
La	14.5	65.2	20.0	34.2	62.6	90.7	80.1	101.1	90.3	95.9
Ce	23.0	111.5	40.6	59.5	117.6	186.4	178.7	216.5	205.5	211.6
Pr	2.5	12.3	4.4	6.6	13.3	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
Nd	10.3	51.4	17.8	25.8	52.3	89.0	85.2	101.3	81.8	99.8
Sm	1.69	8.65	3.30	4.23	8.80	17.11	16.68	19.20	17.79	16.62
Eu	0.63	2.46	1.04	1.44	2.28	5.05	5.07	4.96	5.03	4.78
Gd	1.07	5.43	2.33	2.87	5.94	14.55	13.78	15.59	12.89	11.29
Tb	0.15	0.65	0.31	0.38	0.65	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
Dy	0.70	3.32	1.50	1.79	3.46	8.25	8.16	8.72	8.56	6.65
Ho	0.11	0.53	0.26	0.28	0.56	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
Er	0.28	1.45	0.50	0.75	1.58	3.77	3.87	3.90	3.94	3.25
Tm	0.03	0.15	0.04	0.08	0.17	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
Yb	0.06	0.79	0.32	0.12	0.85	2.01	2.19	2.01	2.22	1.82
Lu	0.03	0.07	0.05	0.07	0.08	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.
Y	2.7	12.1	5.9	7.0	12.7	30.5	29.4	31.4	29.3	23.0
Zr	69	259	148	171	261	595	650	644	710	747
Nb	18	72	29	49	81	109	97	124	125	102
Ta	0.95	4.00	1.40	3.04	5.20	4.84	4.34	5.44	5.70	4.91
H ₂ O	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	н.а.	0.49	0.76	0.34	0.29	0.20

Примечание. 1—5 — данные по прогретым расплавленным включениям в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы (пр. 8и/10-6 из участка побережья Оленекского залива). Содержания редких и редкоземельных элементов в прогретых расплавленных включениях в хромшпинелиде из осадочных отложений верхнего триаса северо-востока Сибирской платформы установлены с помощью масс-спектрометра с индуктивно связанной плазмой (Thermo Scientific ELEMENT XR, ICP-MS), соединенного с эксимерным лазером (RESolution, CompexPro 102, Coherent). С целью сравнительного анализа приведены оригинальные данные по расплавленным включениям в хромшпинелидах из Гулинского массива (6—10), полученные методом вторично-ионной масс-спектрометрии на ионном микроанализаторе IMS-4f в Институте микроэлектроники и информатики РАН (г. Ярославль) [Симонов и др., 2016а]. н. а. — элемент не анализировался.

ные данные по редким и редкоземельным элементам для расплавленных включений в хромшпинелиде были получены для пр. 8и/10-6 из участка побережья Оленекского залива.

В ходе исследований использовались преимущественно соотношения редких элементов, устойчивых при вторичных процессах: Y, Zr, Nb (рис. 8).

На диаграмме распределения иттрия и циркония хорошо видно, что данные по расплавленным включениям в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы и из дунитов Гулинского массива явно различаются. Первые с минимальными содержаниями элементов тесно ассоциируют с полями данных по кимберлитам Сибирской платформы и лампрофитам сибирских траппов. Вторые содержат значительно больше иттрия и циркония и располагаются рядом с данными по включениям в оливине из меймечитов. При этом по повышенному содержанию Y они соответствуют плюмовым магматическим системам типа OIB. Данные по пикритам Маймеча-Котуйской провинции наиболее близки к включениям в оливине из меймечитов севера Сибирской платформы, но по значениям иттрия соответствуют кимберлитам (см. рис. 8).

Все данные по рассмотренным расплавленным включениям обладают в целом повышенными значениями Nb/Y и Zr/Y, располагаясь на границе между расплавами с плюмовым и без плюмового источников. При этом отношения Nb/Y во включениях из минералов Гулинского массива и меймечитов одинаковы и соответствуют данным по OIB в отличие от включений в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы (а также пикритов) с относительно высокими значениями Nb/Y, наиболее характерными для кимберлитов и лампрофитов Сибирской платформы (см. рис. 8).

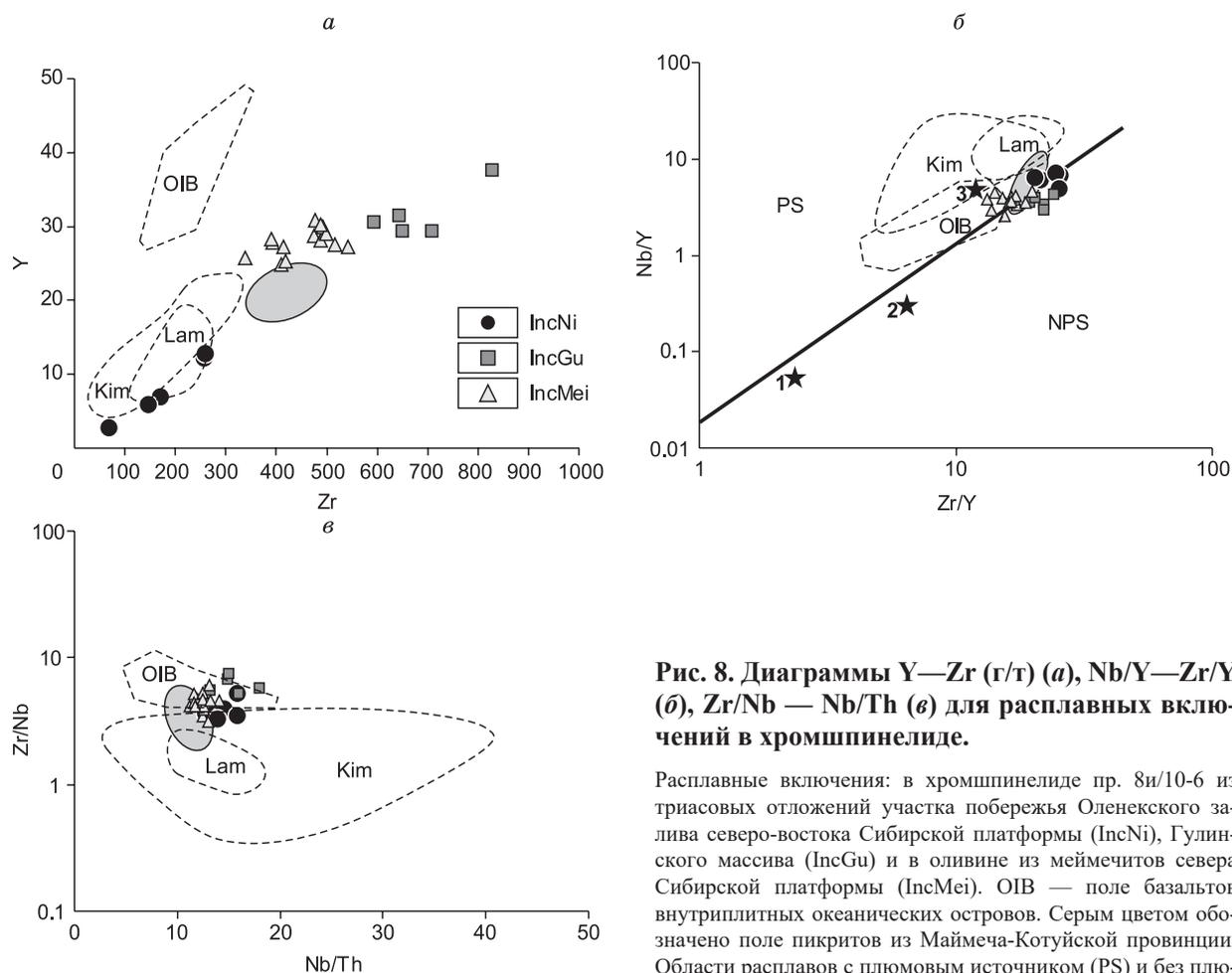


Рис. 8. Диаграммы Y—Zr (г/г) (а), Nb/Y—Zr/Y (б), Zr/Nb — Nb/Th (в) для расплавных включений в хромшпинелиде.

Расплавные включения: в хромшпинелиде пр. 8и/10-6 из триасовых отложений участка побережья Оленекского залива северо-востока Сибирской платформы (IncNi), Гулинского массива (IncGu) и в оливине из меймечитов севера Сибирской платформы (IncMei). OIB — поле базальтов внутриплитных океанических островов. Серым цветом обозначено поле пикритов из Маймеча-Котуйской провинции. Области расплавов с плюмовым источником (PS) и без плюмового источника (NPS). Звезды: DM — верхняя деплетированная мантия (1), EN — обогащенный компонент (2), REC — рециклированный компонент (3). Остальные усл. обозн. см. на рис. 7. Рисунок составлен с использованием данных из работ [Condie, 2005; Соболев и др., 2009; Васильев и др., 2017; GEOROC...].

ванная мантия (1), EN — обогащенный компонент (2), REC — рециклированный компонент (3). Остальные усл. обозн. см. на рис. 7. Рисунок составлен с использованием данных из работ [Condie, 2005; Соболев и др., 2009; Васильев и др., 2017; GEOROC...].

По соотношениям Zr/Nb—Nb/Th включения в хромшпинелидах из Гулинского массива связаны исключительно с полем OIB. При этом включения в минералах из меймечитов и из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы (а также пикриты) обладают свойствами как OIB, так и кимберлитов. Данные по лампрофирам сибирских траппов располагаются в поле кимберлитов Сибирской платформы (см. рис. 8).

Спектры распределения редкоземельных элементов для прогретых расплавных включений в хромшпинелиде из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы характеризуются явным отрицательным наклоном с резким обогащением легкими лантаноидами по отношению к тяжелым и в общем хорошо согласуются с данными по кимберлитам Сибирской платформы, попадая частично в поле лампрофиров сибирских траппов. При этом включения в хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива, отличаясь значительно более высокими содержаниями редкоземельных элементов в целом, практически полностью совпадают с данными по расплавным включениям в оливине из меймечитов Маймеча-Котуйской провинции, перекрывая в области легких лантаноидов поле пикритов из района Гулинского массива (рис. 9).

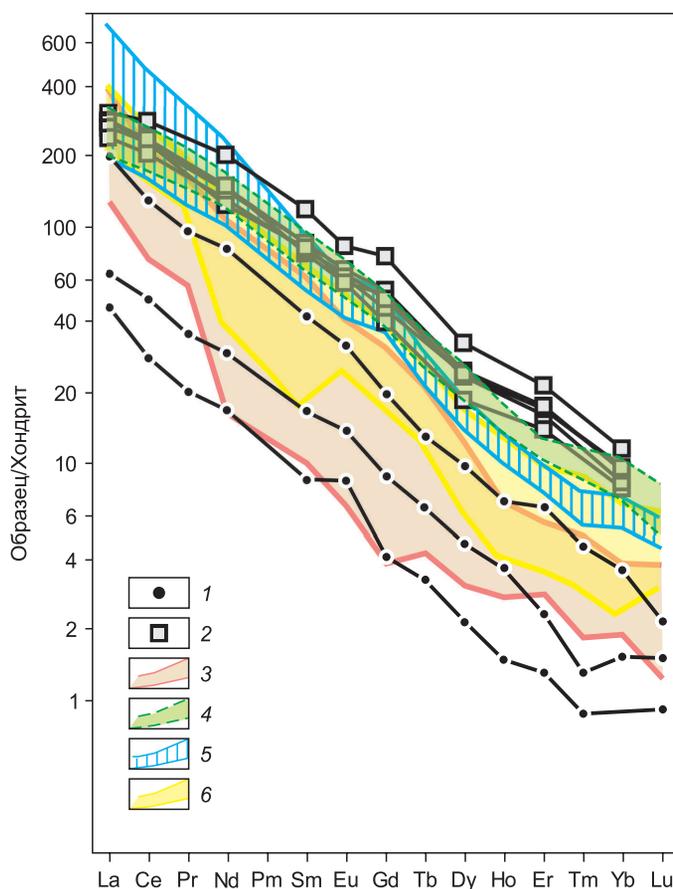
ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ УСЛОВИЯ МАГМАТИЧЕСКИХ СИСТЕМ

Результаты исследования расплавных включений позволили рассмотреть с помощью известных программ COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004], PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018] и минералогических геотермометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] физико-химические условия формирования магматических комплексов, послуживших основой для образования хромшпинелидов из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы.

При моделировании с помощью программы COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004] особенности эволюции физико-химических параметров формирования хромшпинелидов северо-востока Сибирской

Рис. 9. Распределение редкоземельных элементов в расплавных включениях в хромшпинелиде.

1, 2 — расплавные включения в хромшпинелиде: пр. 8и/10-6 из триасовых отложений участка побережья Оленекского залива северо-востока Сибирской платформы (1) и Гулинского массива (2); 3–6 — поля данных: кимберлиты Сибирской платформы (3), включения в оливине из меймечитов севера Сибирской платформы (4), пикриты района Гулинского массива (5), лампрофиры сибирских траппов (6). Значения элементов нормированы к составу хондрита, согласно [Boynton, 1984]. Рисунок составлен с использованием данных из работ [Соболев и др., 2009; Васильев и др., 2017; GEOROC...].



платформы рассматривались в условиях декомпрессионной равновесной магматической системы. Основой расчетов послужили валовые (пикритовые, наиболее магнезиальные) составы включений в хромшпинелидах из отдельных участков опробования триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы: приустьевой части р. Оленек (участок № 1, содержание MgO во включении 21.17 мас. %), побережья Оленекского залива (№ 2, MgO = 26.51 мас. %), района нижнего течения р. Лена (№ 3, MgO = 28.99 мас. %). Применялся буфер QFM. Начальное (максимальное) давление 10 кбар, при dP/dF (кбар/мол. %) — 0.1 кбар. Содержание воды принималось согласно результатам непосредственных анализов прогретых расплавных включений в хромшпинелиде из гипербазитов Сибирской платформы — 0.5 мас. % [Симонов и др., 2017].

Была выяснена (рис. 10) разная возможная температура кристаллизации минералов для отдельных участков: приустьевой части р. Оленек (оливин — 1400—1160 °С, начало образования клинопироксена — 1265 °С), побережья Оленекского залива (оливин — 1480—1150 °С, клинопироксен — 1220 °С), района нижнего течения Лены (оливин — 1480—1170 °С, клинопироксен — 1275 °С).

Как показано выше, при моделировании был использован широкий интервал давления — 10—2 кбар. В результате получены достаточно большие диапазоны возможных температур кристаллизации минералов. При этом, сравнивая реальные (участок № 1, $F_o = 83.54—91.38$; № 2, $F_o = 83.43—91.83$; № 3, $F_o = 77.13—93.73$) и расчетные составы (№ 1, $F_o = 89.25—91.37$; № 2, $F_o = 84.33—91.80$; № 3, $F_o = 88.79—93.71$) оливинов во включениях, можно оценить реальные давления и температуру процессов кристаллизации оливина для различных участков детального опробования триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы (средние значения): 4.45 кбар, 1230 °С (№ 1), 4.5 кбар, 1220 °С (№ 2), 4.05 кбар, 1240 °С (№ 3).

С помощью программы PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011] (и входящих в ее состав моделей [Nielsen, 1985; Ariskin, Nikolaev, 1996]) при использовании данных по составам магнезиальных прогретых расплавных включений рассчитана температура ликвидусной кристаллизации рассмотренных хромшпинелидов в ультраосновных (пикритовых) магматических системах северо-востока Сибирской платформы. Как и в случае программы COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004] были использованы данные по расплавным включениям в хромшпинелидах из отдельных участков опробования триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы: приустьевой части р. Оленек (участок № 1, содержание MgO во включении 21.17 мас. %), побережья Оленекского залива (№ 2, MgO = 26.51 мас. %), района нижнего течения Лены (№ 3, MgO = 28.99 мас. %). В ходе расчетов применялся буфер QFM. Давление задавалось 4.5 кбар, что соответствует результатам моделирования по программе COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004], показавшим, что образование микрокристалликов оливина во включениях в хромшпинелидах происходило при давлениях около 4.0—4.5 кбар (см. выше). Соответственно, сам хромшпинелид-хозяин должен был формироваться при давлениях не менее 4.5 кбар. Содержание воды принималось согласно непосредственным анализам прогретых расплавных включений в хромшпинели-

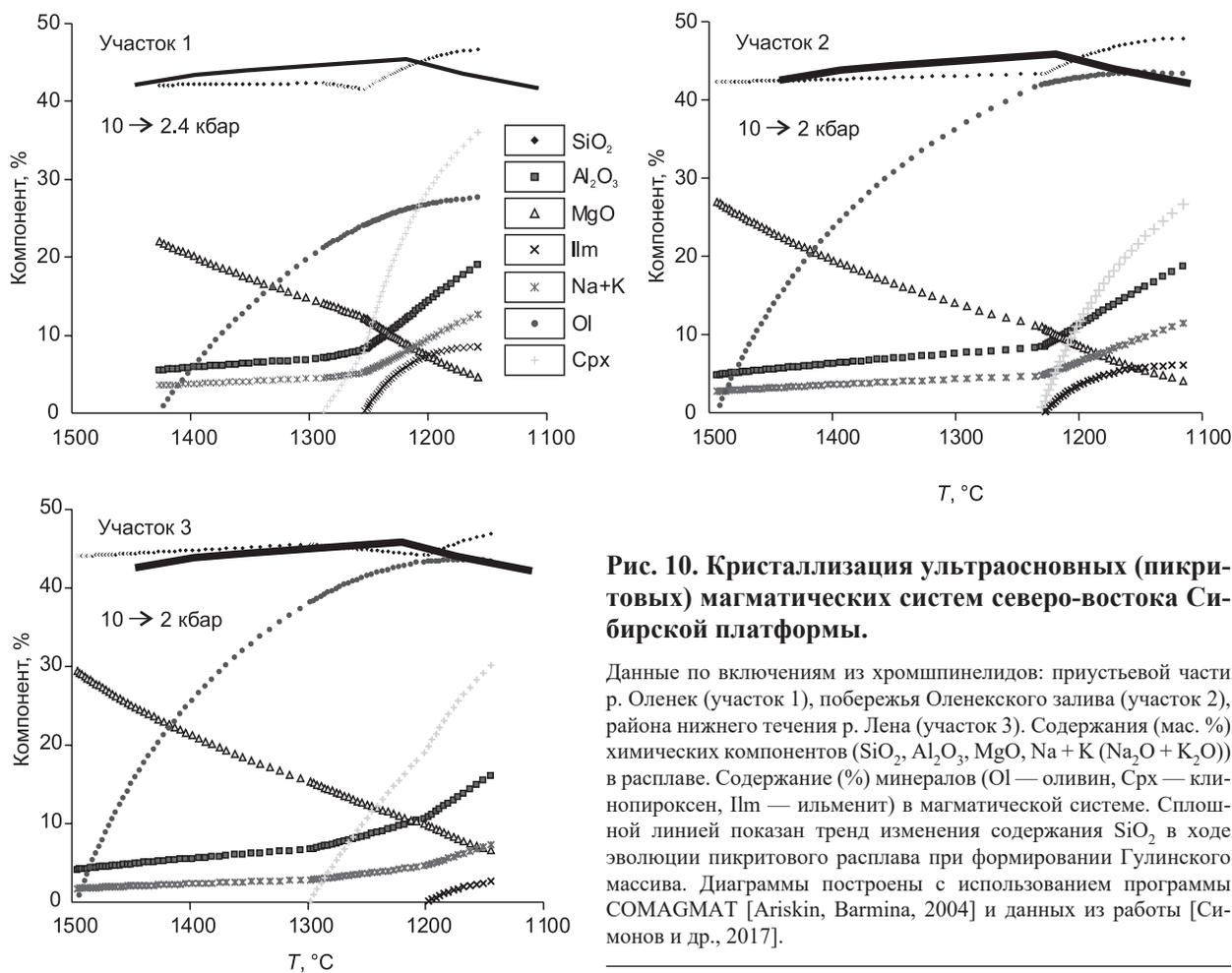


Рис. 10. Кристаллизация ультраосновных (пикритовых) магматических систем северо-востока Сибирской платформы.

Данные по включениям из хромшпинелидов: приустьевой части р. Оленек (участок 1), побережья Оленекского залива (участок 2), района нижнего течения р. Лена (участок 3). Содержания (мас. %) химических компонентов (SiO_2 , Al_2O_3 , MgO , $\text{Na} + \text{K}$ ($\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$)) в расплаве. Содержание (%) минералов (Ol — оливин, Crx — клинопироксен, Ilm — ильменит) в магматической системе. Сплошной линией показан тренд изменения содержания SiO_2 в ходе эволюции пикритового расплава при формировании Гулинского массива. Диаграммы построены с использованием программы COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004] и данных из работы [Симонов и др., 2017].

дах из гипербазитов Сибирской платформы, скорректированным согласно расчетам по программе COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004] (в условиях декомпрессионной равновесной магматической системы с начальным давлением 10 кбар) при давлениях около 4.5 кбар, — 1 мас. %. В связи с тем, что изученные включения располагаются в хромшпинелидах, для исключения возможного воздействия матрицы минерала-хозяина на анализы хрома во включении при расчетах задавались постоянные содержания $\text{Cr}_2\text{O}_3 = 0.2$ мас. %.

В результате была определена температура ликвидусной кристаллизации хромшпинелидов из осадочных отложений на различных опробованных участках: приустьевой части р. Оленек (около 1324—1318 °C), побережья Оленекского залива (около 1295 °C), района нижнего течения Лены (около 1275 °C).

Анализ составов оливина в расплавных включениях и хромшпинелидов-хозяинов позволил рассчитать с помощью Ol-Sp геотермометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] температуру минералообразующих процессов в магматических системах, сформировавших хромшпинелиды из различных опробованных участков. Были выяснены следующие температуры образования оливина: приустьевой части р. Оленек (участок № 1, 1425—1165 °C), побережья Оленекского залива (№ 2, 1420—1375 °C), района нижнего течения Лены (№ 3, 1510—1345 °C). Эти данные хорошо согласуются с результатами моделирования по программе COMAGMAT температурного режима кристаллизации оливина: участок № 1 — 1400—1160 °C; № 2 — 1480—1150 °C; № 3 — 1480—1170 °C.

При исследовании многофазовых расплавных включений в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы были выяснены составы включений и находящихся в них клинопироксенов. В результате оказалось возможным оценить условия кристаллизации клинопироксена с помощью программы WinPLtb, основанной на соотношениях составов пироксена и расплава (clinopyroxene-liquid thermobarometry) [Yavuz, Yildirim, 2018]. При этом составы расплава задавались согласно данным по валовым составам прогретых включений в хромшпинелидах. В итоге были определены следующие *PT*-параметры кристаллизации клинопироксена из разных участков пробоотбора: приустьевой части р. Оленек (3.1—1.0 кбар, 1245—1220 °C), побережья Оленекского залива (3.1—1.5 кбар, 1285—1200 °C), района нижнего течения р. Лена (3.2—2.0 кбар, 1250—1205 °C).

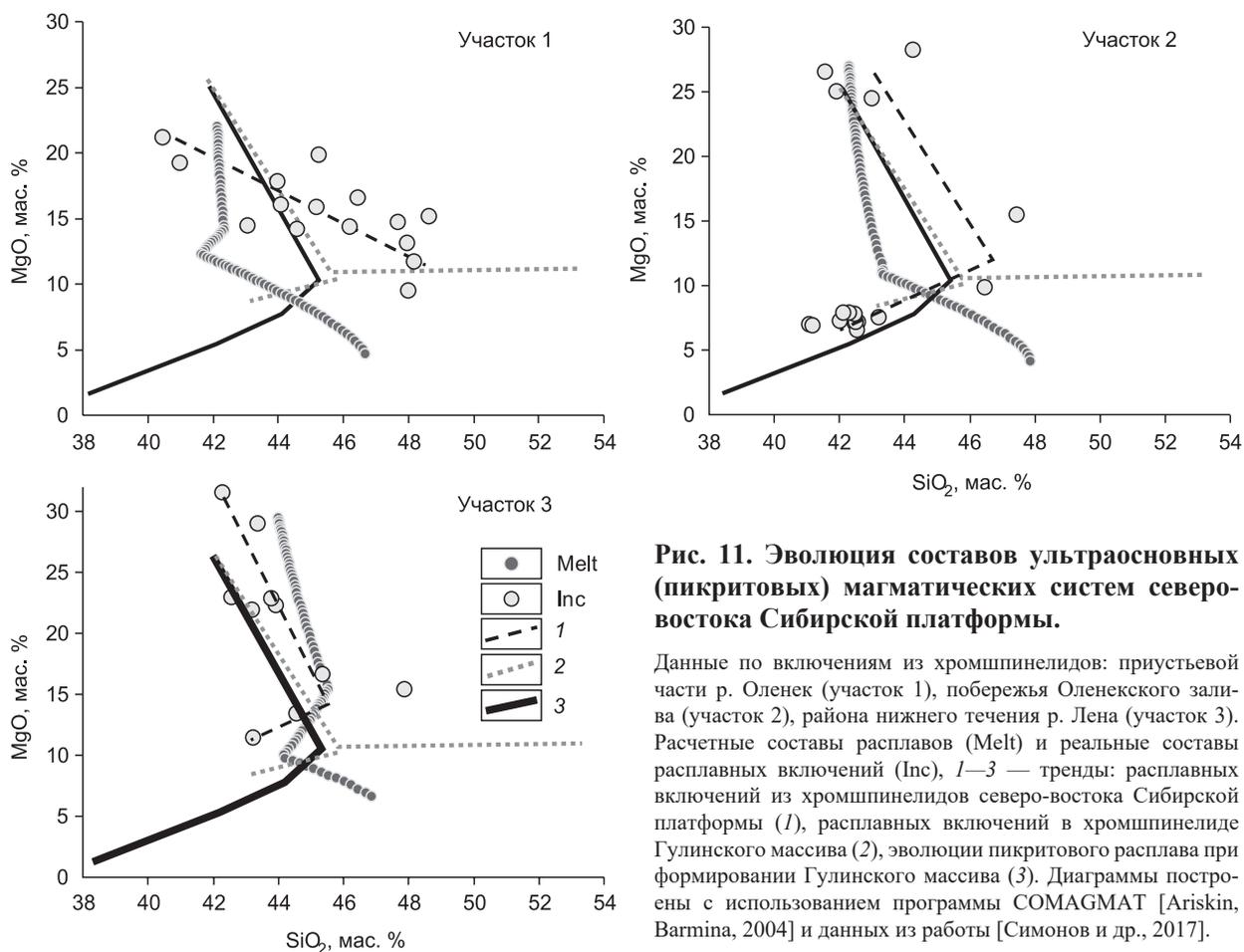


Рис. 11. Эволюция составов ультраосновных (пикритовых) магматических систем северо-востока Сибирской платформы.

Данные по включениям из хромшпинелидов: приустьевой части р. Оленек (участок 1), побережья Оленекского залива (участок 2), района нижнего течения р. Лена (участок 3). Расчетные составы расплавов (Melt) и реальные составы расплавных включений (Inc), 1–3 — тренды: расплавных включений из хромшпинелидов северо-востока Сибирской платформы (1), расплавных включений в хромшпинелиде Гулинского массива (2), эволюции пикритового расплава при формировании Гулинского массива (3). Диаграммы построены с использованием программы COMAGMAT [Ariskin, Varina, 2004] и данных из работы [Симонов и др., 2017].

На рисунке 10 хорошо видно, что в ходе заметного увеличения скорости кристаллизации клинопироксена в магматических системах северо-востока Сибирской платформы (при температуре ниже 1250 °С) начинается рост содержания SiO₂, в отличие от расплавов Гулинского массива, для которого при этой температуре SiO₂ падает. Таким образом, расчетный реверсивный тренд (связанный с падением кремнезема), установленный для магматизма Гулинского массива [Симонов и др., 2017], в случае магм, из которых образовались хромшпинелиды триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы, практически отсутствует.

Отличия расчетных трендов эволюции магм Гулинского массива и северо-востока Сибирской платформы хорошо видны на рис. 11. При этом тренды изменения составов расплавных включений в хромшпинелидах из этих комплексов обладают некоторыми общими чертами: равномерное падение MgO (от 30—20 до ~12 мас. %) с ростом SiO₂. Для участков на побережье Оленекского залива и района нижнего течения Лены наблюдается даже некоторое подобие реверсивных трендов, совпадающих с данными для Гулинского массива (см. рис. 11).

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Масштабное изучение отложений верхнего триаса на северо-востоке Сибирской платформы показало, что задача определения коренных источников хромшпинелидов является важной с точки зрения локализации источников поступления обломочного материала в осадочный коллектор, а также определения направлений сноса обломочного материала в период формирования алмазоносных отложений. Как свидетельствуют наши работы, эта проблема может иметь положительное решение с помощью детального анализа монофракций хромшпинелидов и находящихся в них силикатных расплавных включений. Для этого необходимо было провести комплексные исследования с последовательным использованием разных методик. Прежде всего, среди множества проб хромшпинелидов из осадочных отложений верхнего триаса северо-востока Сибирской платформы были выделены хромшпинелиды, содержащие силикатные расплавные включения. Детально изучались составы именно этих хромшпинелидов. На следующем этапе рассматривались фазовые составы расплавных включений в хромшпинелиде и хими-

ческие составы отдельных фаз. Полученные данные позволили определить валовые химические составы расплавных включений, на основе которых рассмотрены особенности эволюции магматических систем и их сходство с эталонными комплексами — породами ультраосновных массивов, меймечитами, кимберлитами, лампрофирами, пикритами и другими. На заключительном этапе исследований проведение расчетного моделирования с использованием информации по расплавным включениям дало возможность установить *PT*-параметры магматических систем, в которых кристаллизовались хромшпинелиды из отложений верхнего триаса северо-востока Сибирской платформы.

Детальный анализ составов хромшпинелидов с расплавными включениями из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы показал, что по соотношениям большинства химических компонентов они в основном соответствуют хромшпинелидам из Гулинского массива и из меймечитов. При этом заметное количество рассмотренных хромшпинелидов попадает в поля составов минералов из концентрически-зональных ультраосновных массивов юго-востока Сибирской платформы, а также из кимберлитов, в том числе и алмазоносных.

В прогретых расплавных включениях в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы содержатся в основном оливин и клинопироксен, составы которых, как показали исследования, содержат полезную генетическую информацию. В частности, оливин наиболее близок по составу к минералам в расплавных включениях в хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива и имеет определенное сходство с оливинами из включений в хромшпинелидах ультраосновного массива Кондер, Сибирская платформа. Клинопироксен из расплавных включений в хромшпинелиде из района нижнего течения Лены в целом соответствует данным по пироксенам в расплавных включениях в хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива.

Результаты исследования расплавных включений в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы имеют большое значение для выяснения физико-химических параметров магматических систем севера Сибирской платформы. Прежде всего, само наличие расплавных включений говорит о магматогенном происхождении рассмотренных хромшпинелидов.

Петрохимические составы силикатных расплавных включений свидетельствуют о сложной истории развития магматических систем, формировавших породы — источники хромшпинелидов из осадочных отложений северо-востока Сибирской платформы. В частности, мы видим участие щелочных (калиевых) расплавов при кристаллизации хромшпинелидов побережья Оленекского залива, свидетельствующее о том, что трубки взрыва калиевых щелочных базитов могли выступать в качестве источника рассмотренных хромитосодержащих осадочных серий, как это предполагалось ранее [Летникова и др., 2014; Николенко и др., 2018]. При этом для всех трех участков опробования есть свидетельства об участии пикритовых расплавов и о последующей их эволюции, близкой в целом к экспериментальным и расчетным (тренды расплавов) данным по магматическим системам Гулинского ультраосновного массива на севере Сибирской платформы. Таким образом, источником изученных хромшпинелидов мог быть как сам этот массив, так и подобные ультраосновные интрузивные комплексы, скрытые в настоящее время осадочными отложениями либо полностью уничтоженные эрозией. В то же время (как это видно по соотношениям Al_2O_3 , CaO , Na_2O , K_2O — MgO), часть данных по включениям в хромшпинелидах из районов в устье р. Оленек и в нижнем течении р. Лена тесно ассоциирует с составами кимберлитов и лампрофилов. В результате нельзя исключать кимберлитовые трубки и лампрофиры в качестве одного из источников изученных хромшпинелидов северо-востока Сибирской платформы.

Данные по геохимии силикатных расплавных включений подтверждают сложность магматических процессов формирования пород, являющихся источниками рассмотренных хромшпинелидов из отложений северо-востока Сибирской платформы. В целом проведенные исследования особенностей распределения редких и редкоземельных элементов в расплавных включениях свидетельствуют о существовании в северной части Сибирской платформы нескольких контрастных магматических систем. Прежде всего, это магмы, формировавшие крупные ультраосновные интрузивные массивы типа Гулинского и имеющие тесную связь с развитием меймечитов и пикритов Маймеча-Котуйской провинции. В то же время включения из хромшпинелидов из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы свидетельствуют о существовании, скорее всего, плюмовых магматических систем, связанных с развитием кимберлитов, а также лампрофилов и(или) других континентальных «горячих точек» со щелочным магматизмом. При этом высокие содержания иттрия и циркония для расплавных включений в минералах меймечитов и Гулинского массива могут быть интерпретированы как формирование этих расплавов при меньшей степени частичного плавления по сравнению с кимберлитами.

Использование данных по составам силикатных расплавных включений при расчетном моделировании с помощью известных программ COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004], PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018], а также Ol-Sp геотермометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] дало возможность определить *PT*-параметры формирования магматических пород, являющихся источниками рассмотренных хромшпинелидов из отложений северо-востока Сибирской плат-

формы, опробованных на различных участках. Прежде всего, была определена температура ликвидусной кристаллизации хромшпинелидов: приустьевой части р. Оленек (участок № 1, около 1324—1318 °С), побережья Оленекского залива (№ 2, около 1295 °С), района нижнего течения Лены (№ 3, около 1275 °С).

Для оливина во включениях в хромшпинелидах были оценены давления и температура процессов кристаллизации (средние значения): 4.45 кбар, 1230 °С (№ 1); 4.5 кбар, 1220 °С (№ 2); 4.05 кбар, 1240 °С (№ 3). В целом выяснены следующие, достаточно широкие интервалы температур образования оливина: приустьевая часть р. Оленек — 1425—1160 °С, побережье Оленекского залива — 1480—1150 °С, район нижнего течения р. Лена — 1510—1170 °С.

В случае клинопироксена из включений в хромшпинелиде установлены следующие *PT*-параметры кристаллизации: приустьевая часть р. Оленек — 3.1—1.0 кбар, 1245—1220 °С, побережье Оленекского залива — 3.1—1.5 кбар, 1285—1200 °С, район нижнего течения р. Лена — 3.2—2.0 кбар, 1250—1205 °С.

В целом необходимо отметить, что основой расчетного моделирования *PT*-условий формирования магматических пород послужили валовые (пикритовые, наиболее магнезиальные) составы включений в хромшпинелидах из отдельных участков опробования триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы (приустьевая часть р. Оленек, побережье Оленекского залива, район нижнего течения р. Лена), которые по содержанию основных компонентов (в частности, на диаграмме Al_2O_3 — MgO) одновременно попадают в четыре поля: кимберлиты, лампрофиры, включения в меймечитах и пикритовые порфириды (см. рис. 7). Привязывать к какой-либо одной ситуации здесь вряд ли возможно. В связи с этим результаты расчетов не распространяются на кимберлиты, лампрофиры, меймечиты и пикриты, а имеют отношение исключительно к отдельным конкретным случаям для каждого из рассмотренных участков опробования триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы, рассмотренным в сравнительном анализе с данными по Гулинскому массиву.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ

1. Экспериментальные исследования и анализ состава силикатных включений в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы (устье р. Оленек, побережье Оленекского залива, нижнее течение р. Лена) свидетельствуют о том, что они являются первичными расплавленными и представляют собой микропорции минералообразующей среды, захваченные хромшпинелидом в процессе его роста из магмы. Таким образом, получены прямые доказательства магматогенного происхождения рассмотренных хромшпинелидов.

2. Изучение хромшпинелидов из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы, содержащих силикатные расплавленные включения, показало разнообразие составов отдельных зерен, соответствующих в одних случаях хромшпинелидам из Гулинского массива и из меймечитов. Другие зерна изученных хромшпинелидов по своему составу близки к минералам из концентрически-зональных ультраосновных массивов юго-востока Сибирской платформы, а также из кимберлитов.

3. Анализ составов кристаллических фаз в расплавленных включениях в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы говорит о том, что оливин и клинопироксен наиболее близки к минералам в расплавленных включениях в хромшпинелиде из дунитов Гулинского массива. Оливин также имеет сходство с оливинами из включений в хромшпинелиде из массива Кондер, Сибирская платформа.

4. В результате изучения химического состава расплавленных включений видно участие щелочных (калиевых) магм при кристаллизации хромшпинелидов из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы, показывающее, что трубки взрыва калиевых щелочных базитов могли выступать в качестве источника хромшпинелидов, как это предполагалось ранее [Николенко и др., 2018]. При этом преобладают свидетельства развития магматических систем, близких к расплавам Гулинского ультраосновного массива на севере Сибирской платформы. Часть полученных по включениям данных показывает близость с составами кимберлитов и лампрофиров.

5. Исследования особенностей распределения редких и редкоземельных элементов в расплавленных включениях в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы свидетельствуют о существовании нескольких магматических систем. Прежде всего, это магмы, формировавшие ультраосновные массивы типа Гулинского и имеющие тесную связь с развитием меймечитов и пикритов Маймеча-Котуйской провинции. Также это плюмовые магматические системы, связанные с развитием кимберлитов, лампрофиров и(или) других континентальных «горячих точек».

6. В целом результаты анализа состава (петрохимия и особенности распределения редких и редкоземельных элементов) расплавленных включений в рассмотренных хромшпинелидах свидетельствуют о возможности существования нескольких типов первичных источников хромшпинелидов северо-востока Сибирской платформы, что подтверждает полученные ранее данные [Соболев и др., 2013; Николенко и др., 2018] о гетерогенном характере отложений алмазоносного карнийского яруса верхнего триаса.

7. Расчетное моделирование с помощью известных программ (COMAGMAT [Ariskin, Barmina, 2004], PETROLOG [Danyushevsky, Plechov, 2011], WinPLtb [Yavuz, Yildirim, 2018], а также Ol-Sp геотермометров [Wan et al., 2008; Coogan et al., 2014] на основе данных по расплавленным включениям в хромшпинелидах из триасовых отложений северо-востока Сибирской платформы позволило выяснить *PT*-параметры кристаллизации минералов магматических пород, являющихся источниками рассмотренных хромшпинелидов. Определена температура ликвидусной кристаллизации хромшпинелидов (1324—1275 °С), различающаяся для отдельных участков детальных исследований: приустьевая часть р. Оленек (около 1324—1318 °С), побережье Оленекского залива (около 1295 °С), район нижнего течения р. Лена (около 1275 °С). Установлены параметры образования оливина (около 4.5—4.1 кбар, 1510—1150 °С) и клинопироксена (3.2—1.0 кбар, 1285—1200 °С) во включениях в хромшпинелидах.

Работа выполнена в рамках государственного задания ИГМ СО РАН при поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации, договора № 14.Y26.31.0029, гранта РФФИ (18-45-140027).

ЛИТЕРАТУРА

Бакуменко И.Т. Процессы магматического петрогенезиса по данным изучения включений минералообразующих сред // Геология и геофизика, 1986 (7), с. 125—133.

Васильев Ю.Р., Золотухин В.В. Петрология ультрабазитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса. Новосибирск, Наука, 1975, 270 с.

Васильев Ю.Р., Гора М.П. Геология меймечитов севера Сибирской платформы и некоторые проблемы их генезиса // ДАН, 2012, т. 445, № 3, с. 299—302.

Васильев Ю.Р., Гора М.П., Кузьмин Д.В. Меймечит-фоидитовый вулканизм Полярной Сибири. Новосибирск, Изд-во СО РАН, 2017, 80 с.

Гаранин В.К., Бовкун А.В., Гаранин К.В., Ротман А.Я., Серов И.В. Микрораскристаллические оксиды из кимберлитов и родственных им пород России. М., ГЕОС, 2009, 498 с.

Граханов С.А., Зарукин А.О., Богуш И.Н., Ядренкин А.В. Открытие верхнетриасовых россыпей алмазов в акватории Оленекского залива моря Лаптевых // Отечественная геология, 2009, № 1, с. 53—61.

Граханов С.А., Смелов А.П., Егоров К.Н., Голубев Ю.К. Осадочно-вулканогенная природа основания карнийского яруса — источника алмазов северо-востока Сибирской платформы // Отечественная геология, 2010, № 5, с. 3—12.

Добрецов Н.Л., Симонов В.А., Котляров А.В., Карманов Н.С. Физико-химические параметры магматизма вулканов Уксичан и Ичинский (Срединный хребет Камчатки): данные по расплавленным включениям // Геология и геофизика, 2019, т. 60 (10), с. 1353—1383.

Егоров О.С. Ийолит-карбонатитовый плутонизм. Л., Недра, 1991, 260 с.

Коненко В.Ф. Петрология пироксенитов Гулинского массива и некоторые вопросы их генезиса // Минералогия и петрохимия интрузивных комплексов Сибири. Новосибирск, Наука, 1982, с. 164—179.

Королюк В.Н., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Нигматулина Е.Н. О точности электронно-зондового анализа породообразующих минералов на микроанализаторе JXA-8100 // Геология и геофизика, 2008, т. 49 (3), с. 221—225.

Лавренчук А.В. Программа для расчета внутрикамерной дифференциации основной магмы «PLUTON» // Тезисы докладов Второй Сибирской Международной конференции молодых ученых по наукам о Земле. Новосибирск, 2004, с. 105—106.

Летникова Е.Ф., Лобанов С.С., Похиленко Н.П., Изох А.Э., Николенко Е.И. Источники поступления обломочного материала в карнийский алмазоносный горизонт северо-востока Сибирской платформы // ДАН, 2013, т. 451, № 2, с. 175—178.

Летникова Е.Ф., Изох А.Э., Николенко Е.И., Похиленко Н.П., Шелестов В.О., Джен Х., Лобанов С.С. Позднетриасовый этап магматической активности высококалийного трахитового вулканизма северо-востока Сибирской платформы: свидетельства осадочной летописи // ДАН, 2014, т. 459, № 3, с. 327—331.

Магматические горные породы. Т. 1 / Ред. О.А. Богатиков. М., Наука, 1983, 766 с.

Магматогенная кристаллизация по данным изучения включений расплавов / Под ред. В.С. Соболева, В.П. Костюка. Новосибирск, Наука, 1975, 232 с.

Николенко Е.И., Логвинова А.М., Изох А.Э., Афанасьев В.П., Олейников О.Б., Биллер А.Я. Ассоциация хромшпинелидов из верхнетриасовых гравелитов северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (10), с. 1680—1700.

Петрографический кодекс России / Под ред. О.А. Богатикова, О.В. Петрова, А.Ф. Морозова. СПб, Изд-во ВСЕГЕИ, 2009, 194 с.

Проскурнин В.Ф., Виноградова Н.П., Гавриш А.В., Наумов М.В. Признаки explosивно-обломочного генезиса алмазоносного карнийского горизонта Усть-Оленекского района (петрографо-геохимические данные) // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (6), с. 698—711.

Симонов В.А. Петрогенезис офиолитов (термобарогеохимические исследования). Новосибирск, ОИГГМ СО РАН, 1993, 247 с.

Симонов В.А., Ковязин С.В. Условия генезиса перидотитов Центральной Атлантики (данные по расплавленным включениям) // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Материалы третьей международной конференции. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 2009, т. 2, с. 193—195.

Симонов В.А., Шарков Е.В., Ковязин С.В. Петрогенезис Fe-Ti интрузивных комплексов в районе Сьерра-Леоне, Центральная Атлантика // Петрология, 2009а, т. 17, № 5, с. 521—538.

Симонов В.А., Шеленаев Р.А., Котляров А.В. Физико-химические параметры формирования расслоенного габбро-гипербазитового комплекса в офиолитах Южной Тувы // Ультрабазит-базитовые комплексы складчатых областей и связанные с ними месторождения. Материалы Третьей Международной конференции. Екатеринбург, ИГГ УрО РАН, 2009б, т. 2, с. 195—198.

Симонов В.А., Приходько В.С., Ковязин С.В. Условия формирования платиноносных ультраосновных массивов юго-востока Сибирской платформы // Петрология, 2011, т. 19, № 6, с. 579—598.

Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С. Физико-химические параметры кристаллизации дунитов Гулинского ультраосновного массива (Маймеча-Котуйская провинция) // ДАН, 2015, т. 464, № 3, с. 341—345.

Симонов В.А., Васильев Ю.Р., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С. Петрогенезис дунитов Гулинского ультраосновного массива (север Сибирской платформы) // Геология и геофизика, 2016а, т. 57 (12), с. 2153—2177.

Симонов В.А., Пучков В.Н., Приходько В.С., Ступаков С.И., Котляров А.В., Карманов Н.С., Степанов А.С. Физико-химические параметры кристаллизации дунитов Нижнетагильского платиноносного массива (Средний Урал) // Геология и геофизика, 2016б, т. 57 (6), с. 1106—1134.

Симонов В.А., Приходько В.С., Васильев Ю.Р., Котляров А.В. Физико-химические условия кристаллизации пород ультраосновных массивов Сибирской платформы // Тихоокеанская геология, 2017, т. 36, № 6, с. 70—93.

Симонов В.А., Котляров А.В., Николенко Е.И., Королюк В.Н. Расплавные включения в хромшпинелидах: источник прямой информации об условиях базит-ультрабазитовых магматических систем северо-востока Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 17. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2019, с. 240—242.

Симонов В.А., Котляров А.В., Васильев Ю.Р., Николенко Е.И., Алиферова Т.А., Шарыгин В.В. Физико-химические условия формирования магматических комплексов — источников хромшпинелидов из триасовых осадочных отложений северо-востока Сибирской платформы // Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту). Вып. 18. Иркутск, ИЗК СО РАН, 2020, с. 344—346.

Симонов В.А., Добрецов Н.Л., Котляров А.В., Карманов Н.С., Боровиков А.А. Особенности кристаллизации минералов на разных стадиях развития магматизма вулкана Горелый (Камчатка): данные по расплавленным и флюидным включениям // Геология и геофизика, 2021, т. 62 (1), с. 103—133.

Соболев А.В. Включения расплавов в минералах как источник принципиальной петрологической информации // Петрология, 1996, т. 4, с. 228—239.

Соболев А.В., Каменецкий В.С., Кононкова Н.Н. Новые данные по петрологии сибирских меймечитов // Геохимия, 1991, № 8, с. 1084—1095.

Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1293—1334.

Соболев В.С., Бакуменко И.Т., Костюк В.П. О возможности использования расплавных включений для петрологических реконструкций // Геология и геофизика, 1976 (5), с. 146—149.

Соболев Н.В., Логвинова А.М. Включения пиропы в хромшпинелидах из кимберлитов и лампроитов и их значение для оценки парагенезиса и глубинности формирования // ДАН, 2004, т. 398, № 6, с. 786—791.

Соболев Н.В., Логвинова А.М., Николенко Е.И., Лобанов С.С. Минералогические критерии алмазоносности верхнетриасовых россыпей северо-восточной окраины Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1162—1178.

Ariskin A.A., Nikolaev G.S. An empirical model for the calculation of spinel-melt equilibria in mafic igneous systems at atmospheric pressure: 1. Chromian spinels // Contrib. Mineral. Petrol., 1996, v. 123 (3), p. 282—292, doi: 10.1007/s004100050156.

- Ariskin A.A., Barmina G.S.** COMAGMAT: Development of a magma crystallization model and its petrologic applications // *Geochem. Int.*, 2004, v. 42 (Supp. 1), p. S1–S157.
- Aulbach S., Viljoen K.** Eclogite xenoliths from the Lace kimberlite, Kaapvaal craton: From convecting mantle source to palaeo-ocean floor and back // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2015, v. 431, p. 274–286.
- Borisova A.Y., Ceuleneer G., Kamenetsky V.S., Arari S., Bějina F., Abily B., Bindeman I.N., Polvé M., de Parseval P., Aigouy T., Pokrovski G.S.** A new view on the petrogenesis of the Oman ophiolite chromitites from microanalyses of chromite-hosted inclusions // *J. Petrol.*, 2012, v. 53 (12), p. 2411–2440.
- Boynton W.V.** Geochemistry of the rare earth elements: meteorite studies // *Rare earth element geochemistry* / Ed. P. Henderson. Amsterdam, Elsevier, 1984, p. 63–114.
- Condie K.C.** High field strength element ratios in Archean basalts: a window to evolving sources of mantle plumes? // *Lithos*, 2005, v. 79, p. 491–504.
- Coogan L.A., Saunders A.D., Wilson R.N.** Aluminum-in-olivine thermometry of primitive basalts: Evidence of an anomalously hot mantle source for large igneous provinces // *Chem. Geol.*, 2014, v. 368, p. 1–10.
- Danyushevsky L.V., Plechov P.Yu.** Petrolog 3: Integrated software for modeling crystallization processes // *Geochem., Geophys., Geosyst.*, 2011, v. 12 (7). Q07021, doi: 10.1029/2011GC003516.
- Elkins-Tanton L.T., Draper D.S., Agee C.B., Jewell J., Thorpe R.I., Hess P.C.** The last lavas erupted during the main phase of the Siberian flood volcanic province: results from experimental petrology // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2007, v. 153, p. 191–209.
- GEOROC**, <http://georoc.mpch-mainz.gwdg.de/georoc/>
- Heinonen J.S., Luttinen A.V.** Mineral chemical evidence for extremely magnesian subalkaline melts from the Antarctic extension of the Karoo large igneous province // *Mineral. Petrol.*, 2010, v. 99, p. 201–217.
- Ionov D.A., Benard A., Plechov P.Y.** Melt evolution in subarc mantle: evidence from heating experiments on spinel-hosted melt inclusions in peridotite xenoliths from the andesitic Avacha volcano (Kamchatka, Russia) // *Contrib. Mineral. Petrol.*, 2011, v. 162, p. 1159–1174.
- Kamenetsky V.S., Crawford A.J., Meffre S.** Factors controlling chemistry of magmatic spinel: an empirical study of associated olivine, Cr-spinel and melt inclusions from primitive rocks // *J. Petrol.*, 2001, v. 42 (4), p. 655–671.
- Kamenetsky V.S., Sobolev A.V., Eggins S.M., Crawford A.J., Argulus R.J.** Olivine-enriched melt inclusions in chromites from low-Ca boninites, Cape Vogel, Papua New Guinea: evidence for ultramafic primary magma, refractory mantle source and enriched components // *Chem. Geol.*, 2002, v. 183, p. 287–303.
- Mitchell R.H.** Kimberlites: mineralogy, geochemistry, and petrology. New York, Plenum Press, 1986, 441 p.
- Nielsen R.L.** EQUIL: a program for the modeling of low-pressure differentiation processes in natural mafic magma bodies // *Comput. Geosci.*, 1985, v. 11 (5), p. 531–546, doi: 10.1016/0098-3004(85)90084-6.
- Schulze D.** Chromite macrocrysts from southern African kimberlites: mantle xenolith sources and post-diamond re-equilibration // *Africa Geosci. Rev.*, 1996, v. 3, p. 203–216.
- Sharygin V.V., Simonov V.A., Vasiliev Yu.R., Kotlyarov A.V.** Can dunites of the Guli massif be a cumulate of olivine-nephelinite magma? Melt inclusions study // *Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits. Proceedings of 36th International Conference, Saint Petersburg State University, 23–26 May 2019. Moscow, GEOKhI RAS, 2019, p. 277–280.*
- Shimizu K., Komiya T., Hirose K., Shimizu N., Maruyama S.** Cr-spinel, an excellent micro-container for retaining primitive melts—implications for a hydrous plume origin for matitites // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 189 (3–4), p. 177–188.
- Sobolev A.V., Danyushevsky L.V.** Petrology and geochemistry of boninites from the north termination of the Tonga trench: Constraints on the generation conditions of primary high-Ca boninite magmas // *J. Petrol.*, 1994, v. 35, p. 1183–1211.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M.** Significance of accessory chrome spinel in identifying serpentinite paragenesis // *Int. Geol. Rev.*, 2005, v. 47 (1), p. 58–64.
- Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., Sobolev A.V.** Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*, 2009, v. 112, p. 701–713.
- Vasiliev Yu.R., Zolotukhin V.V.** The Maimecha-Kotui alkaline-ultramafic province of the northern Siberian Platform, Russia // *Episodes*, 1995, v. 18, p. 155–164.
- Wan Z., Coogan L.A., Canil D.** Experimental calibration of aluminum partitioning between olivine and spinel as a geothermometer // *Am. Mineral.*, 2008, v. 93, p. 1142–1147.
- Yavuz F., Yıldırım D.K.** Windows program for pyroxene-liquid thermobarometry // *Periodico di Mineralogia*, 2018, v. 87, p. 149–172.

*Поступила в редакцию 8 декабря 2020 г.,
принята в печать 27 декабря 2021 г.*