



PREDICTION OF THE PRIMARY SOURCES OF GIANT CLIPPIR DIAMONDS IN THE NORTH OF YAKUTIA BY THE METHOD OF MINERALOGICAL AND GEOCHEMICAL ANALOGY (METHOD 5E DIAGRAMS)

A.S. Ivanov ¹, V.N. Zinchenko², I.V. Ashchepkov ^{3,4}, S.A. Babushkina ⁵✉, O.B. Oleinikov ⁵, P.N. Shelkov ⁶

¹ Saint Petersburg Mining University, 2 21st Line, Saint Petersburg, 199106, Russia

² CATOCA Mining Society LLC, Luanda, Angola

³ Sobolev Institute of Geology and Mineralogy, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 3 Academician Koptug Ave, Novosibirsk 630090, Russia

⁴ Dobretsov Geological Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 6a Sakhyanova St, Ulan-Ude 670047, Republic of Buryatia, Russia

⁵ Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenin Ave, Yakutsk 677007, Republic of Sakha (Yakutia) Russia

⁶ Almazy Zapolyarya LLC, 2 Lipchansky St, Moscow 111674, Russia

ABSTRACT. The finds of giant CLIPPIR-type diamonds in the placers hosted by the Ebelyakh River basin in the north of Yakutia suggest that similar diamonds can be found in the kimberlites of the Anabar region and the nearest northern deposits located within the collisional Khapchan and Daldyn terranes. To predict the discovery of such diamonds, the authors use the 5E diagram method based on the principle of similarity of the compositions of five oxides of satellite minerals (Grt, Cpx, Chr and Ilm) of diamond (DSM) with the reference diagrams for the Karowe pipe (K-6, Botswana) with the composition of those for any other pipe. It was previously shown that the convergence of the DSM compositions of the Karowe and V. Grib (Arkhangelsk diamond province) pipes is 74 %, which might indicate possible presence of CLIPPIR diamonds in the predicted pipe. The application of this technique to two kimberlite pipes of the Anabar region demonstrated that the probability of detecting such diamonds in the Leningrad pipe (Lower Devonian, medium diamond content potential) is 74 %, and in the Malokuonamskaya pipe (Lower Triassic, medium diamond content) is 20 %. A comparison of diagrams 5E and additional PTC – fO₂ diagrams of reconstructed sections of the lithospheric mantle showed their efficiency in predicting favorable conditions of CLIPPIR-type diamond crystallization. It is assumed that formation of such diamonds may occur within the proto-kimberlite magmatic chamber located near the boundary of the lithosphere and associated with the asthenospheric source. It should be surrounded by low-oxidized carbon-rich mantle eclogites and dunites with high pressure and temperature, as well as magnesium-rich ilmenite-chromite metasomatites. The use of the 5E diagram method, as the approach to predict giant CLIPPIR diamonds in poorly diamondiferous kimberlites, might attract investing for exploration to audit the industrial potential of a series of such kimberlites in the Anabar region. Its implementation would significantly increase the efficiency of geological exploration and assessment of the potential of poorly diamondiferous pipes that have been suspended as subeconomic.

KEYWORDS: Anabar shield; kimberlites; geochemistry of diamond satellite minerals; 5E diagram; monomineral thermobarometry; diamond grade; lithospheric mantle section

FUNDING: The study was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation on state assignments IGM SB RAS, Novosibirsk (projects 122041400193-7 and 122041400237-8); DPMGI SB RAS (FUGG-2024-0007 project), Yakutsk; GI SB RAS, Ulan-Ude; and under support of Russian Science Foundation (grants 23-63-10017; 24-27-00411).



EDN: XYEZHT

RESEARCH ARTICLE

Correspondence: Svetlana A. Babushkina, ssta@list.ru

Received: July 20, 2024

Revised: August 12, 2024

Accepted: August 14, 2024

FOR CITATION: Ivanov A.S., Zinchenko V.N., Ashchepkov I.V., Babushkina S.A., Oleinikov O.B., Shelkov P.N., 2024. Prediction of the Primary Sources of Giant CLIPPIR Diamonds in the North of Yakutia by the Method of Mineralogical and Geochemical Analogy (Method 5E Diagrams). *Geodynamics & Tectonophysics* 15 (5), 0782. doi:10.5800/GT-2024-15-5-0782

ПОИСК КОРЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ ГИГАНТСКИХ CLIPPIR АЛМАЗОВ НА СЕВЕРЕ ЯКУТИИ МЕТОДОМ МИНЕРАЛОГО-ГЕОХИМИЧЕСКОЙ АНАЛОГИИ (МЕТОД 5Е ДИАГРАММ)

А.С. Иванов¹, В.Н. Зинченко², И.В. Ащепков^{3,4}, С.А. Бабушкина⁵, О.Б. Олейников⁵, П.Н. Шелков⁶

¹ Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, Васильевский остров, 21 линия, 2, Россия

² Горно-рудное общество КАТОКА, Луанда, Ангола

³ Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, пр-т Академика Коптюга, 3, Россия

⁴ Геологический институт им. Н.Л. Добрецова СО РАН, 670047, Улан-Удэ, ул. Сахьяновой, 6а, Республика Бурятия, Россия

⁵ Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677007, Якутск, пр-т Ленина, 39, Республика Саха (Якутия), Россия

⁶ ООО «Алмазы Заполярья», 111674, Москва, ул. Липчанского, 2, Россия

АННОТАЦИЯ. Находки в россыпях бассейна р. Эбелях (север Якутии) гигантских алмазов CLIPPIR типа предполагают, что подобные алмазы могут быть найдены в кимберлитовых полях Анабарского региона и ближайших северных месторождениях, расположенных в пределах коллизионных Хапчанского и Далдынского террейнов. Для прогнозирования находок подобных алмазов авторы используют метод 5Е диаграмм. Он основан на оценке схожести составов пяти окислов минералов-спутников алмаза с эталонными диаграммами для трубки Карове (К-6, Ботсвана) с составом таковых для любой другой трубки. Ранее было показано, что сходимость составов минералов-спутников алмаза трубок Карове и им. В. Гриба (Архангельская алмазная провинция) составляет 74 %, что может расцениваться как показатель возможного нахождения в трубке CLIPPIR алмазов. Применение этой методики к двум кимберлитовым трубкам Анабарского региона продемонстрировало, что вероятность обнаружения подобных алмазов в трубке Ленинград (нижний девон, убого алмазоносная) составляет 74 %, а в трубке Малокуонамской (нижний триас, полупромышленная алмазоносность) – 20 %. Сопоставление диаграмм 5Е и дополнительных диаграмм РТХ – fO_2 реконструированных разрезов субкратонной литосферной мантии показало их совместную эффективность для прогнозирования благоприятных условий кристаллизации CLIPPIR алмазов. Предполагается, что образование подобных алмазов может происходить внутри протокимберлитового магматического очага, расположенного вблизи границы литосферы и связанного с астеносферным источником. Он должен быть окружен низкоокисленными мантийными эклогитами, богатыми углеродом, и дунитами с высоким давлением и температурой, а также богатыми магнием ильменит-хромитовыми метасоматитами. Применение метода 5Е диаграмм как способа прогнозирования гигантских CLIPPIR алмазов в слабоалмазоносных кимберлитах может привлечь инвестиции в геологоразведочные работы по аудиту промышленного потенциала целого ряда таких кимберлитов в Анабарском регионе. Его реализация может существенно повысить эффективность геологоразведки и оценки потенциала слабоалмазоносных трубок, которые были законсервированы как непромышленные.

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА: Анабарский щит; кимберлиты; геохимия минералов-спутников алмаза; 5Е диаграмма; мономинеральная термобарометрия; содержание алмазов; разрез литосферной мантии

ФИНАНСИРОВАНИЕ: Исследование выполнено при поддержке Минобрнауки РФ по государственным заданиям ИГМ СО РАН, г. Новосибирск (проекты 122041400193-7 и 122041400237-8); ИГАБМ СО РАН (проект FUGG-2024-0007), г. Якутск; ГИ СО РАН, г. Улан-Удэ, и при поддержке Российского научного фонда (гранты 23-63-10017, 24-27-00411).

1. ВВЕДЕНИЕ

В последнее десятилетие мировой алмазный рынок претерпел трансформацию, связанную с добычей особо крупных и высококачественных CLIPPIR алмазов [Smith et al., 2016, 2017] экстремальной стоимости, продающихся на аукционах. Характерно то, что такие алмазы, встречавшиеся изредка в россыпях, сегодня добываются из слабоалмазоносных кимберлитов в основном в Африке – трубки Карове (К-6, Ботсвана) [Moore, 2009; Wudrick et al., 2017; Motsamai et al., 2018] и Летсенг (Лесото) [Bowen et al., 2009; Lock, Dawson, 2013],

и, кроме того, из алмазоносных кимберлитов юга Африки (Cullinan, Venetia, Finsch, Jagersfontein, Voorspoed, Koffiefontein, Victor, Monastery, Mothae, Kao, Jwaneng, Orapa, Letlhakane) и лампроитов (Prairie Creek) [Chinn, 2024]. Они встречены также в россыпях Анголы [Allan, 2024] и Индии [Kalra et al., 2024].

В России известно одно месторождение кимберлитов, где добываются CLIPPIR алмазы, – трубка им. В. Гриба в Архангельской области [Kargin, 2021; Shchukina et al., 2015, 2019]. Несколько особо крупных алмазов этого типа (340–220 карат) было найдено в трубках

Сытыканской, Нюрбинской [Spetsius et al., 2015], Зарница, Юбилейной (рис. 1, а), Комсомольской [Spetsius, Bogush, 2018] и Удачной [Ashchepkov et al., 2017].

Новые находки таких алмазов на севере Якутии в россыпях бассейна р. Эбелях вызвали интерес специалистов к Анабарскому региону. Кроме того, они были обнаружены в россыпях бассейна нижней Лены [Grakhanov et al., 2024]. За последние 60 лет в Прианабарье были обнаружены десятки слабоалмазоносных кимберлитовых диатрем, которые могут быть потенциальными источниками этих находок [Zinchuk, Koptil, 2015, 2017]. До недавнего времени никто не предлагал методов прогнозирования CLIPPIR алмазов в слабоалмазоносных кимберлитах и публикаций на эту тему, кроме авторских, не отмечено.

Гигантские алмазы из кимберлитов известны с момента случайного обнаружения в 1905 г. крупнейшего в мире алмаза Куллинан в трубке Премьер [Korolev et al.,

2018]. Они получили специальное название – CLIPPIR, где первые буквы означают – «похожие на Куллинан» [Moore, 2009]. Такие алмазы обычно содержат включения сублитосферного происхождения (23 %), представленные мейджоритовыми гранатами, сульфидами и металлами, и минералы из литосферных эклогитов (32 %) и перидотитов (45 %), что показали исследования мелких (до 2 мм) алмазов трубки Премьер [Korolev et al., 2018]. По химическому составу они отличаются дефицитом N, низким содержанием В-центров и относятся к типу IIa. Включения в алмазах типа IIa отвечают в основном пограничным условиям между литосферой и астеносферой [Ashchepkov et al., 2023].

Алмазы типа IIa, относящиеся к вебстеритовому парагенезису, демонстрируют сильное химическое сходство с мегакристовой ассоциацией [Moore, 2014]. Предполагается, что мегакристовая ассоциация образовалась в виде пегматитовых жил из небольших объемов



Рис. 1. Гигантские алмазы типа CLIPPIR из коренных и россыпных месторождений Якутии.

(а) – безазотные алмазы типа IIa из кимберлитов трубки Юбилейной, размерный класс –13+6 мм [Zyryanov et al., 2022]; (б) – желтый резорбированный кристалл комбинационного блочного строения (D+O+DO) с преобладанием граней додекаэдроидов, вес 236.0 карат из россыпи р. Эбелях (<https://rg.ru/2020/08/09/reg-dfo/cvetnoj-almaz-v-236-karat-obnaruzhili-v-iakutii.html>); (в) – неправильной формы резорбированный кристалл с крупной плоской гранью октаэдра (O), корродированной по периметру, вес 390.7 карата из россыпи р. Маят (<https://ria.ru/20230910/almaz-1895261434.html>).

Fig. 1. Giant CLIPPIR-type diamonds from the indigenous and placer deposits of Yakutia.

(а) – Ni-free type IIa diamonds from kimberlites of the Jubileinaya pipe, size class –13+6 mm [Zyryanov et al., 2022]; (б) – yellow resorbed crystal of a combinational block structure (D+O+DO) with predominance of dodecahedroid faces, weight 236.0 carats from the placer of the Ebelakh River (<https://rg.ru/2020/08/09/reg-dfo/cvetnoj-almaz-v-236-karat-obnaruzhili-v-iakutii.html>); (в) – irregularly shaped resorbed crystal with large flat face of octahedron (O), corroded along perimeter, weight 390.7 carats from the placer on the Mayat River (<https://ria.ru/20230910/almaz-1895261434.html>).

остаточных протокимберлитовых расплавов. А.Е. Мур полагает, что кристаллизация алмазов неправильной формы типа IIa произошла в остаточных расплавах, генерировавших мегакристаллы [Moore, 2014], когда исходные магмы оказались заблокированы сильно истощенными породами стенок мантии. Кроме того, повышенное содержание бора в голубых алмазах типа IIb согласуется с моделью кристаллизации из высокофракционированных пегматитовых мегакристаллических магм протокимберлитов [Moore, Helmstaedt, 2019; Daver et al., 2022]. Некоторые экспериментальные работы позволяют предположить, что такие алмазы должны ассоциироваться с сульфидными и металлическими расплавами и включениями, играющими важную роль в их генерации и являющимися катализаторами их кристаллизации [Chepurov et al., 2020]. Голубые алмазы были обнаружены в трубках Малокуонамской (Куранахское кимберлитовое поле) [Sobolev et al., 2015] и Ленинград (Западно-Укукитское кимберлитовое поле) [Ashchepkov et al., 2023].

Появление крупных и тем более гигантских алмазов в кимберлитах порождает «эффект самородка» [Matheron, 1968], который остается нерешенной проблемой в рамках методов вероятностной геостатистики. При разведке алмазов их ураганное содержание в рудах не учитывается при подсчете запасов на основе среднего содержания в блоках, и не существует методов прогнозирования содержания «самородных» алмазов в кимберлитах. Между тем крупные и высококачественные кристаллы типа CLIPPIR имеют высокую стоимость, что делает их предметом высокодоходных инвестиций и стимулирует разработку методов их прогнозирования в кимберлитах и способов эффективного извлечения этих алмазов [Zinchenko, Ivanov, 2021].

Авторами разработан метод статистико-геохимической аналогии составов минералов-спутников алмаза (MCA), парагенетически связанных с CLIPPIR алмазами. Он реализован на диаграмме Митчелла $Fe/(Fe+Mg) - Cr/(Cr+Al) - (Mn, Na)$ [Mitchell, 1986] и основан на химико-петрогенетических классификациях MCA Дж. Доусона и У. Стефенса [Dawson, Stephens, 1975; Stephens, Dawson, 1977] для гранатов и пироксенов, а также для ильменитов и хромитов В.К. Гаранина [Garatin et al., 1991] и базируется на принципах вероятностной статистики (сочетание R- и G-методов кластерного анализа) [Ivanov, 2016]. Это позволяет определять благоприятные физико-химические параметры среды кристаллизации CLIPPIR алмазов и прогнозировать их в кимберлитах [Zinchenko, Ivanov, 2021].

Открытие россыпных месторождений в бассейне р. Эбелях и близлежащих районах, где добываются CLIPPIR алмазы, привлекло интерес к ранее открытым кимберлитам Анабарского региона в качестве их коренных источников [Babushkina, 2005; Sobolev et al., 2015; Tomilenko et al., 2015; Kornilova et al., 2016; Zinchuk, Bardukhinov, 2022a, 2022b; Ashchepkov et al., 2023]. За последнее десятилетие здесь были добыты круп-

ные и гигантские алмазы высокого качества и фантазийной окраски (желтые, розовые и пурпурно-розовые). В трубках Малокуонамской и Университетской содержатся дорогие (>250 \$/кар) голубые прозрачные алмазы, которые также были найдены в трубке Ленинград. В трубке Малокуонамской кристаллы цвета морской волны составляют 0.1 % алмазов класса $-1+0.5$ и 1.2 % зеленого цвета класса $-2+1$ (в южном рудном столбе). В маленькой ($\sim 50 \times 20$ м) трубке Харьковчанка, расположенной в 100 м к северо-западу от трубки Университетской, найден один стопроцентно прозрачный алмаз, который имеет голубой цвет.

Самый крупный алмаз в кимберлитах Анабара был найден в трубке Лыхчан, расположенной в близлежащем Лучаканском кимберлитовом поле, со средним содержанием 0.08 кар/т. Из 6.41 м^3 кимберлитового пробоотборника было извлечено девять кристаллов алмаза общим весом 253.7 мг, один кристалл имел вес 154.1 мг (0.75 карата). Помимо трубки Ленинград, в Западно-Укукитском поле алмазы с пониженным содержанием азота найдены в трубках Светлана, Лорик и Русловая. При обогащении геологических проб из трубки Светлана был раздроблен на множество фрагментов ювелирный алмаз крупнее четырех карат.

ПАО «Алмазы Анабара» при разведке россыпи р. Малая Куонамка в 80 км ниже по течению от трубки Куранахской, в пределах Западно-Укукитского поля, были обнаружены алмазы цвета морской волны в крупных классах $(-2+1)$. В 2020 г. на месторождении «Эбелях» добыли алмаз массой 236 карат насыщенного желто-коричневого цвета размером $47 \times 24 \times 22$ мм (рис. 1, б). В 2023 г. на прииске «Маят» из проб был извлечен алмаз весом 390.7 карата (рис. 1, в).

2. ГЕОЛОГИЧЕСКОЕ ПОЛОЖЕНИЕ И СТРОЕНИЕ ТРУБОК

Кимберлитовые поля севера Сибирской платформы расположены в бассейнах рек Анабар и Оленек в пределах Анабарского щита, являющегося частью Северо-Азиатского кратона [Smelov, Timofeev, 2007; Zaitsev, Smelov, 2010] и на ЮЗ его окраины (рис. 2). Для сравнения составов MCA кимберлитов этого района с MCA трубки Карове (Ботсвана) были выбраны трубки Малокуонамская и Ленинград, характеризующиеся сравнительно невысокой алмазоносностью [Zinchuk, Bardukhinov, 2022a, 2022b]. Они представлены в основном магматическими кимберлитами диатрем без эруптивных брекчий кратерных фаций, которые были эродированы. Кимберлиты в основном порфиоровые с крупными зернами оливина и флогопита. Кроме того, в них присутствуют автолитовые и массивные кимберлитовые брекчии с ксенолитами и «родственными» включениями глубинных пород.

Трубка Малокуонамская расположена в Куранахском кимберлитовом поле, прорывает отложения верхнего и нижнего кембрия, имеет грушевидную форму и размеры 320×255 м с более узкой северной частью. Трубка выполнена двумя разновидностями кимберлитовой

брекчии: с массивной и автолитовой текстурой (северный и южный рудные столбы соответственно). Возраст трубки, определенный U-Pb методом по мантийным цирконам и бадделеиту, составляет 224 ± 1.9 млн лет [Sun et al., 2018].

В трубке отмечаются более высокие концентрации алмазов, чем в большинстве трубок этого района [Zinchuk, Bardukhinov, 2022b]. Содержание алмазов в трубке, по данным геологоразведочных работ, составляет 0.23 кар/т по ЮВ части трубки и 0.42 кар/т СЗ части

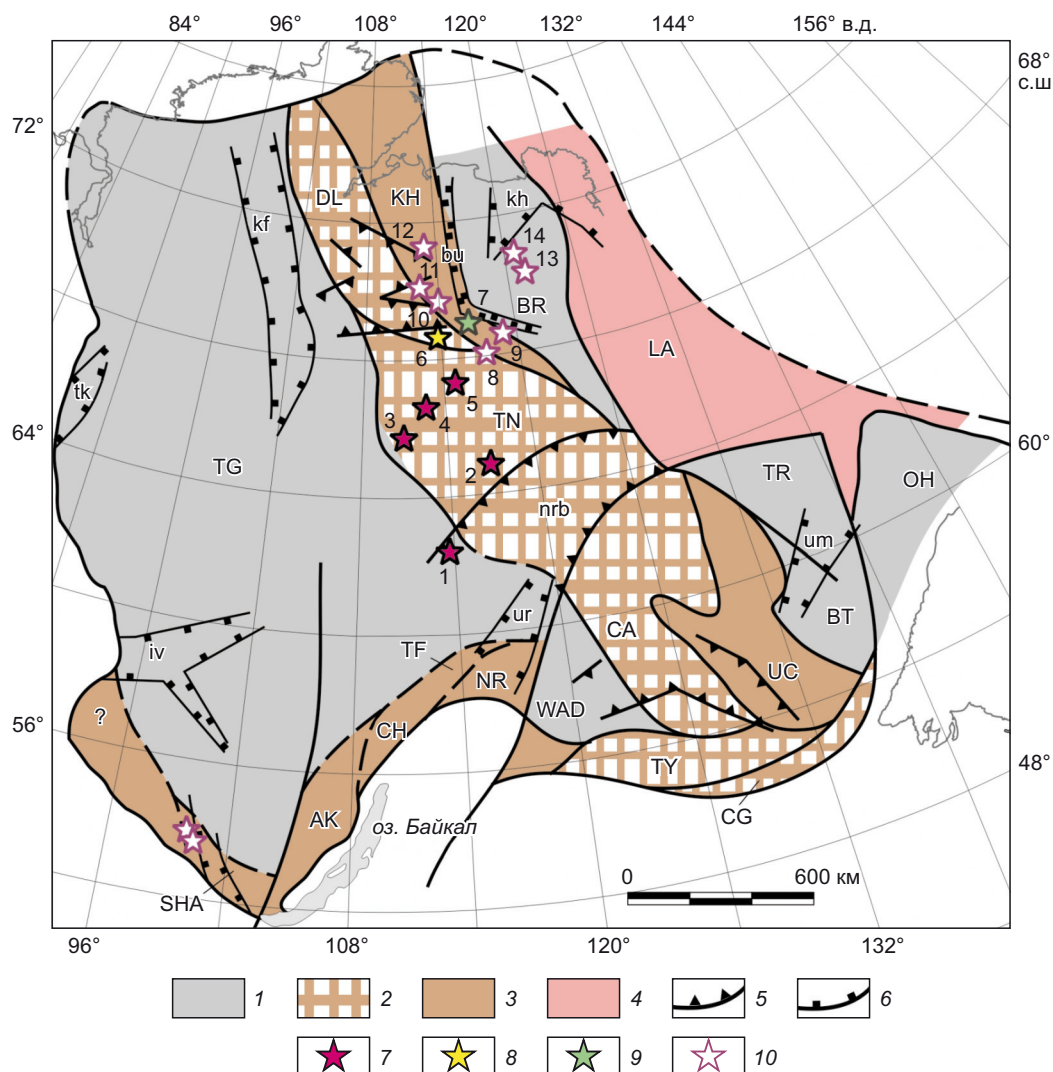


Рис. 2. Расположение кимберлитовых полей на геологической схеме фундамента Северо-Азиатского кратона (по [Smelov, Timofeev, 2007; Zaitsev, Smelov, 2010], с изменениями).

1 – архей; 2 – архей и палеопротерозой нерасчлененные; 3 – палеопротерозой; 4 – мезопротерозой; 5 – мезопротерозойский Нюрбинский рифтовый и дайковый пояса; 6 – неопротерозойские рифтовые и дайковые пояса: Билиро-Уджинский (bu), Иркинеево-Ванаварский (iv), Хастахский (kh), Котуйско-Фомичевский (kf), Турухано-Хантайский (tk), Усть-Майский (um) и Уринский (ur); 7 – поля с промышленно-алмазоносными трубками: 1 – Малоботуобинское, 2 – Накынское, 3 – Алаakit-Мархинское, 4 – Далдынское, 5 – Верхнемунское; 8 – поле с трубками полупромышленной алмазоносности: 6 – Куранахское; 9 – поле с трубками, потенциальными на полупромышленную алмазоносность: 7 – Западно-Укукитское; 10 – поля с убогоалмазоносными трубками: 8 – Чомурдахское, 9 – Огонер-Юряхское, 10 – Ары-Мастахское, 11 – Старореченское, 12 – Эбеляхское, 13 – Молодинское, 14 – Куойкское.

Fig. 2. Location of kimberlite fields on the geological scheme of the basement of the North Asian craton [Smelov, Timofeev, 2007; Zaitsev, Smelov, 2010], modified.

1 – Archaeozoic; 2 – Archaeozoic and Paleoproterozoic undifferentiated; 3 – Paleoproterozoic; 4 – Mesoproterozoic; 5 – Mesoproterozoic Nyurbinsky rift and dike belts; 6 – Neoproterozoic rift and dike belts: Biliro-Ujinsky (bu), Irkineevo-Vanavarsky (iv), Hastakhsky (kh), Kotuisky-Fomichevsky (kf), Turukhan-Khantaysky (tn), Ust'-Maysky (um) and Urinsky (ur); 7 – fields with economic diamond-bearing pipes: 1 – Malo-Botuobinskoye, 2 – Nakynskoye, 3 – Alakit-Markhinsky, 4 – Daldyn, 5 – Verkhnemunsky; 8 – field with semi-industrial pipes Diamond content: 6 – Kuranakhsky; 9 – field with pipes, potential for semi-economic diamond capacity: 7 – West-Ukukitsky; 10 – fields with poor diamond-bearing pipes: 8 – Chomurdakhsky, 9 – Ogoner-Yuryakhsy, 10 – Ary-Mastakhsky, 11 – Starorechensky, 12 – Ebelyakhsy, 13 – Molodinsky, 14 – Kuoiksky.

трубки. Алмазы тр. Малокуонамской в основном относятся к экологитовому типу (А.М. Логвинова, личное сообщение).

Трубка Ленинград – первая кимберлитовая трубка, открытая в России и Якутии К.С. Забурдиным (НИИ геологии Арктики) в 1952 г. в русле р. Омонос. Трубка обнажена на правом берегу реки в скалистом выступе высотой до 19 м и длиной до 105 м. Контур ее, согласно данным магнитной съемки, имеет форму эллипсоида, вытянутого в правильном направлении, размером 195×105 м.

Трубку слагают несколько типов брекчии, относящихся как минимум к трем основным фазам внедрения. Одну часть трубки слагает брекчия с массивной текстурой. В автолитовой разновидности, слагающей вторую часть трубки, встречаются крупные автолиты размером до 20–50 см, представленные кимберлитовой брекчией с массивной текстурой, но не аналогичной первой. Соотношение TiO_2 и K_2O в породах трубки близко к слюдосодержащим оранжитами, хотя основная фаза содержит большое количество ильменитов и тяготеет к широко распространенному Ca-Mg типу кимберлитов. Как сообщается в работе [Kargin, Golubeva, 2017], на севере Якутской алмазоносной провинции оранжиты отмечены в Ары-Мастахском поле, расположенном в ~250 км к северо-западу от Западно-Укукитского.

Трубка датирована несколькими методами, демонстрирующими большие различия в возрасте. Изохроны Rb/Sr по слюде в массивных породах дают возраст девона от 380 до 350 млн лет с наиболее вероятными значениями 368 ± 1 млн лет [Zaitsev, Smelov, 2010].

Опробование 250 т породы позволило обнаружить 333 кристалла алмаза общим весом 2249 мг. Среднее содержание алмазов составляет 0.045 карата на тонну, и 4/5 из них ювелирного качества.

3. ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

В данной работе использовались концентраты промывки кимберлитов непосредственно на кимберлитовых трубках Малокуонамской и Ленинград. Отбор зерен МСА, пробоподготовка и микрозондовая аналитика проведены С.И. Костровицким, И.В. Ащепковым и С.А. Бабушкиной. Собранный материал был проанализирован в лаборатории физико-химических методов анализа Института геологии алмаза и благородных металлов СО РАН и Центре коллективного пользования научным оборудованием многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

3.1. Метод электронного микроанализа

Электронно-микрозондовый анализ исследованных МСА (гранаты, хромдиопсиды, ильмениты и хромиты) был проведен с использованием Camebax Micro (в шлифах) и Jeol JXA8320 (в шашках) в соответствии с общепринятой методикой [Lavrent'ev et al., 2015; Lavrent'ev, Usova, 1994]. Ускоряющее напряжение составляло 15 кВ, использовался сфокусированный пучок с

током выборки 15 или 20 нА и временем обратного отсчета 15 с. Относительное стандартное отклонение не превышало 1.5 %, а точность была близка к 3–5 % от погрешности в 2σ .

3.2. Реконструкция разрезов мантии с использованием мономинеральной термобарометрии

Составы МСА из трубок Ленинград и Малокуонамской были использованы для построения диаграмм РТХ – $f\text{O}_2$ и разрезов субкратонной литосферной мантии (СКЛМ) под исследуемыми трубками (Х – химический состав).

Разрезы мантии и диаграммы РТХ – $f\text{O}_2$ реконструированы методом мономинеральной термобарометрии [Ashchepkov et al., 2010, 2017, 2023] с использованием оригинальной программы РТ [Ashchepkov, 2011]. Значения Р, Т, $f\text{O}_2$ были рассчитаны мономинеральными методами с использованием барометров для граната и клинопироксена, хромита и ильменита [Ashchepkov et al., 2010, 2017], а также модифицированных мономинеральных версий существующих термометров для граната [O'Neill, Wood, 1979], клинопироксена [Nimis, Taylor, 2000], ильменита и шпинели [Taylor et al., 1998]. Величины коэффициентов железистости оливина и минералов, находящихся в равновесии с ним, были рассчитаны с использованием регрессий с учетом зависимостей от температуры. Мономинеральные методы расчета $f\text{O}_2$ ($\Delta \log f\text{O}_2$ в единицах по отношению к буферу QMF) были применены для гранатов [Gudmundsson, Wood, 1995], ильменитов, шпинели [Taylor et al., 1998], клино- и ортопироксенов [Ashchepkov et al., 2017]. Расчеты проводились с использованием авторской программы TERA55 (FORTRAN 77), которая включает в себя 48 минеральных термометров и 44 барометра для мантийных пород, которые рассчитываются одновременно с использованием итерационной схемы [Ashchepkov et al., 2010]. Это позволяет одновременно вычислять несколько параметров РТ и $f\text{O}_2$, записывать их вместе с минеральными составами и экспортировать полученные матрицы в Excell, Grapher 5-7, Surfer 8, Statistics и другие приложения. Диаграммы расчетных параметров Р – Т, Р – Fe#, Р – (Al, Ca, Ti), Р – $f\text{O}_2$ для различных минералов используются для построения мантийных разрезов СКЛМ и трансектов [Ashchepkov et al., 2010, 2023]. Контурные СКЛМ показывают различные параметры – F# для оливинов ($\text{Fe}\#_{\text{ol}}$), сосуществуют с другими значениями МСА – CaO, TiO_2 , Cr_2O_3 для гранатов, а также расчетными значениями температуры Т °С и $f\text{O}_2$ для всех минералов или для отдельных фаз. Была использована вертикальная координатная сетка (для шкалы Р), рассчитанная для СКЛМ.

3.3. Метод комплексных полиминеральных (5E) диаграмм Митчелла

Полученные базы данных составов МСА были использованы при построении для исследуемых трубок комплексных полиминеральных (5E) диаграмм Митчелла

с применением алгоритмов А.С. Иванова и В.Н. Зинченко и авторской программы, составленной А.С. Ивановым на основе методов вероятностной статистики и кластерного анализа [Ivanov, 2016, 2020]. Кластеризация составов МСА проведена на основе химической и генетической классификации гранатов Дж. Доусона (КГ – кластерная группа) [Dawson, Stephens, 1975], пироксенов У. Стефэнса [Stephens, Dawson, 1977] и для ильменитов и хромитов (ХГГ – химико-генетическая группа) В.К. Гаранина [Garanin et al., 1991]. За эталон принимаются диаграммы составов МСА трубки Карове, база данных составов которых насчитывает более 10000 анализов.

Основной для анализа составов МСА является бинарная диаграмма 5Е, где по оси Х фиксируется коэффициент железистости – $Fe/(Fe+Mg)$ и по оси Y – коэффициент хромистости – $Cr/(Cr+Al)$. К ней добавлены две треугольные диаграммы для составов пиропов и пироксенов: $Na_2O - TiO_2 - MnO$ и $Na_2O - Cr_2O_3 - Al_2O_3$. На всех диаграммах размер фигуративных точек анализов изменяется в зависимости от содержания дополнительного пятого химического элемента. Для составов пиропов и диопсидов этот размер соответствует TiO_2 , мас. %, в проанализированных зернах. Для видимой сходимости размера фигуративных точек анализов хромшпинелей с пиропами содержание TiO_2 в них показано с коэффициентом 0.15. Содержание Fe_2O_3 в ильменитах с той же целью дано с уменьшающим коэффициентом 0.05. В легенде 5Е диаграммы показаны все перечисленные преобразования.

Линейные диаграммы построены с использованием сортировки результатов анализа каждой минеральной группы (МСА) в соответствии с увеличением массового содержания дополнительного пятого элемента (оксида), что отражается в размере «пузырьков» – образных точек анализа. На этих графиках по оси у проведены линии массового содержания (%) дополнительных элементов, в соответствии с которыми рассчитывается диаметр «пузырька» фигуративной точки. Длина оси х соответствует 100 % от числа проанализированных зерен МСА, а одна линия соответствует одному зерну. На линейной диаграмме ильменитов участок графика менее 15 мас. % Fe_2O_3 относится к восстановительным условиям, благоприятным для сохранения алмазов, а выше этой линии – к окислительной среде, неблагоприятной для сохранения алмазов [Gurney, Moore, 1991]. На линейной диаграмме пиропов участок линии TiO_2 с содержанием более 0.6 мас. % соответствует высоким давлениям и температурам, а менее 0.6 мас. % – более низким давлениям и глубинам их кристаллизации. На линейной диаграмме хромшпинелей участок линии TiO_2 менее 1.0 мас. % соответствует зернам из кимберлитов, а более – пикритам и меймечитам. На линейной диаграмме хромдиопсидов участок линии TiO_2 с содержанием менее 0.2 мас. % характеризует слабоалмазоносные кимберлиты, а более 0.2 мас. % – алмазоносные кимберлиты [Ivanov, 2016, 2020]. Все диаграммы строятся в программе Microsoft Excel-2007.

3.4. Метод статистико-геохимической аналогии составов МСА, парагенетически связанных с CLIPPIR алмазами

На рис. 3 демонстрируется комплекс диаграмм и эталонные контуры составов МСА трубки Карове, в которые попадают 100 % проанализированных зерен ее МСА (вероятность сходимости $P=100\%$). Обращает на себя особое внимание КГ пиропов G2, установленная во включениях в гигантских алмазах трубки Карове [Moore, 2009]. Этот факт доказывает парагенетическую связь гигантских алмазов типа IIa с КГ G2 пиропов, что позволяет использовать ее парастерезисы с КГ других МСА для построения минералого-геохимической модели среды генерации таких алмазов. Показательно, что частота встречаемости (n_i) этой индикаторной КГ пиропов в трубках Карове и им. В. Гриба практически одинакова (16.8 и 16.9 % соответственно).

По признаку сходимости значений n_i КГ ряда МСА в обеих трубках были отобраны их пары, имеющие равные или близкие значения, с вероятностью совпадения (81–99 %). Наиболее близкие значения n_i имеют следующие пары КГ/ХГГ МСА: хромшпинелиды S1 (81 %) и S9 (99 %); пиропы G1 (82 %), G2 (99 %) и G10 (89 %); хромдиопсиды D7 (97 %); ильмениты i4 (92 %). Они и полагаются индикаторными на присутствие в кимберлитах алмазов типа IIa.

Петрогенетическая принадлежность к комплексам мантийных пород отмеченных ХГГ/КГ МСА, индикаторных на крупные алмазы, приведена ниже:

- хромшпинелиды [Garanin et al., 1991]: S1 – из высокоалмазоносных дунитов и гарцбургитов и включений в алмазах; S9 – из магнезиально-кальциевых алькремитов;
- пиропы [Dawson, Stephens, 1975]: G1 – 3.33 % зерен с алмазами; MgO (20 %), средние содержания TiO_2 (0.58 %) и низкие Cr_2O_3 (1.34 %); G2 – включения высокотитанистых ($TiO_2 - 1.09\%$), низкохромистых ($Cr_2O_3 - 0.91\%$) пиропов в крупных и гигантских алмазах и кимберлитах трубки Карове;
- хромдиопсиды [Stephens, Dawson, 1977]: D7 – высокоюриитовый диопсид из лерцолитов и включений в алмазы;
- ильмениты [Garanin et al., 1991]: i4 – высокохромистый (0.8–7.3 % Cr_2O_3 , в среднем 2.0 %) высокомагнезиальный гемоильменит из перидотитов и ильменит-ортопироксеновых пород (энстатититов).

Опираясь на преобладающие парагенезисы МСА, представленные на этих диаграммах, можно классифицировать тип кимберлитов. Этот комплекс диаграмм является своеобразным минералого-геохимическим паспортом, или «QR кодом», кимберлита, позволяющим зафиксировать физико-химические параметры минерогенеза и оценить количественно вероятность обнаружения в нем алмазов типа CLIPPIR по суммарной вероятности сходимости составов МСА оцениваемой трубки с эталоном – трубкой Карове. Важным компонентом 5Е диаграмм являются эталонные контуры составов МСА, которые характеризуют трубку

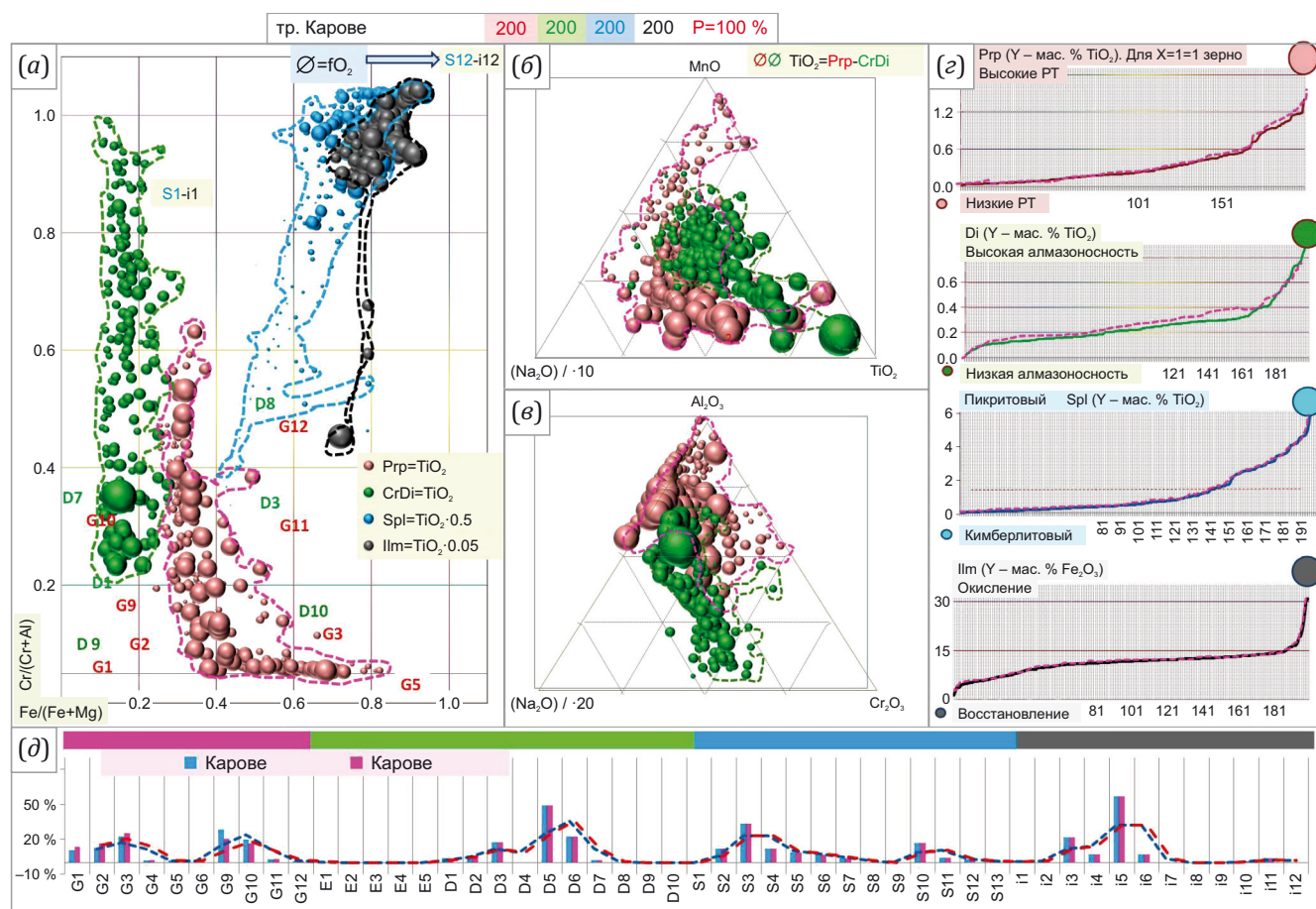


Рис. 3. 5E диаграмма MCA (а), диаграммы составов пиропов и диопсидов (б, в) трубки Карове, кумулятивные графики составов зерен MCA и физико-химических параметров их кристаллизации (з) и гистограмма частот встречаемости кластерных групп минералов (д):

(а) – диаметры «пузырьков», пропорциональные содержанию (%) TiO₂ в пиропсах и диопсидах, TiO₂·0.15 в шпинелидах, TiO₂·0.05 в ильменитах; (б, в) – MnO в пиропсах и TiO₂ в диопсидах; (з) – по X – составы, по Y – зерна MCA; (д) – гистограммы кластерных групп (КГ) пиропов (G1-G12), энстатитов (E1-E5), диопсидов (D1-D10), хромшпинелей (S1-S13), ильменитов (i1-i12).

Fig. 3. 5E DMS diagram (а), diagrams of pyrope and diopside compositions (б, в) of the Karowe pipe, cumulative graphs of DSM grain compositions and physico-chemical parameters of their crystallization (з) and histogram of the frequencies of occurrence of cluster groups of minerals (д):

(а) – the diameters of the "bubbles" are proportional to the content (%) of TiO₂ in pyropes and diopsides, TiO₂·0.15 in spinelides, Fe₂O₃·0.05 in ilmenites; (б, в) – MnO in pyropes and TiO₂ in diopsides; (з) – by X – compositions, by Y – grains DMS; (д) – histograms of cluster groups (CG) of pyropes (G1-G12), enstatite (E1-E5), diopside (D1-D10), chrome spinel (S1-S13), ilmenites (i1-i12).

Карове. Эти контуры показывают, насколько составы MCA в оцениваемой трубке близки к эталонным. Если точки составов MCA попадают в эти контуры, это означает высокую степень сходства. Количественная оценка сходимости производится на основе величины евклидовых расстояний [Zinchenko, Ivanov, 2021].

4. ХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ МИНЕРАЛОВ

4.1. Пиропы

Содержание Cr₂O₃ в пироповых гранатах из трубки Ленинград изменяется от 0.2 до 12.5 мас. %. Три значения от 16.3 до 18.8 мас. % Cr₂O₃ находятся в пределах поля дунитов (G10) согласно [Dawson, Stephens, 1975]. Большинство анализов относятся к лерцолитовому месторождению согласно [Sobolev et al., 1973]. Они сгруппированы в восемь кластеров, и еще один

кластер включает сверхвысокохромистую группу пиропов (~18 % Cr₂O₃) (рис. 4). Небольшое количество анализов (менее 40) попадает в поля дунитов. Огромное количество относится к разновидностям с низким содержанием Cr, как видно из гистограммы Cr₂O₃. Отклонение от пироксенитового поля составляет всего около 4 мас. % Cr₂O₃.

У дунитовых субкальциевых гранатов содержание Cr₂O₃ составляет 2 мас. %. В пределах гарцбургитового поля представлены гранаты с содержанием Cr₂O₃ > 9 мас. %, в том числе с самым высоким содержанием Cr₂O₃ – 18 мас. %. Пироксенитовые гранаты довольно редки и встречаются главным образом в средней части диаграммы с содержанием Cr₂O₃ 4–8 мас. %. Обогащение TiO₂ от 0.8 до 1.5 мас. % в основном наблюдается в части диаграммы с низким содержанием Cr.

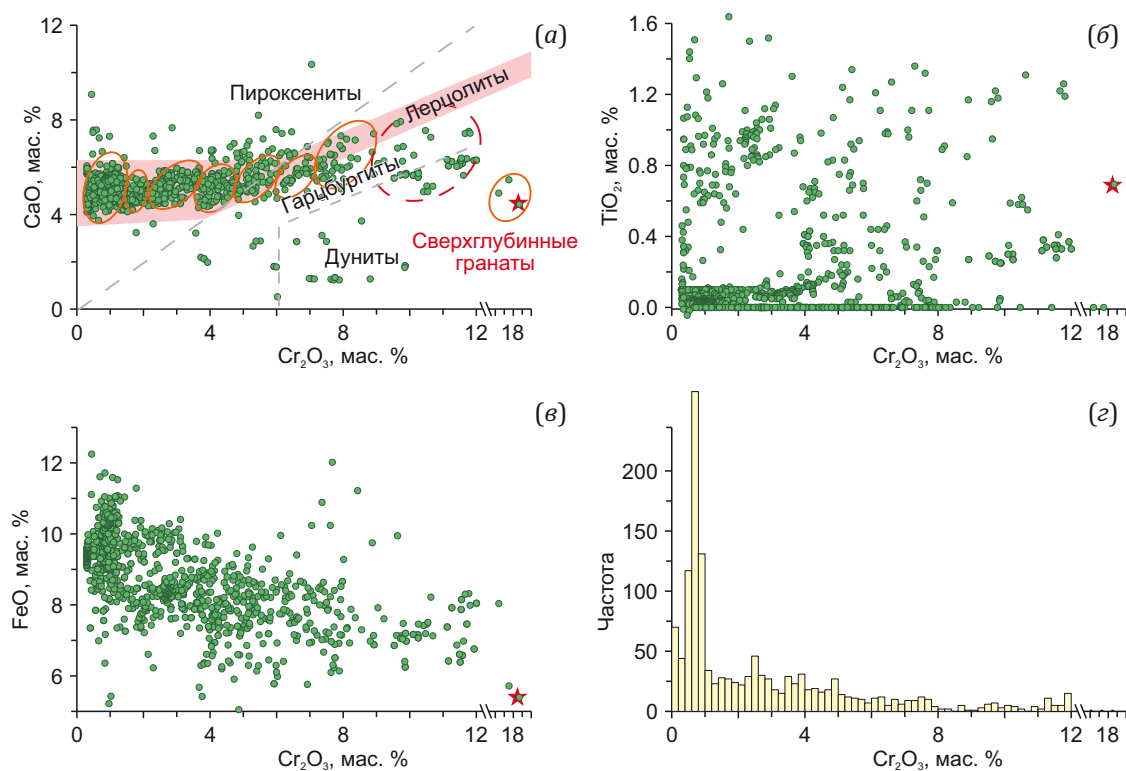


Рис. 4. Состав Cr-гранатов из трубки Ленинград Западно-Укукитского поля. Содержание Cr₂O₃ в зависимости от CaO (a), TiO₂ (б), FeO (в) и на гистограмме для Cr₂O₃ (г).

Fig. 4. Compositions of Cr-garnets from Leningrad pipe in the West-Ukukite field. The content of Cr₂O₃ versus CaO (a), TiO₂ (б), FeO (в) and on the histogram for Cr₂O₃ (г).

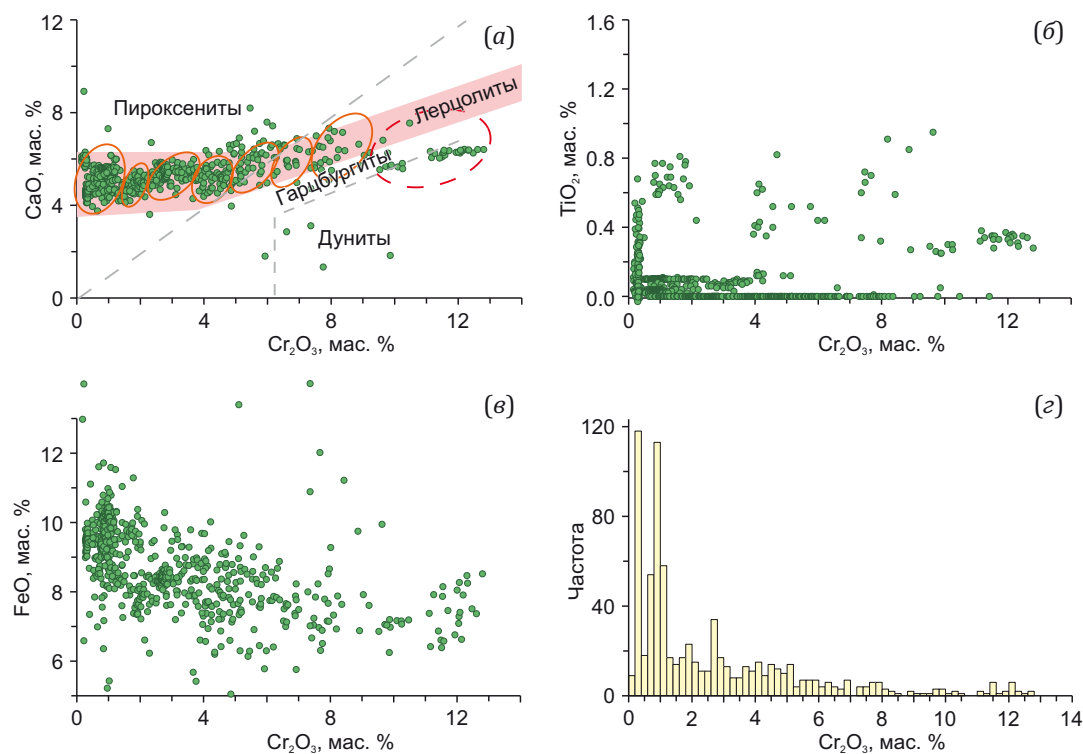


Рис. 5. Состав Cr-гранатов из трубки Малокуонамской Куранахского поля. Содержание Cr₂O₃ в зависимости от CaO (a), TiO₂ (б), FeO (в) и на гистограмме для Cr₂O₃ (г).

Fig. 5. Compositions of Cr-garnets from kimberlite pipes of Malokouonamsky pipe in the Kuranakh field. Cr₂O₃ contents versus CaO (a), TiO₂ (б), FeO (в) and on histogram for Cr₂O₃ (г).

Пироп-альмандиновые эклогитовые гранаты в трубке Ленинград широко распространены. Они характеризуются колебаниями содержания FeO от 12 до 32 мас. % и разделяются на две группы.

Гранаты из трубки Малокуонамской, попадающие в поле лерцолитов, также отвечают восьми интервалам глубинности, аналогичным таковым из трубки Ленинград (рис. 5). Более деплетированные разновидности содержат до 12 мас. % Cr_2O_3 . Содержание FeO снижается от 12–10 мас. %, типичных для мегакристаллов, до 8 % и менее с 4–5 мас. % Cr_2O_3 . Содержание Na_2O обычно составляет менее 1 мас. %.

Для сравнения, пиропы из трубки Университетской того же Куранахского поля по составу похожи на вышеописанные. Но многие из них с тенденцией к обогащению Ca (пироксенитовые) попадают в средний интервал от 3.5 до 8.0 мас. % Cr_2O_3 .

4.2. Клинопироксены

Хромдиопсиды и другие клинопироксены из трубки Ленинград демонстрируют следующие вариации содержаний: FeO от 1 до 5 мас. %, TiO_2 не превышает 0.4 мас. %, Na_2O от 0 до 3.5 мас. %, Al_2O_3 от 0 до 5 мас. %, Cr_2O_3 от 0.5 до 3.5 мас. % (рис. 6).

Следует отметить, что содержание Cr_2O_3 и Na_2O максимально при 2.5 мас. % FeO. Это фактически метасоматическая тенденция, поскольку в целом содержание этих элементов уменьшается с увеличением содержа-

ния FeO. Содержание TiO_2 , как правило, увеличивается вместе с содержанием FeO, а Al_2O_3 уменьшается. Все клинопироксены можно разделить на четыре группы. Как видно на рис. 6, средняя часть диаграммы, с более высокими значениями Ti, Cr, существенно отличается от общепринятых значений в мантии для Cr-диопсидов.

Клинопироксены из трубки Малокуонамской с вариациями содержания FeO от 1 до 6 мас. % и более в обогащенной Mg части содержат более низкие значения Cr_2O_3 и Na_2O – до 2 мас. % по сравнению с таковыми из трубки Ленинград. Но содержание Al_2O_3 выше, до 5 мас. %. Составы, богатые железом, приближаются к составам Al-Ti-авгита с содержанием 2 мас. % TiO_2 и 6–7 мас. % Al_2O_3 . Большинство составов Crx в кимберлитах трубки Малокуонамской являются пироксенитовыми, но в них содержится мало TiO_2 , <0.5 мас. %.

4.3. Хромиты

Хромиты из трубки Ленинград формируют несколько трендов на графиках Cr_2O_3 – Al_2O_3 , Cr_2O_3 – MgO, Cr_2O_3 – FeO (рис. 7). Тренд Cr_2O_3 – Al_2O_3 , как обычно, линейный, но разновидностей с содержанием Cr_2O_3 <40 мас. % мало, и большинство из них близки к области стабильности алмаза [Sobolev, 1971, 1977].

В области с высокими значениями Cr_2O_3 наблюдаются сочетания магнезиохромитовых и железохромитовых трендов как на графике Cr_2O_3 – Al_2O_3 , так и

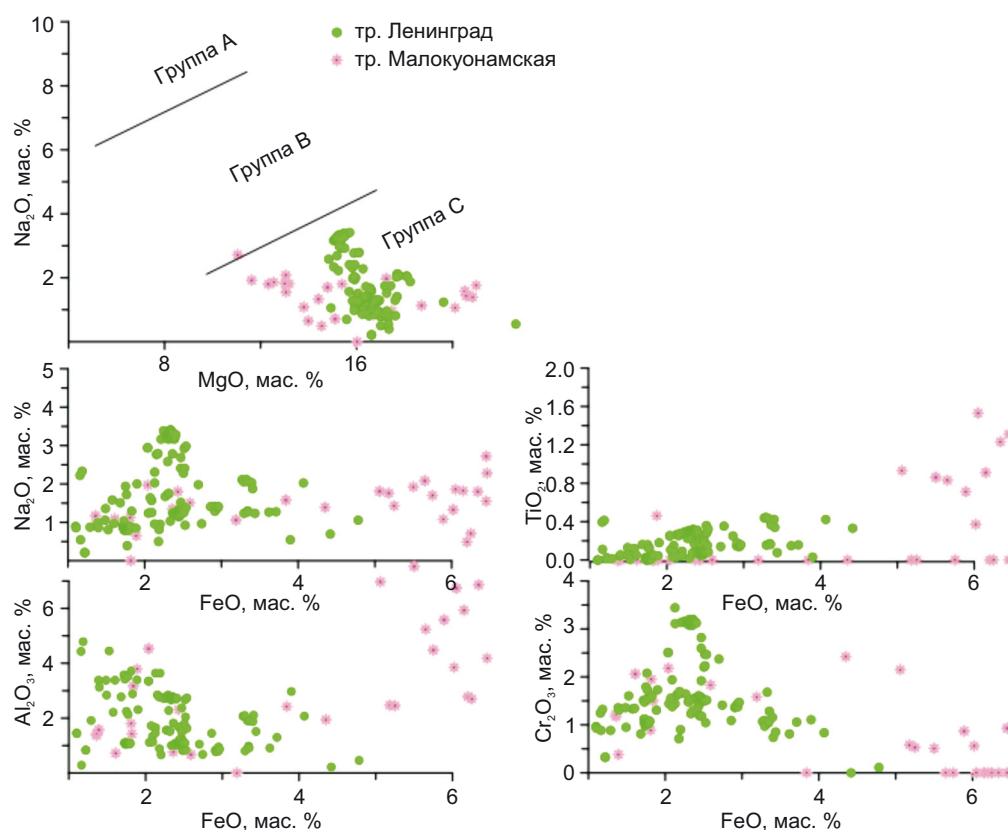


Рис. 6. Состав клинопироксенов из трубок Ленинград и Малокуонамской.

Fig. 6. Compositions of clinopyroxene from the Leningrad and Malokouonamsky pipes.

на графике $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{TiO}_2$. На графике $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{FeO}$ видны три отдельных направления, показывающие различные изоморфные замещения, отвечающие разным режимам летучести кислорода. Наиболее богатые железом разновидности соответствуют более окисленным условиям (рис. 7).

Хромиты из трубки Ленинград, возможно, сформировались в ходе нескольких магматических импульсов, отвечающих трем разновидностям пород трубки.

В трубке Малокуонамской хромиты относительно редки. Ярко выражена общая отрицательная тенденция $\text{Cr}_2\text{O}_3 - \text{Al}_2\text{O}_3$, и большинство хромитов содержат <50 мас. % Cr_2O_3 , и только 1/4 из них находится близко к «алмазному окну» [Sobolev, 1977]. Эти хромшпинелиды в большинстве своем содержат мало TiO_2 и MnO (рис. 7).

4.4. Ильмениты

Ильмениты из трубки Ленинград характеризуются широкими вариациями состава по TiO_2 и MgO , но есть

много значений с низким содержанием MgO (рис. 8), и значительное количество составов отличается от типичных кимберлитовых и типичных для СКЛМ [Wyatt et al., 2004]. В трубке Светлана Западно-Укуитского поля большинство составов ильменитов расположены также за пределами кимберлитового тренда.

Известно, что содержание TiO_2 зависит от давления [Ashchepkov et al., 2010]. Разновидности, богатые Cr, типичны для высокотемпературных мантийных метасоматитов, вступивших в реакцию с протокимберлитовыми расплавами. Существуют два уровня концентраций Al_2O_3 , которые, возможно, соответствуют двум магматическим импульсам (рис. 8). Содержание MnO в некоторых разновидностях достигает 12 мас. %. Высокую магнезиальность ильменитов из кимберлитов отмечали в своей работе Ф.В. Каминский и Е.А. Белоусова [Kaminsky, Belousova, 2009]. Значительное количество зерен ильменита из среднего интервала тренда TiO_2 имеет 2–4 мас. %, что не характерно для типичных протокимберлитовых систем.

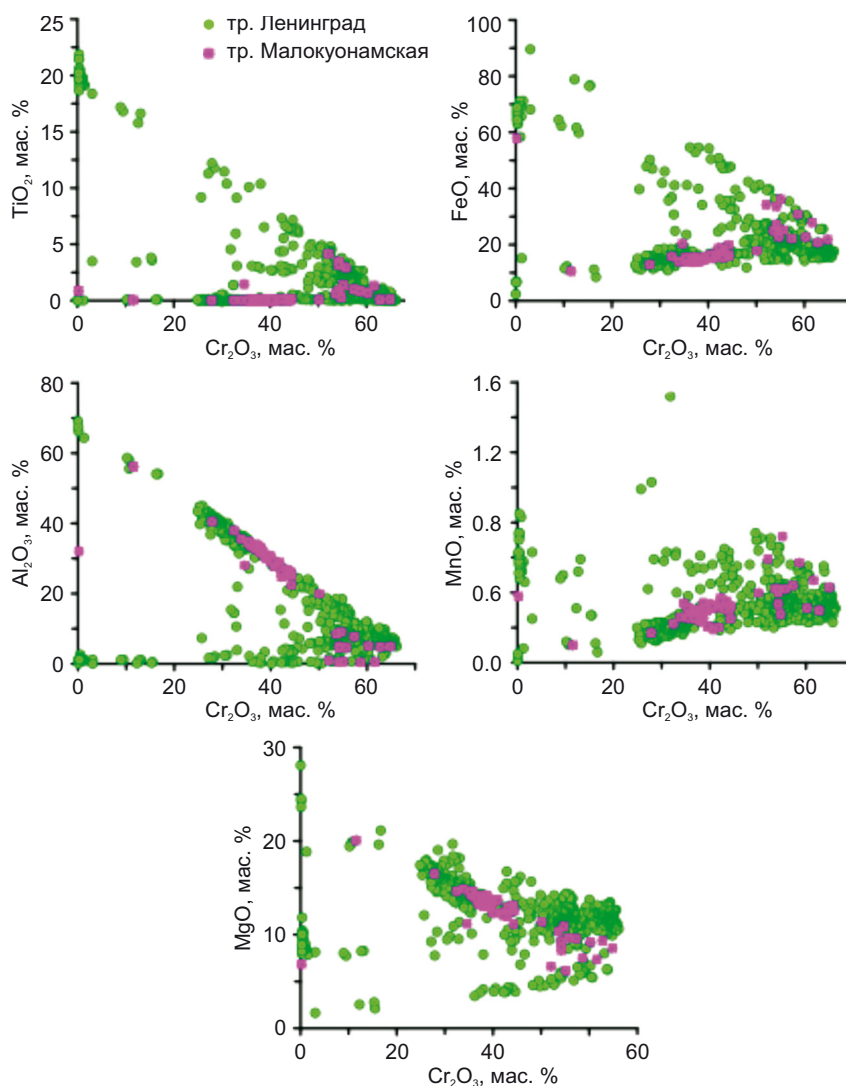


Рис. 7. Состав Cr-шпинелей из трубок Ленинград и Малокуонамской.

Fig. 7. Compositions of Cr-spinel from the Leningrad and Malokouonamsky pipes.

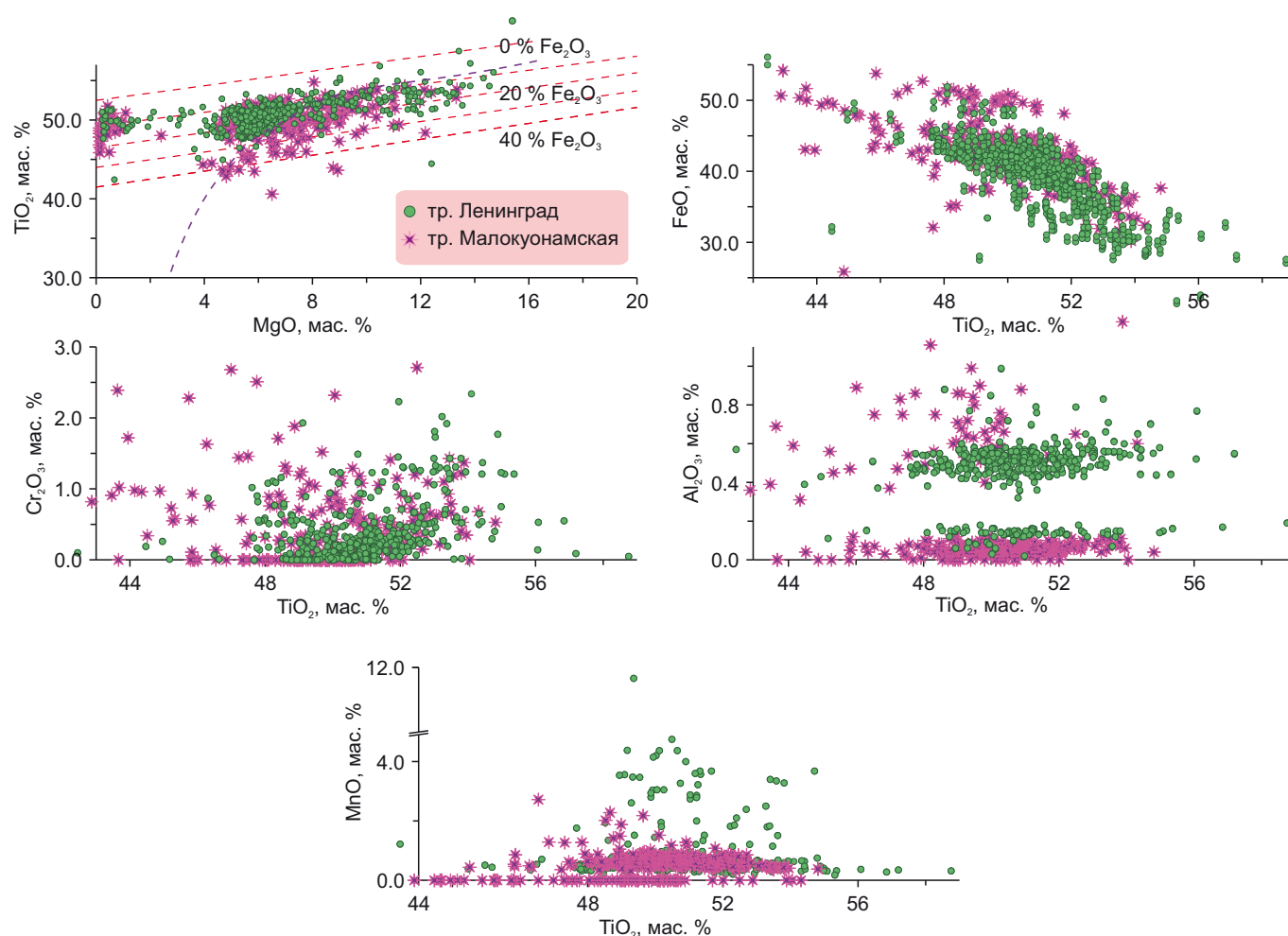


Рис. 8. Состав ильменитов из трубок Ленинград и Малокуонамской.

Fig. 8. Compositions of ilmenites from Leningrad and Malokouonamskaya pipes.

5. ТЕРМОБАРОМЕТРИЯ И РЕКОНСТРУКЦИИ СТРУКТУРЫ МАНТИИ

Авторы использовали систему опубликованных термобарометров для основных перидотитовых минералов: клинопироксенов (Cpx), ортопироксенов (Opx), гранатов (Grt), хромитов (Chr), ильменитов (Ilm) [Ashchepkov et al., 2010, 2017]. Для определения P по Cpx в перидотитовой системе используется барометр Jd-Di [Ashchepkov et al., 2017]. Скорректированная барометрия Jd-Cpx используется также для омфацитов в эклогитовой системе [Ashchepkov et al., 2010, 2017]. Для пироповых гранатов используется модифицированный барометр Cr-граната [Ashchepkov et al., 2017]. Барометр для эклогитового граната дает соответствующие результаты для гранатов, содержащих Ca и Na, на основе зависимости содержания Na в гранате от давления, при этом содержание FeO варьируется от 12 до 30 мас. % [Ashchepkov et al., 2017].

Для хромшпинелей и хромитов откалибрована зависимость Cr# от давления отдельно для гранатовой и шпинельной мантийных фаций [Ashchepkov et al., 2010]. Барометр работает в сочетании со шпинель-оливиновым термометром [Taylor et al., 1998], в котором

содержание $\text{Fe}\#_{\text{ol}}$ рассчитывается из $\text{Fe}\#_{\text{ilm}}$ и T ($^{\circ}\text{C}$) по эмпирическим уравнениям.

5.1. Реконструкция разреза мантии под трубкой Ленинград

Непростой характер процессов, происходивших в литосферной мантии под трубкой Ленинград, виден на РТ-диаграмме с очень сложными геотермическими условиями и трендами (рис. 9). Кислородный режим определен для гранатов в мономинеральном варианте [Gudmundsson, Wood, 1995], для Cpx [Ashchepkov et al., 2017], для хромшпинелей [O'Neill, Wall, 1987], для ильменитов [Taylor et al., 1998], преобразован в мономинеральные уравнения в соответствии с [Ashchepkov et al., 2010]. Уровни изотопов CO_3^{-2} в расплаве, положение буферов на диаграмме P – $f\text{O}_2$, линии EMOG/D и алмаз/карбонат, буферы и концентрация CO_2 в расплавах приведены в соответствии с данными В. Стагно [Stagno et al., 2013], кривая NiPC – осаждения никеля – [O'Neill, Wall, 1987]. AFG – Архангельская геотерма [Afanasyev et al., 2013].

Оценки РТ для гранатов формируют широкую геотермальную зону, которая находится в нижней части,

начиная с 6 ГПа, между кондуктивными геотермами, соответствующими 40 и 35 мВт/м² [Pollack, Chapman, 1977], а в верхней части, близкой к 2.0 ГПа, она немного превышает 45 мВт/м². Ниже 6 ГПа имеется широкая конвективная ветвь, прослеживаемая совместно по РТ-оценкам Ilm и Grt. Дополнительная конвективная ветвь прослеживается по гранатам от 4 до 5.5 ГПа на границе перехода алмаз – графит [Kennedy C.S., Kennedy G.C., 1976] (рис. 9).

Амфиболы разного типа встречаются практически во всех геотермальных условиях. Хромистые роговые обманки подразделяются на разновидности с высоким

содержанием Al и разновидности с меньшим содержанием Al, которые находятся в интервале 2.0–0.8 ГПа. Паргаситы залегают в средней части интервала от 2.5 до 4.5 ГПа. Рихтериты залегают глубже и находятся в интервале 7.5 ГПа. Более поздняя фаза в целом дает более высокотемпературные условия, близкие к Срх. Рихтериты дают низкотемпературные геотермические условия, которые соответствуют РТ-условиям алмазных включений в гранатах. Кроме того, также отмечены высокотемпературные отклонения от геотермы для ильменитов и гранатов, по которым прослеживается конвективная ветвь (рис. 9).

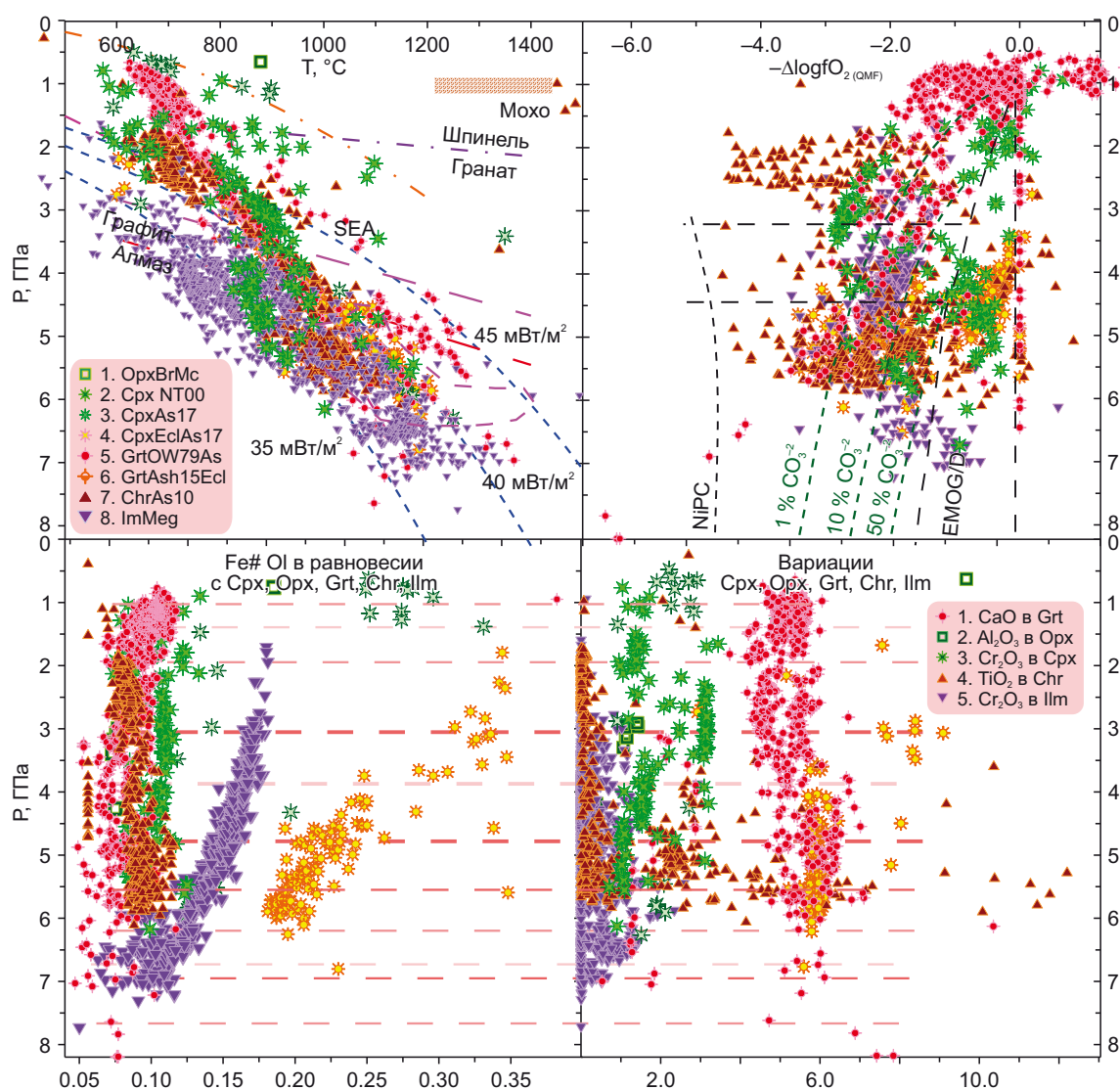


Рис. 9. Диаграмма РТХ – fO_2 для всех ксенокристаллов из трубки Ленинград.

1 – Орх: Т (°C) [Brey, Köhler, 1990] – Р (ГПа) [McGregor, 1974]; 2 – Срх: Т (°C) [Nimis, Taylor, 2000] – Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2017] (для Cr-диопсидов); 3 – то же самое для пироксенитов; 4 – то же для эклогитов; 5 – Grt: Т (°C) [O'Neill, Wood, 1979] – Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2017]; 6 – то же для эклогитов; 7 – Chr: Т (°C) [O'Neill, Wall, 1987] – Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2010]; 8 – Ilm: Т (°C) [Taylor et al., 1998] – Р (ГПа) [Ashchepkov et al., 2010]. EMOG/D – буфер энстатит-магнезит-оливин-графит/алмаз.

Fig. 9. РТХ – fO_2 diagram for all xenocrysts from the Leningrad pipe.

1 – Орх: Т (°C) [Brey, Köhler, 1990] – Р (GPa) [McGregor, 1974]; 2 – Срх: Т (°C) [Nimis, Taylor, 2000] – Р (GPa) [Ashchepkov et al., 2017] (for Cr – diopsides); 3 – the same for pyroxenites; 4 – the same for eclogite; 5 – Grt: Т (°C) [O'Neill, Wood, 1979] – Р (GPa) [Ashchepkov et al., 2017]; 6 – the same for eclogite; 7 – Chr: Т (°C) [O'Neill, Wall, 1987] – Р (GPa) [Ashchepkov et al., 2010]; 8 – Ilm: Т (°C) [Taylor et al., 1998] – Р (GPa) [Ashchepkov et al., 2010]. EMOG/D – buffer of enstatite-magnesite-olivine-graphite/diamond.

5.2. Реконструкция разрезов мантии под трубкой Малокуонамской

Диаграммы РТХ – fO_2 для СКЛМ под трубкой Малокуонамской, построенные с использованием химического состава минералов, обнаруживают высокую вариабельность тепловых условий (рис. 10). В СКЛМ под данной трубкой наблюдается крайне неравномерный нагрев в нижней части от 7.5 до 5.0 ГПа для орто- и клинопироксенов и ильменитов. Ортопироксены при давлении 7.5 ГПа соответствуют геотерме 35 мВт/м² и выше, при давлении 6.5 ГПа отражают разогрев до 45 мВт/м². РТ-тренды для гранатов пиропового типа пересекают кондуктивные геотермы [Pollack, Chapman, 1977] в интервале давлений от 6 до 1 ГПа. При давлении 5 ГПа наблюдается нагрев. Пироксенитовая линза – от 3 до 5 ГПа [Pokhilenko et al., 1998] – прослеживается по клинопироксенам ($Fe\# \sim 15\text{--}25\%$), 33–45 мВт/м², их $Fe\#_{Cpx}$ выше, чем у ильменитов, что указывает на протокимберлитовый тренд в 7.5–2.0 ГПа.

Оценки РТ для Сг-диопсида варьируются от 35 мВт/м² до адвективной геотермы по гранату (AGG), которая практически одинакова для большинства девонских кимберлитов [Ashchepkov et al., 2017, 2023]. Значение $Fe\#_{Cpx}$ колеблется от $Fe\#_{Grt}$ до $Fe\#_{Ilm}$, что свидетельствует о реакционной природе пироксенов при взаимодействии с расплавами. В верхней части пироксены и амфиболы обнаруживают разогрев мантии от 35 до 90 мВт/м², что, вероятно, указывает на водную природу расплавов, которые более проницаемы, чем, например, лампроиты.

Тренд окислительных условий для гранатов трассирует линию 1%-ного содержания CO_2 в расплаве, Сг-диопсид и ильмениты в основном находятся между буфером энстатит-магнетит-оливин-гранат/алмаз (EMOG/D) и 10%-ного CO_2 [Stagno et al., 2013]. Основная масса пироксенов вместе с гранатами эклогит-пироксенитового типа, ильменитами и титансодержащими хромшпинелями трассирует буфер EMOG/D [Stagno et

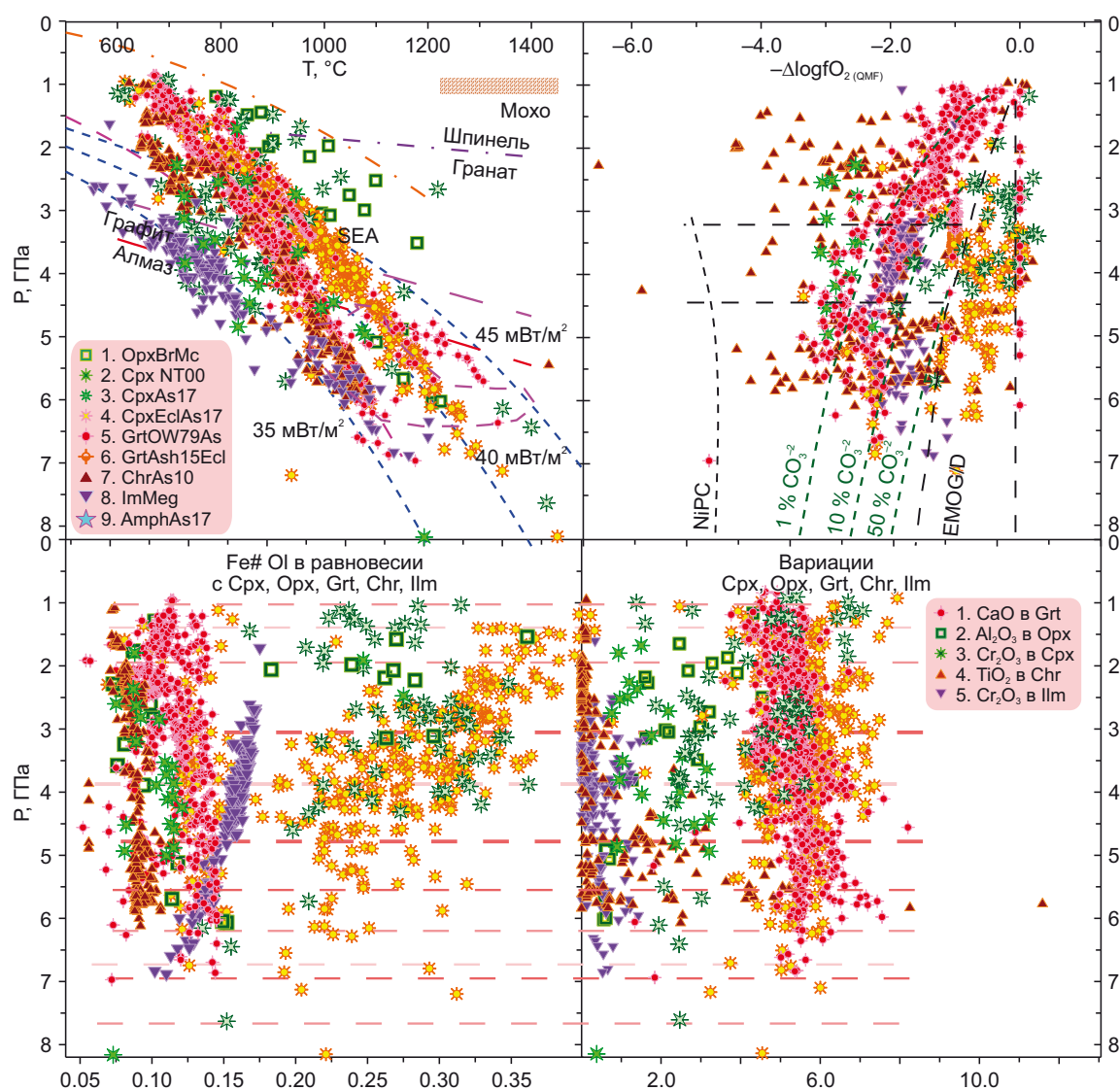


Рис. 10. РТХ – fO_2 диаграмма для всех ксенокристаллов из трубки Малокуонамской. Условные обозначения см. на рис. 9.

Fig. 10. PTC – fO_2 diagram for all xenocrysts from Malokouonamsky pipe. See symbols in Fig. 9.

al., 2013]. По оценкам для гранатов и Сrx содержание CO_2 в сосуществующем расплаве составляет 1–10 %, а для ильменитов – 50 %.

Гранаты и шпинели вместе с низкотемпературными Орх и Сrx создают тот же адвективный геотермический тренд, что и предыдущий, начинающийся от 1000 °C на границе литосфера – астеносфера (LAB) при геотерме 35 мВт/м² и заканчивающийся около 600 °C на границе Мохо. РТ-траектория для ильменита полностью совпадает с этой РТ-траекторией и увеличивается до 8.0–7.5 ГПа с отклонениями от высокотемпературного поля вблизи LAB. Верхняя часть, начиная с 4 ГПа, нагрета неравномерно, при этом отмечаются тренды Орх и Сrx, достигающие плюмовой SEA (90 мВт/м²) геотермы [O'Reilly, Griffin, 1985]. Полупромышленная трубка Малокуонамская содержит значительную часть эклогитовых гранатов, которые дают РТ-тренд, очень похожий на рассчитанный для алмазных включений [Ashchepkov et al., 2023], с ростом содержания FeO в гранатах при снижении расчетного давления к средней части разреза мантии. Омфациты дают несколько менее глубинные условия.

На графике Р – Fe# наблюдается разделение тренда на низкие значения Fe# до 0.05 для дунитовых гранатов и обычные значения, близкие к Fe# ~0.1. Гранаты из холодного тренда обычно содержат меньше Са, <4 мас. % СаО. Верхняя часть тренда демонстрирует верлитовые тенденции: СаО растет до 6 на уровне 4 ГПа. Значения Fe# пироксенов немного выше, чем у гранатов, но те, что относятся к высокотемпературному тренду, существенно более богаты железом, что соответствует протокимберлитовому тренду, а эклогитовые дают значения вплоть до Fe# ~0.35. Оценки РТ хромита в целом совпадают с оценками AGG граната. В хромитах обнаружена существенная примесь TiO_2 , достигающая 10 % вблизи LAB и вплоть до 5 ГПа. В ильменитах из метасоматитов отмечается спорадическое увеличение содержания Cr_2O_3 до 3–4 ГПа на уровне пироксеновой линзы и вблизи LAB.

Окислительный режим в мантии под трубкой Малокуонамской повторяет закономерности, установленные для большинства трубок Якутии [Ashchepkov et al., 2010, 2023].

6. ДИАГРАММЫ МИТЧЕЛЛА (5Е) ДЛЯ СОСТАВОВ МСА

По данным микрозондовых анализов МСА (оксиды основных и примесных элементов) из трубок Ленинград и Малокуонамской были построены диаграммы 5Е. Их составы были сопоставлены с составом МСА трубки Карове, которая является наиболее продуктивной на CLIPPIR алмазы, и был дан прогноз вероятности обнаружения в полупромышленной трубке Малокуонамской и убого-алмазоносной трубке Ленинград таких алмазов.

Диаграммы 5Е МСА исследуемых кимберлитов и ряд сопутствующих графиков показаны на рис. 3, 11, 12. Они отмечены характерным контуром составов МСА

слабоалмазоносной трубки Карове, где регулярно добываются CLIPPIR алмазы. На треугольных диаграммах, отображающих состав пиропов и диопсидов, также показаны контуры составов этих минералов из трубки Карове. Это позволяет наглядно сравнить составы минералов из прогнозируемых трубок с эталонной трубкой, содержащей CLIPPIR-алмазы.

6.1. 5Е диаграммы составов МСА трубки Ленинград

Как видно на рис. 11, диаграммы демонстрируют достаточно высокую сходимость составов МСА трубки Ленинград с составами МСА трубки Карове. Для эклогитового тренда пиропов характерна практически полная сходимость составов и частота встречаемости КГ – G1, G2, G3 и G5, при некотором расхождении частоты встречаемости КГ перидотитового тренда – G9, G10, G11. При этом составы пиропов трубки Ленинград не выходят за характерный контур составов пиропов трубки Карове. Такую же сходимость по частоте встречаемости ХГГ демонстрируют диопсиды (D2, D5, D6) и хромиты (S1, S3, S4, S5, S6, S10), что отражается и на близости графиков их титанистости (мас. % TiO_2). Составы значительной части зерен диопсидов и около 99 % зерен хромитов попадают в контур поля составов этих МСА трубки Карове. Тренд титанистости пиропов и диопсидов трубки Ленинград выражен на треугольной диаграмме ($\text{Na}_2\text{O} - \text{MnO} - \text{TiO}_2$). Наибольшим расхождением составов по частоте встречаемости ХГГ (i4, i5, i6, i8) характеризуются ильмениты, хотя все их зерна относятся к маложелезистым разностям ($\text{Fe}_2\text{O}_3 < 15.0$ мас. %) и лежат в области высокой сохранности алмазов. Суммарная сходимость составов МСА сравниваемых трубок по частотам встречаемости их КГ/ХГГ, оцениваемая по евклидовым расстояниям, высокая и составляет 74 %, что аналогично составам МСА трубки Гриба (сходимость с Карове Р=74 %), где добываются крупные алмазы типа CLIPPIR [Zinchenko, Ivanov, 2021].

6.2. 5Е диаграммы составов МСА трубки Малокуонамской

Как показывают выполненные исследования МСА трубки Малокуонамской на основе 5Е диаграмм, имеются значительные расхождения в их составах с МСА трубки Карове (рис. 12). Наиболее существенные отклонения от эталонного контура составов МСА трубки Карове отмечаются для ильменитов, практически целиком попадающих в область высокожелезистых магнитных разностей (ХГГ – i5, i9 и i11). Лишь единичные их зерна попали в область составов низкожелезистых ильменитов трубки Карове.

Линейная диаграмма содержаний Fe_2O_3 в ильменитах сравниваемых трубок иллюстрирует эту тенденцию – более половины зерен из кимберлитов трубки Малокуонамской содержат более 15 % Fe_2O_3 , попадая в область условий окислительного растворения алмаза. Существенно отклоняются от эталонного контура

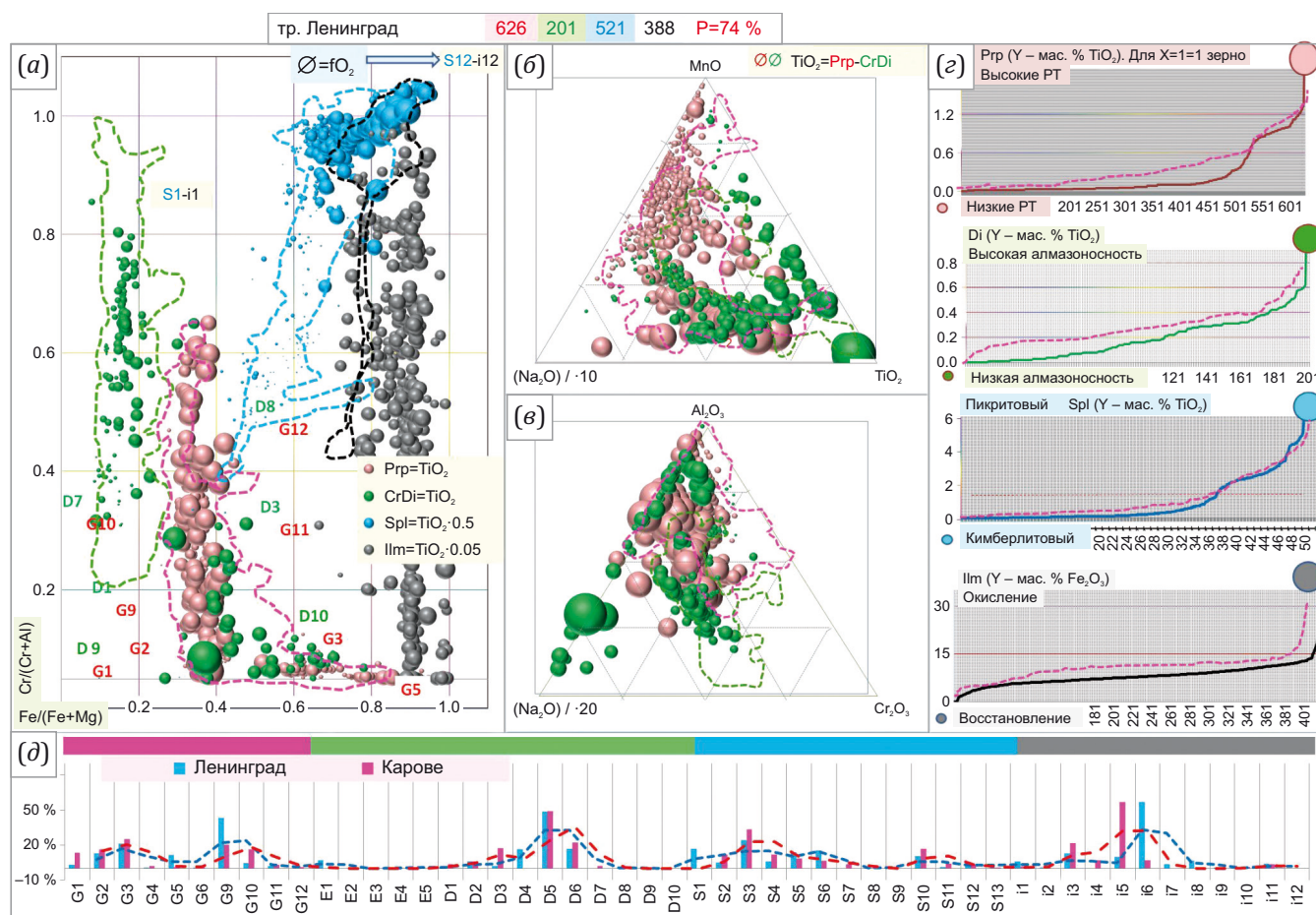


Рис. 11. 5E диаграмма МСА (а), диаграммы составов пиропов и диопсидов (б, в) трубки Ленинград, кумулятивные графики составов зерен МСА и физико-химических параметров их кристаллизации (з) и гистограмма частот встречаемости кластерных групп минералов (д):

(а) – диаметры «пузырьков», пропорциональные содержанию (%) TiO_2 в пиропе и диопсиде, $\text{TiO}_2 \cdot 0.15$ в шпинелидах, $\text{TiO}_2 \cdot 0.05$ в ильменитах; (б, в) – MnO в пиропе и TiO_2 в диопсиде; (з) – по X – составы, по Y – зерна МСА; (д) – гистограммы кластерных групп (КГ) пиропов (G1-G12), энстатитов (E1-E5), диопсидов (D1-D10), хромшпинелей (S1-S13), ильменитов (i1-i12); таблица в верхней части – количество проанализированных зерен МСА и вероятность сходимости их составов с составами МСА трубки Карове; пунктирные линии на диаграммах – поля составов МСА эталонной трубки Карове, цветные линии – МСА трубки Ленинград; розовая пунктирная линия на частотных графиках КГ составов МСА – трубка Карове, голубая – трубка Ленинград.

Fig. 11. 5E DSM diagram (a), diagrams of pyrope and diopside compositions (б, в) of Leningrad pipe, cumulative graphs of DSM grain compositions and physico-chemical parameters of their crystallization (z) and histogram of frequencies of occurrence of cluster groups of minerals (d):

(a) – the diameters of the "bubbles" are proportional to the content (%) of TiO_2 in pyrope and diopside, $\text{TiO}_2 \cdot 0.15$ in spinelide, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0.05$ in ilmenite; (б, в) – MnO in pyrope and TiO_2 in diopsides; (з) – by X – compositions, by Y – grains DSM; (д) – histograms of cluster groups (CG) of pyrope (G1-G12), enstatite (E1-E5), diopside (D1-D10), chrome spinel (S1-S13), ilmenite (i1-i12); the table at the top shows the number of analyzed DSM grains and the probability of their convergence compositions with compositions of DSM of the Karowe pipe; the dotted lines on the diagrams are the fields of the DSM compositions of the Karowe reference pipe, the colored lines are the DSM of the Leningrad pipe; the pink dotted line on the frequency graphs of the CG compositions of the DSM depicts the Karowe pipe, the blue is the Leningrad pipe.

трубки Карове и составы части зерен диопсидов, отличающихся повышенной титанистостью – практически все зерна имеют $\text{TiO}_2 > 2.0$ мас. %. Тем не менее около 20 % зерен диопсидов трубки Малокуонамской попадают в контур составов диопсидов трубки Карове, трассируя перидотитовый тренд (ХГГ – D1, D2, D3). Расхождения в составах пиропов касаются как эклогитового тренда – в трубке Малокуонамской отсутствуют показав-

тельные КГ – G1 и G2, но отмечены G3 и G5, так и перидотитового – отсутствуют КГ – G9 и G10. Для хромитов характерны близкие частоты встречаемости ХГГ – S3 и S4, при значительном расхождении частоты встречаемости других ХГГ – S1, S5 и S6. Суммарная сходимость составов МСА сравниваемых трубок по частоте встречаемости их КГ и ХГГ, оцениваемая по евклидовому расстоянию, составляет всего лишь 20 %.

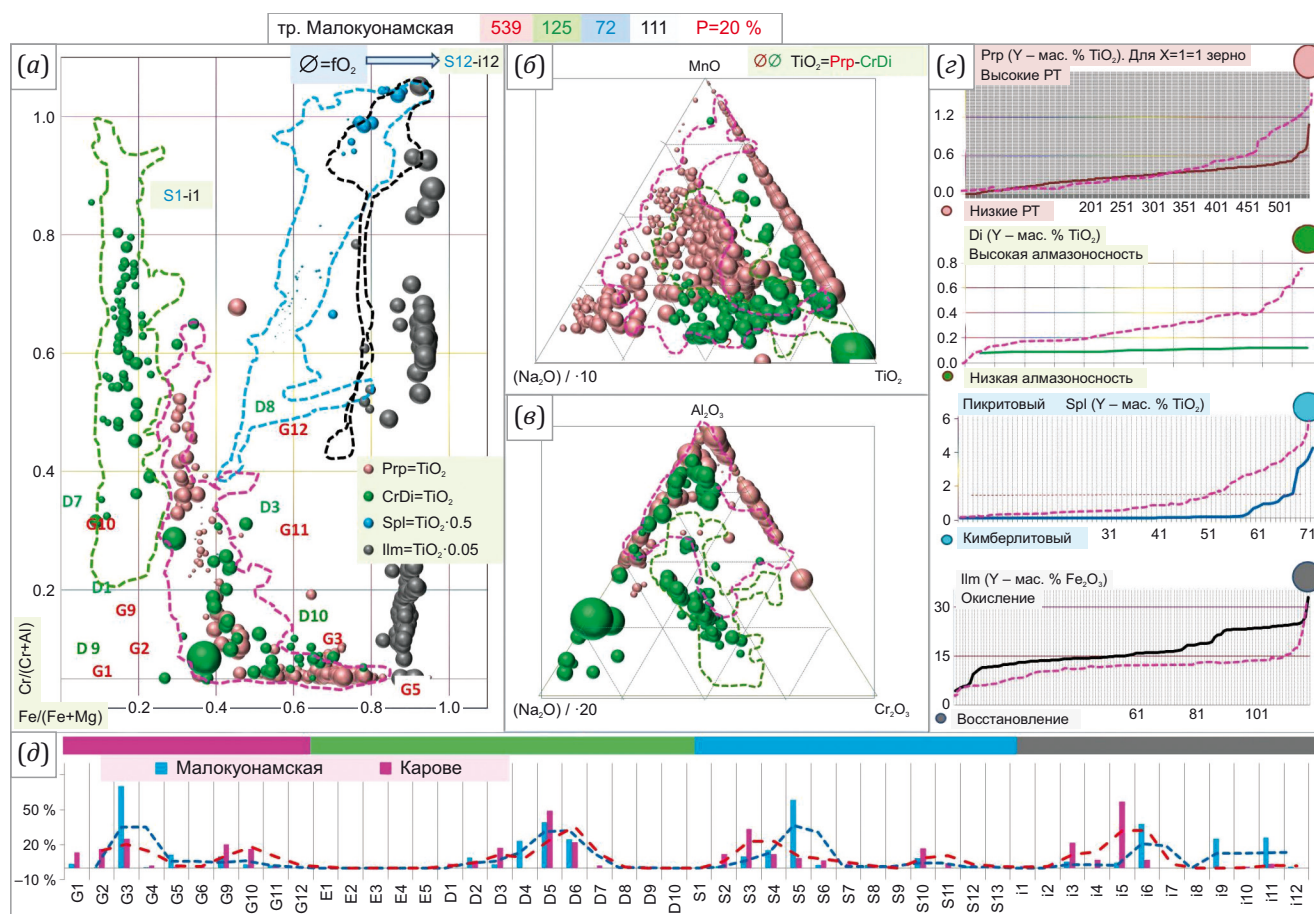


Рис. 12. 5E диаграмма MCA (а), диаграммы составов пиропов и диопсидов (б, в) трубки Малокуонамской, кумулятивные графики составов зерен MCA и физико-химических параметров их кристаллизации (з) и гистограмма частот встречаемости кластерных групп минералов (д):

(а) – диаметры «пузырьков», пропорциональные содержанию (%) TiO_2 в пиропе и диопсиде, $\text{TiO}_2 \cdot 0.15$ в шпинелидах, $\text{TiO}_2 \cdot 0.05$ в ильменитах; (б, в) – MnO в пиропе и TiO_2 в диопсиде; (з) – по X – составы, по Y – зерна MCA; (д) – гистограммы кластерных групп (КГ) пиропов (G1-G12), энстатитов (E1-E5), диопсидов (D1-D10), хромшпинелей (S1-S13), ильменитов (i1-i12); таблица в верхней части – количество проанализированных зерен MCA и вероятность сходимости их составов с составами MCA трубки Карове; пунктирные линии на диаграммах – поля составов MCA эталонной трубки Карове, цветные линии – MCA трубки Ленинград; розовая пунктирная линия на частотных графиках КГ составов MCA – трубка Карове, голубая – трубка Малокуонамская.

Fig. 12. 5E DSM diagram (а), diagrams of pyrope and diopside compositions (б, в) of Malokuonamsky pipe, cumulative graphs of DSM grain compositions and physico-chemical parameters of their crystallization (з) and frequency histogram for cluster groups of minerals (д):

(а) – the bubble diameters are proportional to the content (%) of TiO_2 in pyrope and diopside, $\text{TiO}_2 \cdot 0.15$ in spinel, $\text{Fe}_2\text{O}_3 \cdot 0.05$ in ilmenite; (б, в) – MnO in pyrope and TiO_2 in diopside; (з) – by X – compositions, by Y – grains DSM; (д) – histograms for cluster groups (CG) of pyropes (G1-G12), enstatites (E1-E5), diopsides (D1-D10), chrome spinels (S1-S13), ilmenites (i1-i12); the table at the top shows the number of analyzed DSM grains and the probability of their convergence compositions with compositions of the DSM of the Karowe pipe; dotted lines on the diagrams are the fields of the DSM compositions of the Karowe reference pipe; the colored lines are the DSM of the Malokuonamsky pipe; the pink dotted line on the frequency graphs of the CG compositions of the DSM depicts the Karowe pipe, the blue one depicts the Malokuonamsky pipe.

7. ОБСУЖДЕНИЕ

7.1. Общие благоприятные условия для поиска алмазов гигантских размеров на севере Якутии

Источник гигантских алмазов в эбеляхских россыпях до сих пор не определен [Grakhanov et al., 2015; Shatsky et al., 2015], хотя вокруг есть несколько потенциальных кимберлитовых полей, включая Куранахское, в пределах которого находится трубка Малокуонамская с полупромышленной алмазоносностью. Структурно-тектоническая позиция ряда мезозойских

кимберлитовых полей Анабарского района аналогична позиции африканских кимберлитов с CLIPPIR алмазами (см. рис. 2), то есть в пределах шовной зоны между архейскими палеотеррейнами [Ashchepkov et al., 2010, 2023]. Добыча здесь таких алмазов из россыпей Эбеляха подтверждает перспективы обнаружения их и в кимберлитах.

Кимберлитовые тела с низким содержанием алмазов в Анабарском районе расположены в зоне распространения россыпей с гигантскими алмазами типа

CLIPPIR [Ashchepkov et al., 2023]. Из-за природной редкости этих алмазов традиционные методы разведки и опробования таких кимберлитов неэффективны, а их разработка считается экономически нецелесообразной [Zinchenko, Ivanov, 2021]. Мы предложили метод статистико-геохимической аналогии составов МСА в кимберлитах, основанный на использовании диаграммы Митчелла – $Fe/(Fe+Mg) - Cr/(Cr+Al)$, к которой добавлен пятый элемент (Mn, Na, Ti), отражающий их химический состав – метод 5Е (5 элементов) [Zinchenko, Ivanov, 2021]. Этот метод может быть использован для прогнозирования содержания CLIPPIR алмазов в кимберлитах по аналогии и сравнению их с эталонными кимберлитами, содержащими такие алмазы (на основе критерия евклидова расстояния), на этапе поисково-разведочных работ на слабо- и убого-алмазоносных трубках Анабарского района.

Определенные группы кластеров МСА являются индикаторами физико-химических условий (мантийной среды), благоприятных для кристаллизации CLIPPIR алмазов. Они имеют схожую частоту встречаемости с МСА трубок, из которых извлекаются CLIPPIR алмазы, с которыми они парагенетически связаны [Zinchenko, Ivanov, 2021]. Термодинамический режим и структура мантии под трубками Малокуонамской и Ленинград были изучены на основании химических составов МСА и показаны на диаграммах РТХ – fO_2 (см. рис. 9, 10). Здесь низкотемпературная кондуктивная геотерма под мезозойскими полями Анабарского региона (для субкальциевых пиропов – 35 мВт/м^2) отражает миграцию расплавов на этапе формирования Североазиатского кратона. Интересной особенностью является то, что содержание алмазов в исследованных трубках коррелирует с эклогитовыми гранатами высокого давления. Это делает перспективным детальное изучение других месторождений и россыпей Анабарского района с использованием метода 5Е диаграмм и эклогитовой термобарометрии.

7.2. Петрологическая интерпретация высокой встречаемости мегакристаллических алмазов Па из эталонных объектов

В региональном тектоническом плане кимберлитовые трубки с гигантскими CLIPPIR алмазами (Карове, Премьер, Летсенг, Орапа) приурочены к краевым зонам архейского кратона Калахари, пограничным с протерозойскими складчатыми поясами с повышенной проницаемостью для глубинных кимберлитовых расплавов [Zinchenko, Ivanov, 2021]. Это означает, что такие области могут включать кимберлиты, которые, по-видимому, имеют сублитосферные источники. Они могут содержать включения мейджоритовых гранатов [Smith et al., 2017], что указывает на дополнительное давление $>7.5 \text{ ГПа}$. Но это не означает, что кристаллизация гигантских алмазов CLIPPIR происходила в сублитосферной мантии, поскольку они также содержат включения СКЛМ. Соединение сублитосферной и верхней эклогитовой магматических камер могло бы

способствовать передаче дополнительного давления от сублитосферных источников к верхним камерам за счет гидравлического воздействия.

Наличие большого количества эклогитов является признаком высокого содержания субдуцированного материала, который ассоциирует с количеством субдуцированного углерода. Конечно, этот материал должен находиться где-то рядом с LAB. Обилие марганца в гранатах и ильменитах также может быть дополнительным признаком субдуцированного материала [Korolev et al., 2018].

Низкие окислительные условия являются одним из основных факторов, поскольку CLIPPIR алмазы часто содержат металлическое железо и другие металлы. Таким образом, присутствие металлического и сульфидного материала, стабилизирующего рост алмаза, в силикатах и особенно в мегакристаллах граната также является благоприятным фактором.

Согласно диаграмме Митчелла 5Е для трубок Карове и им. В. Гриба, наиболее распространенной является группа высокохромистого и высокомагнезиального ильменита, источником которого являются мантийные метасоматиты в основании литосферы. Ильмениты с низким содержанием Cr должны быть также богаты Mg и представлять собой продукты кристаллизации из нефракционированного протокимберлита. Поскольку гигантские алмазы на самом деле являются мегакристаллами, основная камера должна быть довольно большой и располагаться вблизи LAB, в окружении богатых ильменитом дунитов (метасоматитов). В мантийном блоке под трубкой Карове наблюдается довольно продолжительный, но узкий тренд фракционирования (см. рис. 3). Это означает, что здесь литосфера была, по существу, проницаемой для расплавов.

Как в трубке им. В. Гриба, так и в трубке Карове хромиты богаты Cr-Mg, и их состав близок к составу включений в алмазах [Sobolev, 1977]. Содержание TiO_2 во включениях алмазов из трубки Карове довольно велико и достигает 5 мас. %. Предполагается, что кристаллизация таких хромитов вблизи LAB обусловлена влиянием богатых H_2O протокимберлитовых магм.

Хромдиопсиды в трубках Карове и им. В. Гриба образуют протяженный тренд. Содержание в них Cr_2O_3 достигает 4 мас. %, а Al_2O_3 не очень велико, что характерно для метасоматитов из нижней части мантийной литосферы. Количество эклогитовых омфацитов в алмазных включениях и в ксенолитах довольно велико как в трубке Карове [Motsamai et al., 2018], так и в трубке им. В. Гриба [Shchukina et al., 2019; Kargin, 2021].

Пиропы из трубки им. В. Гриба демонстрируют ярко выраженный пироксенитовый тренд в верхней и нижней части разреза вблизи LAB. Количество субкальциевых гранатов велико только в нижней части мантийной толщи, что является благоприятным фактором, но не главным. Это означает, что дуниты при плавлении концентрируют расплавы в нижней части разреза мантии. Для трубки Карове характерны мегакристаллические пироп-альмандиновые гранаты.

Таким образом, сочетание всех этих факторов довольно уникально, и рост крупных алмазов мог происходить в основном в шовных тектонических зонах, где концентрировались субдукционные эклогиты. Например, алмазные включения из россыпи Эбелях на 90 % состоят из эклогитовых минералов [Shatsky et al., 2015].

7.3. Модель происхождения CLIPPIR алмазов

Наиболее вероятной моделью происхождения гигантских алмазов является их рост в глубинном протокимберлитовом магматическом очаге вблизи LAB. При этом существенна его прямая связь с гораздо более глубоким сублитосферным магматическим очагом. Это подтверждается наличием мейджоритовых включений, которые при тех же расчетах должны соответствовать 100–150 ГПа [Gasparik, 2002]. Мощность кратона определяется границей в 8.5–9.0 ГПа (~290–300 км) [Agee, 1998], которая физически соответствует границе инверсии плотности расплав – оливин, то есть ниже оливин обладает положительной плавучестью. И кратон, и в еще большей степени Анабарский щит, имеющие в основном богатый оливином мантийный субстрат, «плавают» на более плотном астеносферном субстрате. Значение P у LAB, в геологической литературе повсеместно определяемое как 6.5–7.0 ГПа (250–270 км), соответствует пределу устойчивости оливина в присутствии расплава [Peslier et al., 2010, 2012]. Внедрение богатых летучими кимберлитов приводит к разрушению оливина и так называемому окислительному плавлению [Foley, 2011] с образованием деформированных перидотитов, которые обычно ассоциируются с астеносферой, являясь породами, подвергшимися гидравлическому разрушению при взаимодействии с протокимберлитами. Глубина залегания кимберлитовых очагов, вероятно, значительно больше, поскольку они содержат включения из нижней мантии [Kaminsky, 2012], а их изотопия Pb HIMU (Hfμ) свидетельствует о формировании на границе ядра и мантии [Collerson et al., 2010]. Такие глубокие сублитосферные магматические очаги должны были содержать большое количество сульфидов и самородных металлов и иметь очень низкую летучесть кислорода [Zelenski et al., 2024]. Обилие большого количества сульфидов и металлов в CLIPPIR алмазах свидетельствует о присутствии таких глубоких расплавов при их образовании. Но эти алмазы также содержат типичные включения из литосферной мантии, и, следовательно, они кристаллизовались на глубинном уровне литосферы [Moore, Helmstaedt, 2023]. Химический состав алмазов Па, не содержащих В-центров, и их изотопный состав можно объяснить очень низким содержанием литосферного материала в субстрате, где кристаллизуются эти алмазы [Regier et al., 2020]. Основным фактором кристаллизации таких алмазов должно быть наличие соединенных литосферной и сублитосферной камер, которые также обеспечивают дополнительное давление за счет гидравлического эффекта (гидростатический парадокс)

[Ashchepkov et al., 2023]. Субстрат должен быть слабо окислен. Предположительно материалом, который создает восстановительные условия [Chatterjee et al., 2023], являются эклогиты из самых глубоких частей литосферы, содержащие углерод, попавший туда в результате субдукции. Этот субдукционный материал, вероятно, может быть насыщен летучими веществами, в основном водой. Это способствует кристаллизации смеси расплава и флюида, похожей на пегматит. Расплав взаимодействует с кристаллами силикатных минералов стенок канала. Вероятно, должна наблюдаться существенно выраженная зональность алмазных кристаллов-гигантов, но ее описание в литературе отсутствует.

7.4. Эволюция мантийной литосферы под кимберлитами, содержащими CLIPPIR алмазы

Для создания модели образования подобных алмазов необходимо рассмотреть процессы, которые происходили в литосферной мантии под алмазоносной трубкой Карове (АК-6) [Motsamai et al., 2018]. Реконструкция мантийного разреза этой трубки представлена на рис. 13. Рудник АК-6 известен благодаря обнаружению большого количества крупных CLIPPIR алмазов весом до 1100 карат. Здесь найден сверхглубокий алмаз IIb, содержащий Fe-ферропериклаз и бриджманит. Условия роста для этого алмаза были определены как ≈ 23.5 ГПа и 1650 ± 200 °C [Gu et al., 2022]. Сверхглубокая природа происхождения этого алмаза очевидна.

Как можно видеть на рис. 13, более глубокая часть СКЛМ под рудником Карове содержит большое количество эклогитов. Более глубокая часть с содержанием железа $Fe\# \sim 0.15$, вероятно, соответствует параметрам протокимберлитов. Их взаимодействие с перидотитами привело к образованию более богатых Mg разновидностей, которые, начиная с $Fe\#_{ol} \sim 11$ –13 %, создают тенденцию к кристаллизации ильменита, по содержанию Mg соответствующего ильменитовым дунитам и расплавляющегося в нижней камере, затем в верхних камерах и в стенках каналов [Ashchepkov et al., 2023]. Все это сопровождается обогащением Cr и ростом содержания Fe, что соответствует фракционированию Ol при снижении давления. Эта тенденция близка к таковой для клинопироксенов с низким содержанием Cr мегакристаллического типа.

Вблизи LAB обнаружены тренды пиропов с низким содержанием Cr (как в деформированных перидотитах) и повышенной $Fe\#$, а затем выше они демонстрируют снижение содержания Fe из-за взаимодействия с перидотитами. Эклогитовые гранаты также демонстрируют тенденцию к увеличению $Fe\#_{ol}$ от 0.15–0.30 % при снижении давления с 6.5 до 3.0 ГПа, что связано с кристаллизацией силикатов. Интересно то, что в другой кимберлитовой фазе не наблюдается столь выраженного тренда, что характеризует ее локализацию в пределах более проницаемых зон мантии. Существуют как минимум два субвертикальных тренда без изменений содержания Fe, что может объясняться

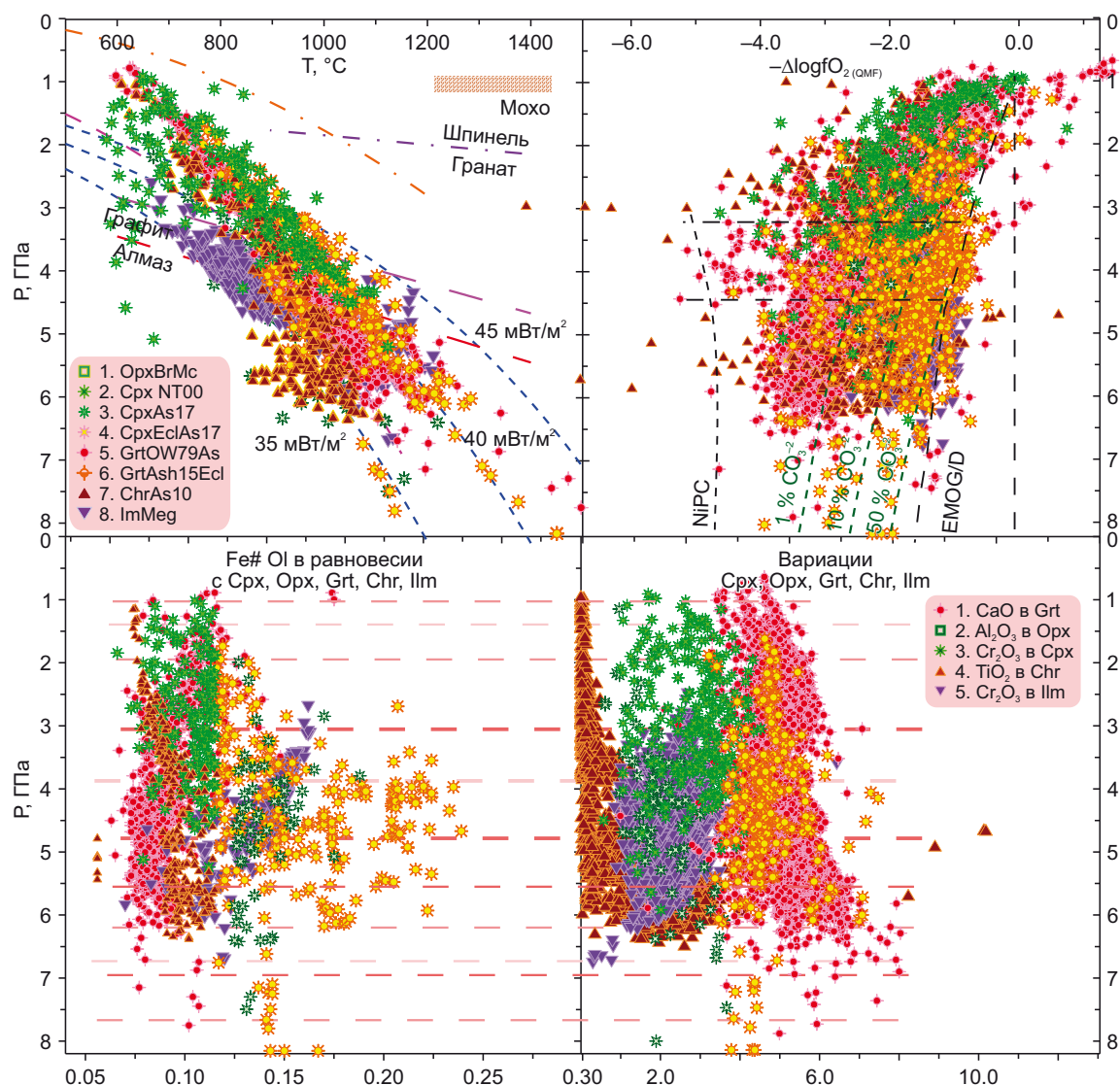


Рис. 13. Диаграмма PТХ – fO_2 для всех ксенокристаллов из кимберлитов трубки Карове. Условные обозначения см. на рис. 9.
Fig. 13. PTC – fO_2 diagram for all xenocrysts from kimberlites of the Karowe pipe. See symbols in Fig. 9.

быстрым подъемом в пределах трещин без существенного проявления кристаллизационной дифференциации и изменений $Fe\#_{OI}$. Это указывает на довольно активное образование трещин в процессе тектонической активности.

Магнезиальная часть диаграммы $P - Fe\#_{OI}$ демонстрирует присутствие Na-Al-Cr пироксенов в мантийной толще под трубкой Карове. Обогащение Al и Na является признаком адакитового типа метасоматоза, который был вызван частичным плавлением экологитов, богатых летучими веществами. На диаграмме можно увидеть две такие ветви с различными значениями Fe-Al. Имели место по крайней мере два эпизода проникновения и миграции расплава по трещинам.

7.5. Значение и перспективы Анабарского района

Находки крупных кристаллов мегакристаллических CLIPPIR алмазов в россыпях (см. рис. 1, б, в) позво-

ляют предположить, что район вблизи границы Анабарского щита является весьма перспективным для подобных находок. Конечно, наиболее перспективный район находится как раз у р. Эбелях. В Лучаканском поле и нескольких трубках Куранахского поля обнаружено много кимберлитов с очень высоким содержанием экологитов. Эти трубки были предварительно минералогически исследованы, и минералоги в основном искали фиолетовые хромпиropy, а оранжевые гранаты не учитывались при оценке перспектив кимберлитов. Более того, в работах У. Гриффина [Griffin et al., 1999a, 1999b; Griffin, O'Reilly, 2007] было высказано предположение, что деляминация литосферы при воздействии плюмовых расплавов, связанных с Сибирским суперплюмом, определяет весь этот регион как низкоперспективный.

Но дальнейшие поисковые работы позволили обнаружить множество перспективных алмазных россыпей в междуречье р. Анабар – р. Оленек [Grakhanov et al.,

2009, 2015]. В работе В. Шатского и его коллег [Shatsky et al., 2015] показано, что источником алмазов в эбеляхских россыпях были в основном эклогиты, а А. Логвинова (неопубликованные работы) указывает на пироксенитовые и эклогитовые источники алмазов в триасовых отложениях близ устья р. Лены.

Работы авторов показывают, что мантийная литосфера Анабарского щита сильно истощена [Ashchepkov et al., 2010, 2023]. Однако в средней части СКЛМ имеется очень толстая пироксенит-эклогитовая линза – результат переплавления древних раннеархейских мантийных эклогитов под воздействием плюмовых и субдукционных расплавов [Kostrovitsky et al., 2022; Kalashnikova et al., 2021]. Некоторые трубки в пределах Ары-Мастахского и Дюкенского полей выглядят пока не очень перспективно.

Структура мантии под Куранахским, Западно-Укукитским и Чомурдахским полями оказалась одинаковой, так как в основном перидотитовая мантия обнаруживает здесь слоистость, сложенную восемью горизонтами (палеосубдукционными пластинами) [Ashchepkov et al., 2023]. В некоторых трубках содержится гораздо больше эклогитового материала. Таким образом, необходимо еще раз проверить все концентраты и протестировать эклогитовые минералы, чтобы уточнить состав мантии и структуру магматических протокимберлитовых систем. Интересно, что иногда эклогиты довольно неравномерно распределены в мантийных колоннах даже в пределах одного поля, а некоторые, как Робертс-Виктор, аномально обогащены эклогитами, в том числе алмазоносными [Ashchepkov et al., 2023]. Это позволяет предположить, что эклогиты формируются в виде вертикально-наклонных тел в СКЛМ.

Необходимо отметить, что триасовые трубки Прианабарья в основном показывают, что интервал их захвата смещен к среднему и верхнему интервалу давления, а девонские трубки, как Ленинград, демонстрируют более глубокий захват материала. Таким образом, можно сделать вывод, что источники таких алмазных россыпей, как Эбелях, также были девонскими и в настоящее время, по существу, денудированы. Более того, некоторые авторы предположили, что источники были докембрийскими [Afanasyev, Pokhilenko, 2022] и сейчас их очень трудно найти. Но наличие таких трубок, как Ленинград и Аэрогеологическая, позволяет предположить, что будут обнаружены перспективные коренные залежи алмазов типа CLIPPIR.

Мантийные метасоматические ассоциации в северной части Сибирского кратона богаты амфиболом, связанным с субдукционными процессами [Ashchepkov et al., 2023], что увеличивает перспективы обнаружения типичных субдукционных алмазов.

8. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Структурно-тектоническое положение большинства мезозойских кимберлитовых полей Анабарского района в пределах Хапчанского и Далдынского террейнов сходно с положением африканских кимберли-

тов с CLIPPIR алмазами, локализованными на границе архейских кратонов с протерозойскими складчатыми поясами. Обнаружение таких алмазов в эбеляхских россыпях подтверждает перспективность их обнаружения в якутских кимберлитах.

Мантийные толщи под трубками Малокуонамской и Ленинград сильно истощены в нижней части СКЛМ. В средней части мантийного разреза отмечается эклогит-пироксенитовая линза большой мощности.

Обилие эклогитов в кимберлитах возле Анабарского щита и близлежащих районах увеличивает вероятность обнаружения месторождений CLIPPIR алмазов.

Разработанный авторами метод 5Е диаграмм Митчелла и петрохимической кластеризации МСА в настоящее время является уникальным алгоритмом, позволяющим прогнозировать высококачественные CLIPPIR алмазы в кимберлитах.

Близость составов минералов-спутников алмазов трубок Ленинград и Карове составляет 74 %, что аналогично составам МСА трубки им. В. Гриба (сходимость $P=74\%$), где в настоящее время добываются крупные CLIPPIR алмазы. Перспективы находок в трубке Ленинград CLIPPIR алмазов высоки.

Сходство составов минералов-спутников алмазов трубок Малокуонамской и Карове невелико и составляет всего 20 %. Перспективы находок в трубке Малокуонамской CLIPPIR алмазов невелики.

Метод 5Е диаграмм может быть использован для прогнозирования CLIPPIR алмазов в кимберлитах Анабарского региона на стадии поиска и разведочных работ на слабоалмазоносных трубках, ранее оценивавшихся как непромышленные, что может значительно повысить их инвестиционный потенциал.

9. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы статьи выражают благодарность главному научному сотруднику ИГХ СО РАН С.И. Костровицкому за предоставленные образцы проб для микрозондового изучения МСА и ценные советы при подготовке статьи и сотрудникам аналитических служб ИГАБМ СО РАН и ИГМ СО РАН. Авторы выражают глубокую признательность д.г.-м.н. Н.Н. Зинчуку и д.г.-м.н. З.В. Специусу за полезные замечания, позволившие качественно улучшить рукопись.

10. ЗАЯВЛЕННЫЙ ВКЛАД АВТОРОВ / CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку рукописи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией.

All authors made an equivalent contribution to this article, read and approved the final manuscript.

11. РАСКРЫТИЕ ИНФОРМАЦИИ / DISCLOSURE

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов, связанного с этой рукописью.

The authors declare that they have no conflicts of interest relevant to this manuscript.

12. ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

- Afanasiev V.P., Ashchepkov I.V., Verzhak V.V., O'Brien H., Palessky S.V., 2013. PT Conditions and Trace Element Variations of Picroilmenites and Pyropes from Placers and Kimberlites in the Arkhangelsk Region, NW Russia. *Journal of Asian Earth Sciences* 70–71, 45–63. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2013.03.002>.
- Afanasiev V.P., Pokhilenko N.P., 2022. Approaches to the Diamond Potential of the Siberian Craton: A New Paradigm. *Ore Geology Reviews* 147, 104980. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2022.104980>.
- Agee C.B., 1998. Crystal-Liquid Density Inversions in Terrestrial and Lunar Magmas. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 107 (1–3), 63–74. [https://doi.org/10.1016/S0031-9201\(97\)00124-6](https://doi.org/10.1016/S0031-9201(97)00124-6).
- Allan P., 2024. Major Element Indicator Mineral Chemistry of the Lulo Kimberlite Province, Lunda Norte, Angola. In: Extended Abstracts of the 12th International Kimberlite Conference (July 8–12, 2024, Yellowknife). 12IKC-123. <https://doi.org/10.29173/ikc4137>.
- Ashchepkov I., Logvinova A., Spetsius Z., Downes H., 2023. Thermobarometry of Diamond Inclusions: Mantle Structure and Evolution beneath Archean Cratons and Mobile Belts Worldwide. *Geosystems and Geoenvironment* 2 (2), 10056. <https://doi.org/10.1016/j.geogeo.2022.100156>.
- Ashchepkov I.V., 2011. Program of the Mantle Thermometers and Barometers: Usage for Reconstructions and Calibration of PT Methods. *Herald of the Earth Sciences Department of RAS 3, NZ6008* (in Russian) [Ащепков И.В. Программа мантийных термометров барометров, использование: реконструкции и калибровки PT методов // Вестник Отделения наук о Земле РАН. 2011. № 3. NZ6008. <https://doi.org/10.2205/2011NZ000138>].
- Ashchepkov I.V., Ntaflou T., Logvinova A.M., Spetsius Z.V., Vladyskin N.V., 2017. Monomineral Universal Clinopyroxene and Garnet Barometers for Peridotitic, Eclogitic and Basaltic Systems. *Geoscience Frontiers* 8 (4), 775–795. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2016.06.012>.
- Ashchepkov I.V., Pokhilenko N.P., Vladyskin N.V., Logvinova A.M., Kostrovitsky S.I., Afanasiev V.P., Pokhilenko L.N., Kuligi S.S. et al., 2010. Structure and Evolution of the Lithospheric Mantle beneath Siberian Craton, Thermobarometric Study. *Tectonophysics* 485 (1–4), 17–41. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2009.11.013>.
- Babushkina S.A., 2005. Material, Petrological and Mineralogical Features of Kimberlites in Connection with the Revision of Geochronological Data (On the Example of the Malokuonamskaya Pipe, Yakutia). In: *Geology of Diamonds – Present and Future*. Voronezh State University, Voronezh, p. 725–732 (in Russian) [Бабушкина С.А. Вещественные, петрологические и минералогические особенности кимберлитов в связи с ревизией геохронологических данных (на примере трубки Малокуонамская, Якутия) // «Геология алмазов – настоящее и будущее». Воронеж: Воронежский государственный университет, 2005. С. 725–732].
- Bowen D.C., Ferraris R.D., Palmer C.E., Ward J.D., 2009. On the Unusual Characteristics of the Diamonds from Letšeng-la-Terae Kimberlites, Lesotho. *Lithos* 112 (2), 767–774. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2009.04.026>.
- Brey G.P., Köhler T., 1990. Geothermobarometry in Four-Phase Lherzolites. II. New Thermobarometers, and Practical Assessment of Existing Thermobarometers. *Journal of Petrology* 31 (6), 1353–1378. <https://doi.org/10.1093/petrology/31.6.1353>.
- Chatterjee A., Chalapathi Rao N.V., Pandey R., Pandey A., 2023. Mantle Transition Zone-Derived Eclogite Xenoliths Entrained in a Diamondiferous Mesoproterozoic (~1.1 Ga) Kimberlite from the Eastern Dharwar Craton, India: Evidence from a Coesite, K-Omphacite, and Majoritic Garnet Assemblage. *Geological Magazine* 160 (5), 874–887. <https://doi.org/10.1017/S0016756822001315>.
- Chepurov A.I., Sonin V.M., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., 2020. Preservation Conditions of CLIPPIR Diamonds in the Earth's Mantle in a Heterogeneous Metal–Sulphide–Silicate Medium (Experimental Modeling). *Journal of Mineralogical and Petrological Sciences* 115 (3), 236–246. <https://doi.org/10.2465/jmps.190818>.
- Chinn I., 2024. Deciphering the History of CLIPPIR Diamonds from Their Morphology and Surface Features. In: Extended Abstracts of the 12th International Kimberlite Conference (July 8–12, 2024, Yellowknife). 12IKC-4202. <https://doi.org/10.29173/ikc4202>.
- Collerson K.D., Williams Q., Ewart A.E., Murphy D.T., 2010. Origin of HIMU and EM-1 Domains Sampled by Ocean Island Basalts, Kimberlites and Carbonatites: The Role of CO₂-Fluxed Lower Mantle Melting in Thermochemical Upwellings. *Physics of the Earth and Planetary Interiors* 181 (3–4), 112–131. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2010.05.008>.
- Daver L., Bureau H., Boulard E., Gaillou E., Cartigny P., Pinti D.L., Belhadj O., Guignot N., Foy E., Estèvè I., Baptiste B., 2022. From the Lithosphere to the Lower Mantle: An Aqueous-Rich Metal-Bearing Growth Environment to Form Type I_{ib} Blue Diamonds. *Chemical Geology* 613, 121163. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2022.121163>.
- Dawson J.B., Stephens W.E., 1975. Statistical Classification of Garnets from Kimberlites and Xenoliths. *The Journal of Geology* 83 (5), 589–607. <https://doi.org/10.1086/628143>.
- Foley S.F., 2011. A Reappraisal of Redox Melting in the Earth's Mantle as a Function of Tectonic Setting and Time. *Journal of Petrology* 52 (7–8), 1363–1391. <https://doi.org/10.1093/petrology/egq061>.
- Garanin V.K., Kudryavtseva G.P., Marfunin A.S., Mikhailichenko O.A., 1991. Inclusions in Diamond and Diamond-Bearing Rocks. MSU Publishing House, Moscow, 240 p. (in Russian) [Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Марфуни А.С., Михайличенко О.А. Включения в алмазе и алмазоносные породы. М.: Изд-во МГУ, 1991. 240 с.].
- Gasparik T., 2002. Experimental Investigation of the Origin of Majoritic Garnet Inclusions in Diamonds. *Physics and Chemistry of Minerals* 29, 170–180. <https://doi.org/10.1007/s00269-001-0223-5>.
- Grakhanov S.A., Goloburdina M.N., Ivanov A.S., Ashchepkov I.V., 2024. Mineralogical and Petrographic Characteristics of Diamond-Bearing Formations of the Bulkur Anticline,

Republic of Sakha (Yakutia). Regional Geology and Metallogeny 98, 41–63 (in Russian) [Граханов С.А., Голобурдина М.Н., Иванов А.С., Ащепков И.В. Минералогическая характеристика алмазоносных образований Булкурской антиклинали, Республика Саха (Якутия) // Региональная геология и металлогения. 2024. № 98. С. 41–63].

Grakhanov S.A., Zharukin R.A., Bogush I.N., Yadrinkin A.B., 2009. Discovery of Neotriassic Diamond Placers in the Olenyok Bay, Laptev Sea. National Geology 1, 53–61 (in Russian) [Граханов С.А., Зарукин Р.А., Богуш И.Н., Ядренкин А.В. Открытие верхнетриасовых россыпей алмазов в акватории Оленёкского залива моря Лаптевых // Отечественная геология. 2009. № 1. С. 53–61].

Grakhanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V., 2015. The Age of Predictable Primary Diamond Sources in the Northeastern Siberian Platform. Doklady Earth Sciences 465, 1297–1301. <https://doi.org/10.1134/S1028334X15120193>.

Griffin W.L., Fisher N.I., Friedman J., Ryan C.G., O'Reilly S.Y., 1999a. Cr-Pyropes Garnets in the Lithospheric Mantle. I. Compositional Systematics and Relations to Tectonic Setting. Journal of Petrology 40 (5), 679–704. <https://doi.org/10.1093/ptro/40.5.679>.

Griffin W.L., O'Reilly S.Y., 2007. Cratonic Lithospheric Mantle: Is Anything Subducted? Episodes 30 (1), 43–53. <https://doi.org/10.18814/epiugs/2007/v30i1/006>.

Griffin W.L., Ryan C.G., Kaminsky F.V., O'Reilly S.Y., Natapov L.M., Win T.T., Kinny P.D., Ilupin I.P., 1999b. The Siberian Lithosphere Traverse: Mantle Terranes and the Assembly of the Siberian Craton. Tectonophysics 310 (1–4), 1–35. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(99\)00156-0](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(99)00156-0).

Gu T., Pamato M.G., Novella D., Alvaro M., Fournelle J., Brenker F.E., Wang W., Nestola F., 2022. Hydrous Peridotitic Fragments of Earth's Mantle 660 km Discontinuity Sampled by a Diamond. Nature Geoscience 15, 950–954. <https://doi.org/10.1038/s41561-022-01024-y>.

Gudmundsson G., Wood B.J., 1995. Experimental Tests of Garnet Peridotite Oxygen Barometry. Contributions to Mineralogy and Petrology 119, 56–67. <https://doi.org/10.1007/BF00310717>.

Gurney J., Moore R., 1991. Geochemical Correlations between Kimberlitic Indicator Minerals and Diamonds as Applied to Exploration. In: Extended Abstracts of the Fifth International Kimberlite Conference (June, 1991, Araxá, Brazil). Vol. 5. CPRM, p. 125–126. <https://doi.org/10.29173/ikc2486>.

Ivanov A.S., 2016. A Method for Calculating Mineral Parageneses in Kimberlites. In: Mathematical Research in Natural Sciences. Proceedings of the XIII All-Russian Scientific School with International Participation (October 17–18, 2016). Apatity, p. 173–182 (in Russian) [Иванов А.С. Метод расчета минеральных парагенезисов в кимберлитах // Математические исследования в естественных науках: Материалы XIII Всероссийской (с международным участием) научной школы (17–18 октября, 2016 г.). Апатиты, 2016. С. 173–182].

Ivanov A.S., 2020. Bubble Chart of the Compositions of Pyropes. In: Geology and Mineral Resources of the North-

east of Russia. Proceedings of the X All-Russian Scientific and Practical Conference with International Participation (April 08–10, 2020). Publishing House of NEFU, Yakutsk, p. 343–346 (in Russian) [Иванов А.С. Пузырьковые диаграммы состава пиропов // Геология и минерально-сырьевые ресурсы северо-востока России: Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием (08–10 апреля 2020 г.). Якутск: Изд-во СВФУ, 2020. С. 343–346].

Kalashnikova T.V., Solov'yova L.V., Kostrovitsky S.I., 2021. Geochemical Characteristics of Eclogites and Clinopyroxenites from Kimberlite Pipes of the Siberian Craton. In: Petrology and Geodynamics of Geological Processes. Proceedings of the XIII All-Russian Petrographic Meeting (with the Participation of Foreign Scientists) (September 06–13, 2021). Vol. 2. Publishing House of Sochava Institute of Geography SB RAS, Irkutsk, p. 10–12 (in Russian) [Калашникова Т.В., Соловьева Л.В., Костровицкий С.И. Геохимические характеристики эклогитов и клинопироксенитов из кимберлитовых трубок Сибирского кратона // Петрология и геодинамика геологических процессов: Материалы XIII Всероссийского петрографического совещания (с участием зарубежных ученых) (06–13 сентября 2021 г.). Иркутск: Изд-во Института географии им. В.Б. Сочавы СО РАН, 2021. Т. 2. С. 10–12].

Kalra H., Dongre A., Vyas S., 2024. On the Possible Primary Sources of Koh-i-Noor and Other Golkonda Diamonds. Journal of Earth System Science 133, 51. <https://doi.org/10.1007/s12040-024-02260-z>.

Kaminsky F., 2012. Mineralogy of the Lower Mantle: A Review of "Super-Deep" Mineral Inclusions in Diamond. Earth-Science Reviews 110 (1–4), 127–147. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.10.005>.

Kaminsky F.V., Belousova E.A., 2009. Manganoan Ilmenite as Kimberlite/Diamond Indicator Mineral. Russian Geology and Geophysics 50 (12), 1212–1220. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2009.11.019>.

Kargin A.V., 2021. Multistage Mantle Metasomatism During the Generation of Kimberlite Melts: Evidence from Mantle Xenoliths and Megacrysts of the Grib Kimberlite, Arkhangelsk, Russia. Petrology 29, 221–245. <https://doi.org/10.1134/S0869591121030024>.

Kargin A.V., Golubeva Y.Y., 2017. Geochemical Typification of Kimberlite and Related Rocks of the North Anabar Region, Yakutia. Doklady Earth Sciences 477, 1291–1294. <https://doi.org/10.1134/S1028334X17110022>.

Kennedy C.S., Kennedy G.C., 1976. The Equilibrium Boundary between Graphite and Diamond. Journal of Geophysical Research 81 (14), 2467–2470. <https://doi.org/10.1029/JB081i014P02467>.

Kornilova V.P., Spetsius Z.V., Pomazanskiy B.S., 2016. Petrographic-Mineralogical Peculiarities and Feasibility of Kimberlite Pipes Lorik and Svetlana Diamond Grade Re-Estimation (West Ukukit Field, Yakutia). Regional Geology and Metallogeny 68, 92–99 (in Russian) [Корнилова В.П., Специс З.В., Помазанский В.С. Петрографо-минералогические особенности и целесообразность переоценки алмазоносности кимберлитовых трубок Лорик и Светлана

(Западно-Укукитское поле, Якутия) // Региональная геология и металлогения. 2016. № 68. С. 92–99].

Korolev N., Kopylova M., Gurney J.J., Moore A.E., Davidson J., 2018. The Origin of Type II Diamonds as Inferred from Cullinan Mineral Inclusions. *Mineralogy and Petrology* 112, 275–289. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0601-z>.

Kostrovitsky S.I., Kalashnikova T.V., Ashchepkov I.V., 2022. Mineral Composition and PT Parameters of Crystallization of Mantle Rocks under Kimberlite Fields of the Anabar Region. *Geodynamics & Tectonophysics* 13 (4), 0665 (in Russian) [Костровицкий С.И., Калашникова Т.В., Ащепков И.В. Состав минералов и P-T-параметры кристаллизации мантийных пород под кимберлитовыми полями Прианабарья // Геодинамика и тектонофизика. 2022. Т. 13. № 4. 0665]. <https://doi.org/10.5800/GT-2022-13-4-0665>.

Lavrent'ev Yu.G., Korolyuk V.N., Usova L.V., Nigmatulina E.N., 2015. Electron Probe Microanalysis of Rock-Forming Minerals with a JXA-8100 Electron Probe Microanalyzer. *Russian Geology and Geophysics* 56 (10), 1428–1436. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.09.005>.

Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., 1994. New Version of KARAT Program for Quantitative X-Ray spectral Microanalysis. *Journal of Analytical Chemistry* 49 (5), 462–468 (in Russian) [Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В. Новая версия программы «Карат» для количественного рентгеноспектрального микроанализа // Журнал аналитической химии. 1994. Т. 49. № 5. С. 462–468].

Lock N.P., Dawson J.B., 2013. Contrasting Garnet Lherzolite Xenolith Suites from the Letšeng Kimberlite Pipes: Inferences for the Northern Lesotho Geotherm. In: D.G. Pearson, H.S. Grütter, J.W. Harris, B.A. Kjarsgaard, H. O'Brien, N.V. Chalapathi Rao, S. Sparks (Eds), *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference* (February 6–11, 2012, Bangalore, India). Vol. 1. Springer, New Delhi, p. 29–44. https://doi.org/10.1007/978-81-322-1170-9_3.

Matheron J., 1968. *Fundamentals of Applied Geostatistics*. Mir, Moscow, 408 p. (in Russian) [Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. М.: Мир, 1968. 408 с.].

McGregor I.D., 1974. The System MgO-SiO₂-Al₂O₃: Solubility of Al₂O₃ in Enstatite for Spinel and Garnet Peridotite Compositions. *American Mineralogist* 59 (1–2), 110–119.

Mitchell R.H., 1986. *Kimberlites: Mineralogy, Geochemistry, and Petrology*. Plenum Press, New York, 442 p. <https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0568-0>.

Moore A.E., 2009. Type II Diamonds: Flamboyant Megacrysts. *South African Journal of Geology* 112 (1), 23–38. <https://doi.org/10.2113/gssajg.112.1.23>.

Moore A.E., 2014. The Origin of Large Irregular Gem-Quality Type II Diamonds and the Rarity of Blue Type IIb Varieties. *South African Journal of Geology* 117 (2), 219–236. <https://doi.org/10.2113/gssajg.117.2.219>.

Moore A.E., Helmstaedt H., 2019. Evidence for Two Blue (Type IIb) Diamond Populations. *Nature* 570, E26–E27. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1245-9>.

Moore A.E., Helmstaedt H., 2023. Origin of Framesite Revisited: Possible Implications for the Formation of CLIPPIR

Diamonds. *Earth-Science Reviews* 241, 104434. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104434>.

Motsamai T., Harris J.W., Stachel T., Pearson D.G., Armstrong J., 2018. Mineral Inclusions in Diamonds from Karowe Mine, Botswana: Super-Deep Sources for Super-Sized Diamonds? *Mineralogy and Petrology* 112 (Suppl 1), 169–180. <https://doi.org/10.1007/s00710-018-0604-9>.

Nimis P., Taylor W.R., 2000. Single Clinopyroxene Thermobarometry for Garnet Peridotites. Part I. Calibration and Testing of a Cr-in-Cpx Barometer and an Enstatite-in-Cpx Thermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 139, 541–554. <https://doi.org/10.1007/s004100000156>.

O'Neill H.St.C., Wall V.J., 1987. The Olivine-Orthopyroxene-Spinel Oxygen Geobarometer, the Nickel Precipitation Curve, and the Oxygen Fugacity of the Earth's Upper Mantle. *Journal of Petrology* 28 (6), 1169–1191. <https://doi.org/10.1093/PETROLOGY%2F28.6.1169>.

O'Neill H.St.C., Wood B.J., 1979. An Experimental Study of Fe-Mg Partitioning between Garnet and Olivine and Its Calibration as a Geothermometer. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 70, 59–70. <https://doi.org/10.1007/BF00371872>.

O'Reilly S.Y., Griffin W.L., 1985. A Xenoliths-Derived Geotherm for Southeastern Australia and Its Geophysical Implications. *Tectonophysics* 111 (1–2), 41–63. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(85\)90065-4](https://doi.org/10.1016/0040-1951(85)90065-4).

Peslier A.H., Woodland A.B., Bell D.R., Lazarov M., 2010. Olivine Water Contents in the Continental Lithosphere and the Longevity of Cratons. *Nature* 467, 78–81. <https://doi.org/10.1038/nature09317>.

Peslier A.H., Woodland A.B., Bell D.R., Lazarov M., Lapen T.J., 2012. Metasomatic Control of Water Contents in the Kaapvaal Cratonic Mantle. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 97, 213–246. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2012.08.028>.

Pokhilenko N.P., Sobolev N.V., Kuligin S.S., Shimizu N., 1998. Peculiarities of Distribution of Pyroxenite Paragenesis Garnets in Yakutian Kimberlites and Some Aspects of the Evolution of the Siberian Craton Lithospheric Mantle. In: *Extended Abstracts of the Seventh International Kimberlite Conference* (April 11–17, 1998, Cape Town, South Africa). Cape Town, p. 702–704. <https://doi.org/10.29173/ikc2852>.

Pollack H.N., Chapman D.S., 1977. On the Regional Variation of Heat Flow, Geotherms, and Lithospheric Thickness. *Tectonophysics* 38 (3–4), 279–296. [https://doi.org/10.1016/0040-1951\(77\)90215-3](https://doi.org/10.1016/0040-1951(77)90215-3).

Regier M.E., Pearson D.G., Stachel T., Luth R.W., Stern R.A., Harris J.W., 2020. The Lithospheric-to-Lower-Mantle Carbon Cycle Recorded in Superdeep Diamonds. *Nature* 585, 234–238. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-2676-z>.

Shatsky V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kalinina V.V., 2015. Diamondiferous Subcontinental Lithospheric Mantle of the Northeastern Siberian Craton: Evidence from Mineral Inclusions in Alluvial Diamonds. *Gondwana Research* 28 (1), 106–120. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2014.03.018>.

Shchukina E.V., Agashev A.M., Kostrovitsky S.I., Pokhilenko N.P., 2015. Metasomatic Processes in the Lithospheric Mantle beneath the V. Grib Kimberlite Pipe (Arkhangelsk

Diamondiferous Province, Russia). *Russian Geology and Geophysics* 56 (12), 1701–1716. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.11.004>.

Shchukina E.V., Agashev A.M., Soloshenko N.G., Streletskaya M.V., Zedgenizov D.A., 2019. Origin of V. Grib Pipe Eclogites (Arkhangelsk Region, NW Russia): Geochemistry, Sm-Nd and Rb-Sr Isotopes and Relation to Regional Precambrian Tectonics. *Mineralogy and Petrology* 113, 593–612. <https://doi.org/10.1007/s00710-019-00679-7>.

Smelov A.P., Timofeev V.F., 2007. The Age of the North Asian Cratonic Basement: An Overview. *Gondwana Research* 12 (3), 279–288. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2006.10.017>.

Smith E.M., Shirey S.B., Nestola F., Bullock E.S., Wang J., Richardson S.H., Wang W., 2016. Large Gem Diamonds from Metallic Liquid in Earth's Deep Mantle. *Science* 354 (6318), 1403–1405. <https://doi.org/10.1126/science.aal1303>.

Smith E.M., Shirey S.B., Wang W., 2017. The Very Deep Origin of the World's Biggest Diamonds. *Gems & Gemology* 53 (4), 388–403. <https://doi.org/10.5741/GEMS.53.4.388>.

Sobolev N.V., 1971. On Mineralogical Criteria of Diamondiferous Kimberlites. *Russian Geology and Geophysics* 12 (3), 70–80 (in Russian) [Соболев Н.В. О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика. 1971. Т. 12. № 3. С. 70–80].

Sobolev N.V., 1977. Deep-Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle. *American Geophysical Union, Washington*, 279 p. DOI:10.1029/SP011.

Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G., Pokhilenko N., Usova L., 1973. Chrome-Rich Garnets from the Kimberlites of Yakutia and Their Parageneses. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 40, 39–52. <https://doi.org/10.1007/BF00371762>.

Sobolev N.V., Sobolev A.V., Tomilenko A.A., Batanova V.G., Tolstov A.V., Logvinova A.M., Kuz'min D.V., 2015. Unique Compositional Peculiarities of Olivine Phenocrysts from the Post Flood Basalt Diamondiferous Malokuonapskaya Kimberlite Pipe, Yakutia. *Doklady Earth Sciences* 463, 828–832 <https://doi.org/10.1134/S1028334X15080164>.

Spetsius Z.V., Bogush I.N., 2018. Peculiarities of Diamonds in Eclogitic Xenoliths from the Komsomolskaya Kimberlite Pipe, Yakutia. *Doklady Earth Sciences* 480, 666–670. <https://doi.org/10.1134/S1028334X18050306>.

Spetsius Z.V., Bogush I.N., Kovalchuk O.E., 2015. FTIR Mapping of Diamond Plates of Eclogitic and Peridotitic Xenoliths from the Nyurbinskaya Pipe, Yakutia: Genetic Implications. *Russian Geology and Geophysics* 56 (1–2), 344–353. <https://doi.org/10.1016/j.rgg.2015.01.025>.

Stagno V., Ojwang D.O., McCammon C.A., Frost D.J., 2013. The Oxidation State of the Mantle and the Extraction of Carbon from Earth's Interior. *Nature* 493, 84–88. <https://doi.org/10.1038/nature11679>.

Stephens W.E., Dawson J.B., 1977. Statistical Comparison between Pyroxenes from Kimberlites and Their Associated Xenoliths. *The Journal of Geology* 85 (4), 433–449. <https://doi.org/10.1086/628317>.

Sun J., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Liu C.-Z., Skuzovatov S.Yu., Wu F.-Y., 2018. Mantle Sources of Kimberlites Through Time:

A U-Pb and Lu-Hf Isotope Study of Zircon Megacrysts from the Siberian Diamond Fields. *Chemical Geology* 479, 228–240. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2018.01.013>.

Taylor W.L., Kamperman M., Hamilton R., 1998. New Thermometer and Oxygen Fugacity Sensor Calibrations for Ilmenite- and Chromian Spinel-Bearing Peridotitic Assemblages. In: *Extended Abstracts of the Seventh International Kimberlite Conference* (April 11–17, 1998, Cape Town, South Africa). Cape Town, p. 891. <https://doi.org/10.29173/ikc2920>.

Tomilenko A.A., Kuzmin D.V., Bulbak T.A., Timina T.Yu., Sobolev N.V., 2015. Composition of Primary Fluid and Melt Inclusions in Regenerated Olivines from Hypabyssal Kimberlites of the Malokuonapskaya Pipe (Yakutia). *Doklady Earth Sciences* 465, 1168–1171. <https://doi.org/10.1134/S1028334X1511015X>.

Wudrick M., Pearson D.G., Stachel T., Armstrong J., Woodland S.J., Motsamai T., 2017. Age of the Lithospheric Mantle beneath the Karowe Diamond Mine. In: *Extended Abstracts of the 11th International Kimberlite Conference* (September 18–22, 2017, Gaborone, Botswana). IKC-4489. <https://doi.org/10.29173/ikc3859>.

Wyatt B.A., Baumgartner M., Ancka E., Grutter H., 2004. Compositional Classification of "Kimberlitic" and "Non-Kimberlitic" Ilmenite. *Lithos* 77 (1–4), 819–840. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.025>.

Zaitsev A.I., Smelov A.P., 2010. Isotope Geochronology of Rocks of the Yakutian Kimberlite Province. *Offset, Yakusk*, 108 p. (in Russian) [Зайцев А.И., Смельов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск: Офсет, 2010. 108 с.].

Zelenski M., Kamenetsky V.S., Nekrylov V., Chayka I.F., Shcherbakov V.D., Kontonikas-Charos A., Pokrovsky B.G., Korneeva A.A., 2024. Sulfide-Sulfate Metasomatism and Nickel Release in the Suprasubduction Mantle. *Earth and Planetary Science Letters* 626, 118500. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2023.118500>.

Zinchenko V.N., Ivanov A.S., 2021. Simulation of Physical-Geochemical Parameters of Crystallization of Large Type IIa Diamonds from Parasteresis of Their Satellite Minerals. *Journal of Science. Lyon* 17, 9–14.

Zinchuk N.N., Bardukhinov L.D., 2022a. Diamonds from Low-Grade Kimberlite. *Ores and Metals* 1, 77–93 (in Russian) [Зинчук Н.Н., Бадрухинов Л.Д. Алмазы из низкопродуктивных кимберлитов // Руды и металлы. 2022. № 1. С. 77–93]. <https://doi.org/10.47765/0869-5997-2022-10004>.

Zinchuk N.N., Bardukhinov L.D., 2022b. Diamonds from Semi-Industrial Kimberlites. *Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology* 2, 32–45 (in Russian) [Зинчук Н.Н., Бадрухинов Л.Д. Алмазы полупромышленных кимберлитов // Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология. 2022. № 2. С. 32–45]. <https://doi.org/10.17308/geology.2022.2/9277>.

Zinchuk N.N., Koptil V.I., 2015. About the Peculiarities of the Diamonds of the Promising Territories of the Siberian Platform. *Bulletin of Perm University. Geology* 2 (27), 41–54 (in Russian) [Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Об особенностях

алмазов перспективных территорий Сибирской платформы // Вестник Пермского университета. Геология. 2015. № 2 (27). С. 41–54]. <https://doi.org/10.17072/psu.geol.27.41>.

Zinchuk N.N., Koptil V.I., 2017. Diamonds from Modern Placers of the Siberian Platform. Article 2. Lena-Anabar Subprovince. Bulletin of Moscow Society of Naturalists. Geological Section 92 (2), 65–82 (in Russian) [Зинчук Н.Н., Коптиль В.И. Алмазы из современных россыпей Сибирской платформы. Статья 2. Лено-Анабарская суб-

провинция // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. 2017. Т. 92. № 2. С. 65–82].

Zyryanov I.V., Ivanov A.V., Yakovlev V.N., 2022. Extraction of Diamonds with Abnormal Luminescence Kinetics: Results of Experimental Studies. Russian Mining Industry 4, 88–92 (in Russian) [Зырянов И.В., Иванов А.В., Яковлев В.Н. Извлечение алмазов с аномальной кинетикой люминесценции: результаты экспериментальных исследований // Горная промышленность. 2022. № 4. С. 88–92]. <https://doi.org/10.30686/1609-9192-2022-4-88-92>.