

УДК 549:550.81:553.81.044(571.56)
DOI: 10.52349/0869-7892_2024_99_44-67

В. Н. Зинченко (ГРО «Катока»), А. С. Иванов (СПГУ),
И. В. Ащепков (ИГМ СО РАН, ГИН СО РАН)

МИНЕРАЛЫ-СПУТНИКИ АЛМАЗОВ ТРУБКИ ЗАРНИЦА: МЕТОД ПРОГНОЗИРОВАНИЯ CLIPPIR АЛМАЗОВ В СЛАБОАЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТАХ

В статье рассмотрена геохимия минералов-спутников алмаза слабоалмазоносных трубок Карове (Ботсвана) и Зарница (Россия) – месторождений, содержащих гигантские CLIPPIR алмазы высокого качества и дорогостоящие. Представлен прогнозный метод геохимической аналогии составов минералов-спутников алмаза таких трубок, реализованный на основе вероятностной геостатистики (кластерный анализ). Методы 5E диаграмм для четырех минералов-спутников алмаза – пиропов, пикроильменитов, хромитов и хромдиопсидов, и 4E диаграмм для пиропов могут быть использованы для прогнозирования крупных и гигантских «самородных» алмазов в слабоалмазоносных кимберлитах на этапах поиска и разведки месторождений алмазов в перспективных регионах России и мира.

Ключевые слова: алмаз, кимберлитовая трубка, кимберлит, минералы-спутники, химический состав, мантия, литосфера, PT, fO_2

V. N. Zinchenko (Catoca), A. S. Ivanov (SPMU),
I. V. Ashchepkov (IGM SB RAS, GIN SB RAS)

DIAMOND-ASSOCIATED MINERALS OF THE ZARNITSA PIPE: A METHOD FOR PREDICTING CLIPPIR DIAMONDS IN WEAKLY DIAMONDIFEROUS KIMBERLITES

The article considers the geochemistry of diamond-associated minerals of the Karowe (Botswana) and Zarnitsa (Russia) weakly diamondiferous pipes – deposits containing high-quality and costly giant CLIPPIR diamonds. There is applied a predictive method for geochemical analogy to the diamond-associated minerals compositions of such pipes, according to a probabilistic geostatistics-based approach (cluster analysis). The methods of 5E diagrams for four diamond-associated minerals – pyropes, picroilmenites, chromites and chrome diopsides, and 4E diagrams for pyropes can predict large and giant “native” diamonds in weakly diamondiferous kimberlites at the stages of prospecting and exploring diamond deposits in promising regions of Russia and the world.

Keywords: diamond, kimberlite pipe, kimberlite, associated minerals, chemical composition, mantle, lithosphere, PT, fO_2

Для цитирования: Зинченко В. Н., Иванов А. С., Ащепков И. В. Минералы-спутники алмазов трубки Зарница: метод прогнозирования CLIPPIR алмазов в слабоалмазоносных кимберлитах // Региональная геология и металлогения. – 2024. – № 99. – С. 44–67. DOI: 10.52349/0869-7892_2024_99_44-67

Введение. Зарница – первая алмазоносная кимберлитовая трубка, открытая в Якутии геологом партии № 26 Центральной экспедиции Л. А. Попугаевой в 1954 г. по характерным для кимберлитов индикаторным минералам (ИМК) – пиропам и пикроильменитам [9; 11; 17]. С ее открытием связано начало истории изучения минералогии и геохимии минералов кимберлита в России, интересные факты которой опубликовали Г. Ф. Анастасенко и В. Л. Масайтис в 2005 г. [1]. Им удалось разыскать музейные образцы кимберлитов в Минералогическом музее СПбГУ, которые использовал в своих исследованиях проф. А. А. Кухаренко – учитель Н. Н. Сарсадских и Л. А. Попугаевой,

создатель метода «пироповой съемки», блистательно реализованного его ученицами при поисках алмазоносных кимберлитов в Далдынском районе Якутской кимберлитовой провинции (рис. 1). Проф. А. А. Кухаренко, изучая пиропы и пикроильмениты из образцов кимберлитов первой южноафриканской трубки Ягерфонстейн (открыта в 1870 г.), хранящихся в коллекции музея с 1912 г., и сравнивая их с минералами шлихов, отобранных Попугаевой и Сарсадских в полевой сезон 1953 г. в бассейне р. Далдын, убедился в их идентичности. Он подтвердил, что минералы этих шлихов характерны для кимберлита и являются спутниками алмаза (MCA) [1].

В этой истории важно, что проф. А. А. Кухаренко руководствовался принципом геологической аналогии и методом минералогического сравнения прогнозируемой кимберлитовой трубки (Зарница) и уже открытой «эталонной» трубки (Ягерфонштейн), минеральный состав которой был уже известен. В данном случае он развивал аналогичный методический подход, реализованный ранее акад. В. С. Соболевым при межрегиональном прогнозе алмазоносности территории Восточной Сибири, сравнивавшим ее структурно-геологические особенности с регионом Юга Африки [13; 16].

Эта историческая параллель представляет собой важную, поскольку в настоящем исследовании развивается этот методический подход на более глубоком геохимическом уровне на основе сравнения составов МСА кимберлитовых трубок с целью прогнозирования в них CLIPPIR алмазов. Таким образом, история изучения трубки Зарница продолжается на более высоком аналитическом уровне на основе классического принципа *геологической аналогии* (в данном случае – *геохимической аналогии*).

Был разработан метод статистико-геохимической аналогии составов МСА [7; 8], который демон-

стрируется на диаграмме 5E (5 Elements) Митчелла [48] – $Fe/(Fe+Mg)-Cr/(Cr+Al-(Ti))$ (рис. 2).

В данной публикации представлен новый метод 4E диаграмм для пиропов из кимберлитов, позволяющий оценить сходимость составов этого минерала «эталонной» и прогнозируемой трубки. Разработка его связана с тем, что пиропы традиционно являются приоритетным объектом геохимических исследований при поисках кимберлитов, и БД их составов обычно формируется в первую очередь.

Определенные группы МСА являются индикаторами условий (обстановок), благоприятных для кристаллизации CLIPPIR алмазов [50–52], с которыми они парагенетически связаны в области глубинной алмазогенерации. Использована комбинация R- и G-методов кластерного анализа баз геохимических данных микрозондового RX-спектрального анализа (EPMA) МСА [7; 8] из эталонной трубки Карове (более 6000 анализов) и сравниваемых с ней МСА трубки Зарница (более 1900 анализов). Исследованы РТ и fO_2 условия литосферной мантии и процессы, благоприятные для кристаллизации гигантских алмазов W-генерации, и представлены их структурно-геохимические модели [18; 30].



Рис. 1. Схема расположения кимберлитовых трубок в северной части Далдынского района, включая кимберлиты группы Зарница. Пунктирная линия «трубка Украинская – трубка Иксовая» отвечает положению мантийного литосферного профиля SCLM [18]

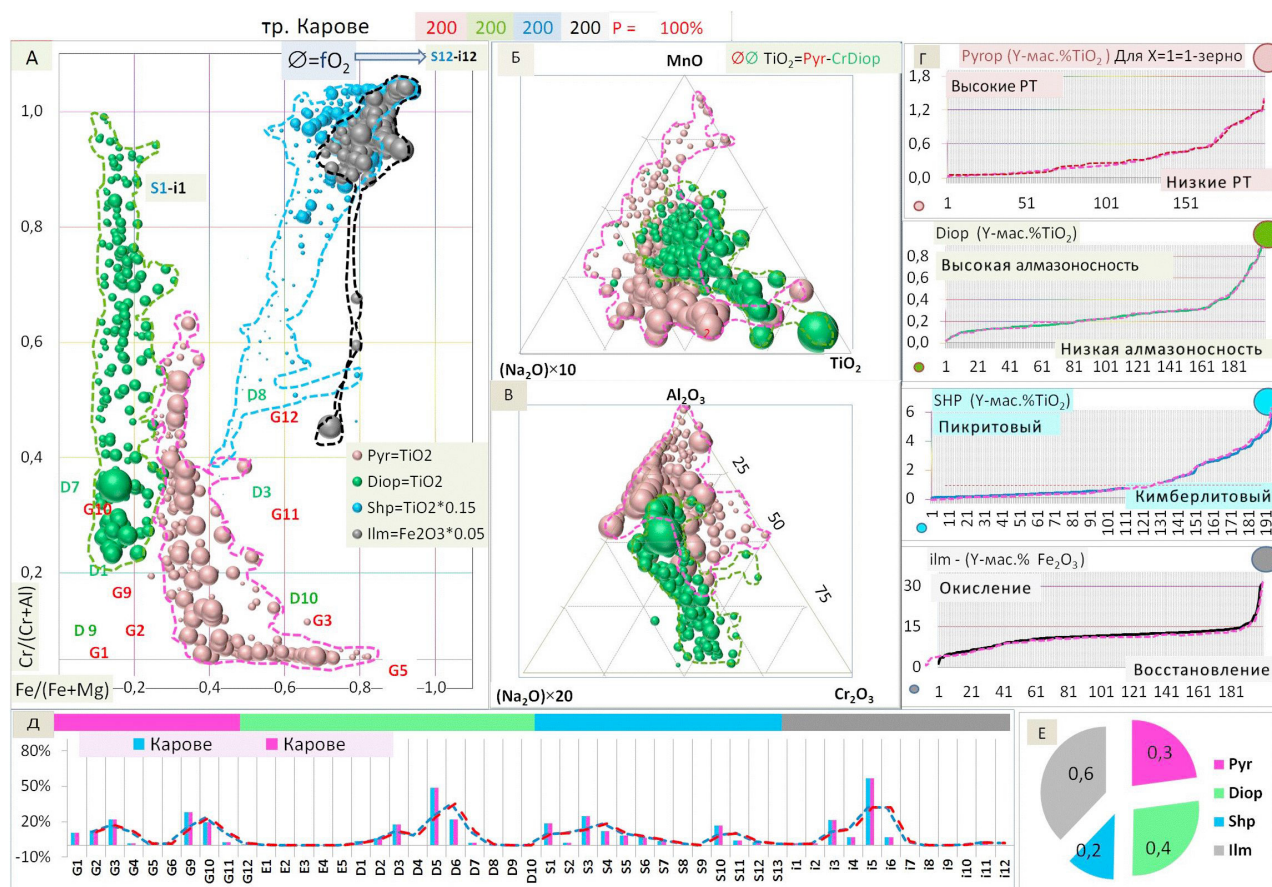


Рис. 2. Результаты изучения составов МСА трубки Карове

5Е диаграмма Fe/(Fe+Mg)–Cr/(Cr+Al)–(Ti) для КГ МСА трубки Карове (А), треугольные диаграммы составов пиропов и диопсидов (Б и В) и гистограммы частот их встречаемости (Д); диаметры «пузырьков» пропорциональны содержанию (%) TiO₂ в пиропсах, диопсидах, и Cr-шпинелидах (0,15 × TiO₂), и Fe₂O₃ в ильменитах (0,05 × Fe₂O₃) (А); TiO₂ в пиропсах и диопсидах (Б и В); пунктирные линии на диаграммах А, Б и В – поля составов МСА (розовая – пиропов, зеленая – пироксенов, черная – ильменитов, голубая – хромитов; таблица в верхней части диаграмм – количество проанализированных зерен МСА (200) и вероятность групповой сходимости их составов с составами МСА трубки Карове (100% по критерию Пирсона); кумулятивные графики составов зерен МСА и физико-химических параметров их кристаллизации (по X – составы, по Y – количество зерен МСА, розовый пунктир – МСА трубки Карове, цветные линии – МСА сравниваемой трубки) (Г); гистограммы кластерных групп (КГ) пиропов (G1–G12 [36], энстатитов (E1–E5 – [69]), диопсидов (D1–D10), хромшпинелей (S1–S13 – [4]), ильменитов (i1–i12 – [4]); розовая пунктирная линия на частотных графиках КГ составов МСА – трубка Карове, голубая линия – сравниваемая трубка (Д); на круговой диаграмме (Е) цифры в секторах – средние содержания TiO₂ в пиропсах, диопсидах и хромитах и Fe₂O₃ в ильменитах сравниваемой трубки

Появление крупных алмазов в геологических пробах кимберлита порождает «эффект самородка» (по Матерону) [10], который остается непреодолимой проблемой в рамках методов вероятностной геостатистики. В геологоразведке на алмазы ураганные содержания их в рудах не учитываются при расчетах запасов на базе среднеблочных содержаний, поскольку редкость крупных кристаллов алмаза нарушает выявляемое статистически распределение их по классам массы (размера), которое позволяет рассчитать их среднее содержание в кимберлитовых рудах (кар/т). Между тем, крупные и высококачественные кристаллы имеют уникальную эстетику и высокую стоимость, что делает их предметом высокодоходных инвестиций (рис. 3).

Традиционные методы геологического опробования не позволяют выявить гигантские алмазы в процессе поисков и разведки, и поэтому многие бедные кимберлитовые трубки, которые могут

содержать очень редкие и ценные крупные алмазы, не разрабатываются. В кимберлитах трубок Карове (АК6, Ботсвана) и Летсенг (Лесото) содержание алмазов по итогам ГРП было оценено в 0,15 кар/т и 0,017 кар/т [33] соответственно, и их забраковали, посчитав отработку нерентабельной. С 2012 г. на трубке Карове регулярно добываются CLIPPIR алмазы высокого качества и стоимости (рис. 3, б, в) – более 5400 камней весом выше 10,8 кар, 52 алмаза – 100–199 кар, 17 камней – 200–299 кар, 6 алмазов крупнее 300 кар и 3 камня крупнее 1000 кар. Последний гигантский алмаз весом в 2492 кар был добыт в августе 2024 г. и занял вторую позицию по крупности после Куллинана (рис. 3, а, б). 214 алмазов из этой трубки были проданы по стоимости более 1 млн долл. каждый [53].

Сегодня нет ни одной надежной методики, позволяющей прогнозировать в кимберлитах уникальные CLIPPIR алмазы, и создание метода оценки

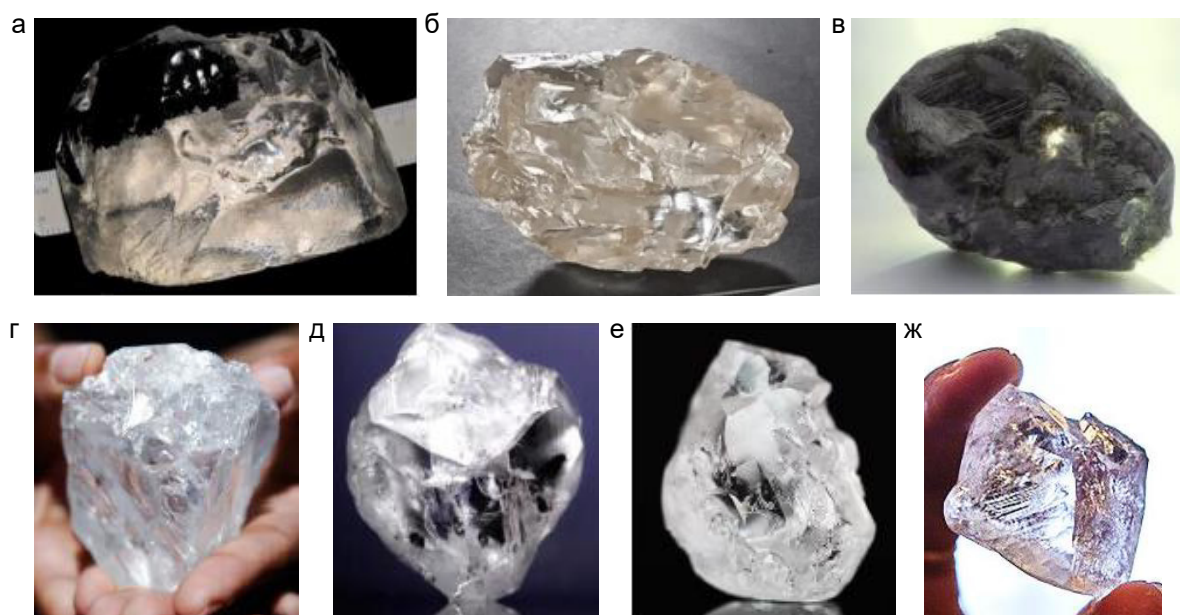


Рис. 3. Гигантские CLIPPIR алмазы

а – самый крупный алмазный самородок Cullinan (Куллинан) из трубки Премьер, масса 3106, 75 кар; б – второй по крупности алмаз весом 2492 кар, трубка Карове, август 2024 г. (цена 40 млн долл.); в – Swelo (Свело), 1758 кар, трубка Карове, Ботсвана (цена неизвестна); г – Lesedi la Rona (Свет наш), 1109 кар, 53 млн долл., трубка Летсенг, Лесото; д – Lesotho Legend (Легенда Лесото), 910 кар, 40 млн долл.; е – Letšeng Icon (Икона Летсенга), 439 кар, 16,1 млн долл., трубка Летсенг [33]; ж – самый крупный из добытых на трубке Зарница алмаз весом 207,29 кар [<https://jewellerymag.ru/p/alrosa-207ct-diamond/>]

вероятности обнаружения таких алмазов в слабоалмазоносных кимберлитах весьма актуально.

Авторами при разработке такого метода сделан акцент на определение типоморфных признаков МСА из «эталонных» кимберлитов, содержащих гигантские CLIPPIR алмазы, и сравнение их с МСА объектов поисковых работ, в которых количественно оценивается вероятность обнаружения подобных алмазов.

Материал исследования. Трубки Карове и Зарница слабоалмазоносны (0,15–0,35 кар/т), но содержат редкие крупные и гигантские особо чистые алмазы, похожие внешне на знаменитый Куллинан, которые получили название CLIPPIR [50–52] (рис. 3, б, в, ж). По содержанию азота они принадлежат к типу IIa («безазотные» – концентрация N до 20 ppm) и отличаются низким содержанием В-центров. База геохимических данных о составах МСА трубки Карове насчитывает более 10 000 анализов, а трубки Зарница – более 1900 анализов – 1240 гранатов, 340 Cr-диопсидов, 128 клинопироксенов с низким содержанием Cr, 175 ильменитов и 40 хромитов. Зерна МСА трубки Зарница были отобраны из тяжелых минеральных концентратов геологоразведочных проб ее кимберлитов и из мантийных ксенолитов (коллекция И. В. Ащепкова), вариации их состава отражены на диаграммах (рис. 4–6) [18; 30]. БД составов МСА трубки Карове получена по обмену информацией с фирмой Дебсвана (Debswana).

Методы исследования. Образцы зерен МСА проанализированы в аналитическом центре ИГМ СО РАН

и НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО) (аналитики И. В. Ащепков и А. С. Иванов). Электронный микрозондовый анализ (EPMA) МСА (гранаты, Cr-диопсиды, ильмениты и хромиты) проводился с использованием Camebax Micro и Jeol JXA8320 по общей процедуре [44]. Микрозонд Jeol JXA8320 укомплектован рентгеноспектральным микроанализатором с шестью регистрационными каналами – пять волновых дисперсионных спектрометров (ВДС), шестой – параллельный энергодисперсионный спектрометр (ЭДС) системы «EX-943100FL1Q, RESO 129eV». Ускоряющее напряжение составляло 20 кВ, использован сфокусированный ток пучка 100 нА и время подсчета 60 сек. Относительное стандартное отклонение не превышало 1,5%; точность 3–5% была близка к ошибке 2σ. Для количественного определения элементов-примесей в минералах применялся метод одновременной регистрации рентгеновского излучения ЭДС и ВДС. Микроанализатор JX-8230 укомплектован программным продуктом, который позволяет проводить определение элементного состава минералов одновременно этими двумя типами спектрометров. Такой конструктивный подход дает возможность уменьшить время накопления рентгеновских импульсов и на порядок повысить ток пучка (до 300 нА и более), что увеличивает соотношения полезного сигнала к фону в несколько раз. Это позволяет с большей чувствительностью определять элементы-примеси в минералах при минимальных затратах времени. Предел обнаружения элементов примесей в МСА можно довести до 15 ppm при относительной ошибке менее 5%. Использование данной техники анализа позволяет регистрировать одновременно весь

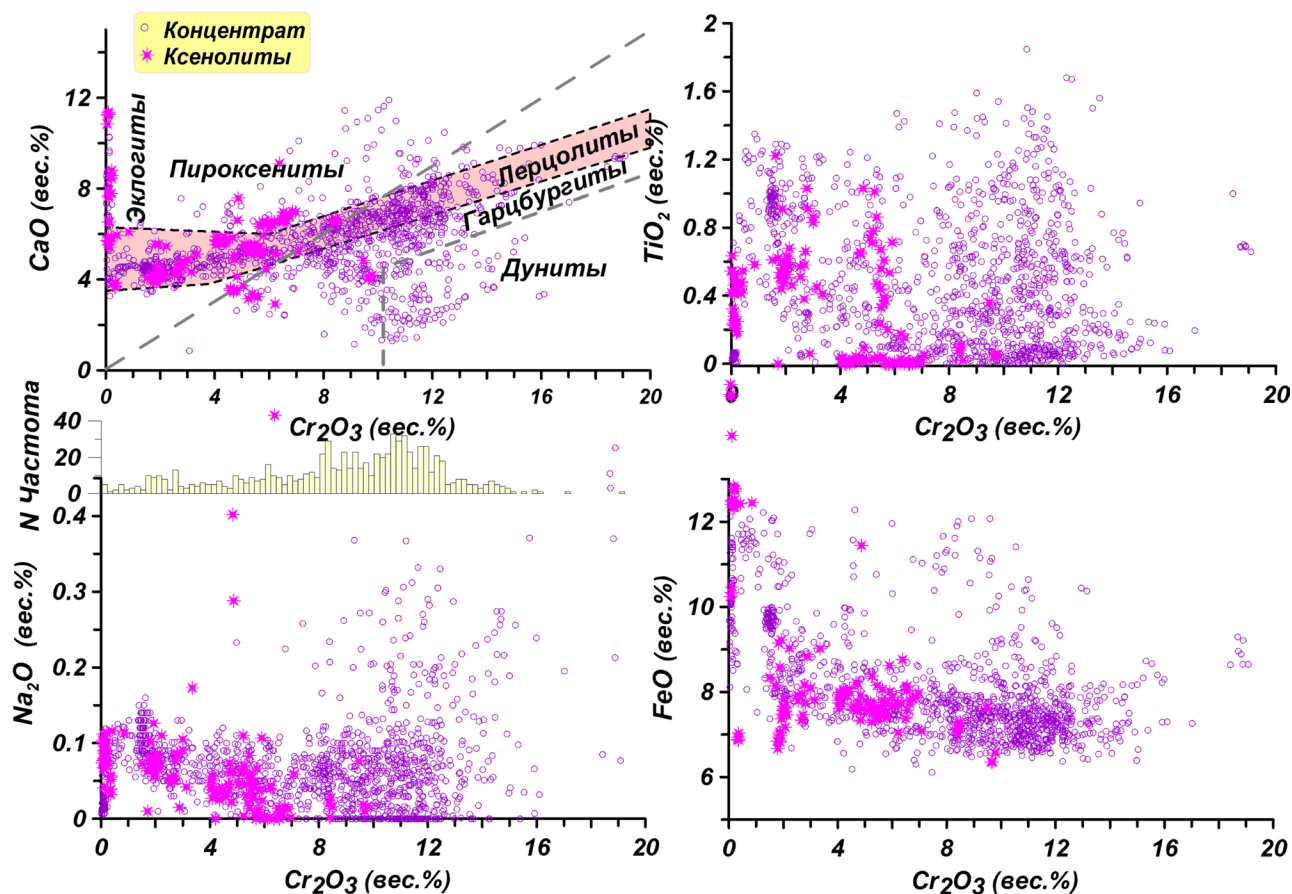


Рис. 4. Составы Cr-гранатов из трубки Зарница (ксенолиты и концентрат) на диаграммах Cr_2O_3 – CaO , (TiO_2 , Na_2O , FeO)

На диаграмме Н. В. Соболева [65] обозначены поля составов мантийных парагенезисов – пироксенитов (верлитов), лерцолитов, гарцбургитов, дунитов и эклогитов; гистограмма – распределение зерен пиропов по хромистости (содержанию Cr_2O_3) [29]

спектр главных химических элементов в минерале ЭДС и пятью ВДС – примесные элементы Mn, Ni, Ti, Al, Na. Измерения примесных элементов выполнены при ускоряющем напряжении 20 кВ, токе пучка 100 нА и времени накопления импульсов 60 сек на пике и по 30 сек – замеры на фоне.

Методы 4Е и 5Е диаграмм базируются на методах вероятностной статистики (сочетание R- и G-методов кластерного анализа). Они позволяют определять области характерных составов МСА эталонной трубки с CLIPPIR алмазами и сравнивать их на вероятностной основе с МСА оцениваемой трубки. При этом полагается, что благоприятные физико-химические параметры среды кристаллизации CLIPPIR алмазов «трубки-эталона» должны быть аналогичны оцениваемому кимберлиту, и эта аналогия оценивается количественно по вероятности сходимости составов их МСА (по критерию Пирсона и по расстояниям Эвклида) [7; 8; 73; 74].

Метод «5Е» минерально-геохимической аналогии составов МСА, парагенетически связанных с CLIPPIR алмазами, реализован на диаграмме Митчелла $\text{Fe}/5(\text{Fe}+\text{Mg})$ – $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ – $(\text{Mn}, \text{Na}, \text{Ti})$ [49] и основан на химико-петрогенетических классификациях – кластерных группах (КГ) МСА Дж. Доусона и У. Стефенса [36; 69] для гранатов и пироксенов, а также химико-генетических группах (ХГГ)

В. К. Гаранина [4] для ильменитов и хромитов (рис. 2, 8, 9).

К 5Е диаграмме добавлены две треугольные диаграммы для составов пиропов и пироксенов – Na_2O – TiO_2 – MnO и Na_2O – Cr_2O_3 – Al_2O_3 . На них обозначены характерные контуры составов пиропов и диопсидов из кимберлитов трубки Карове, что позволяет контролировать попадание составов этих минералов оцениваемой трубки в их пределы. На всех диаграммах размер фигуративных точек анализов изменяется в зависимости от содержания дополнительного, пятого химического элемента. Для составов пиропов и диопсидов этот размер соответствует содержанию TiO_2 (вес. %) в проанализированных зернах. Для видимой сходимости размера фигуративных точек анализов хромшпинелей с пиропами содержание TiO_2 в них показано с коэффициентом 0,15. В ильменитах диаметр аналитической точки соответствует содержанию Fe_2O_3 , которое дано с уменьшающим коэффициентом 0,05. В легенде 5Е диаграммы показаны все перечисленные преобразования (на серой вклейке справа внизу) (рис. 2).

Линейные диаграммы построены с применением сортировки анализов каждой минеральной группы МСА по росту содержаний (от минимального к максимальному) дополнительного пятого элемента

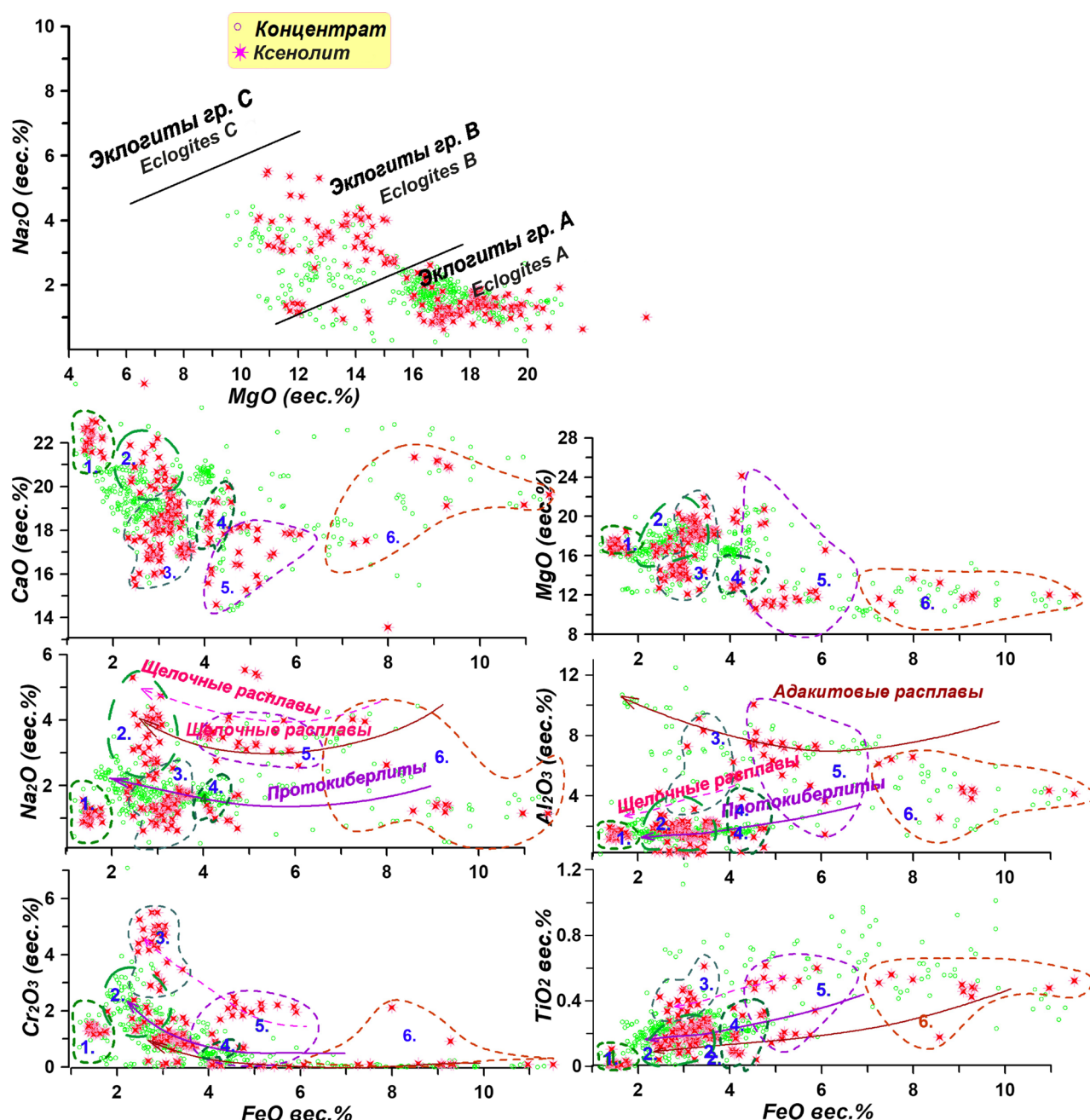


Рис. 5. Составы пироксенов из ксенолитов и концентрата кимберлитов трубки Зарница на диаграммах окислов главных (MgO , CaO , Na_2O , FeO , Al_2O_3) и примесных элементов (TiO_2 , Cr_2O_3)

Стрелками обозначены тренды взаимодействия с различными расплавами; поля 1–6 – парагенетические группы составов пироксенов [18]

(окисла, вес. %), отраженного в размерах «пузырьков» – фигуративных точек анализов (рис. 2, B). На них по оси «Y» даны содержания (вес.%) окислов (TiO_2 и Fe_2O_3). Длина оси «X» соответствует 100% количества проанализированных зерен MCA и одна линия соответствует одному зерну. На линейной диаграмме ильменитов (Ilm) участок графика $<15\% \text{Fe}_2\text{O}_3$ относится к восстановительным условиям, благоприятным для сохранности алмазов (по Д. Герни), а выше этой линии – к окислительной обстановке, неблагоприятной для сохранности алмазов [5]. На линейной диаграмме пиропов (Py) участок линии $\text{TiO}_2 > 0,6\%$ отвечает высо-

ким давлениям и температурам, а $<0,6\%$ – меньшим давлениям и глубинам их кристаллизации. На линейной диаграмме хромшпинелей (Shp) участок линии $\text{TiO}_2 < 1,0\%$ отвечает зернам из кимберлитов, а $>1,0\%$ – из пикритов и меймечитов. На линейной диаграмме хромдиопсидов (Dio) участок линии $\text{TiO}_2 < 0,2\%$ характеризует слабоалмазоносные, а $>0,2\%$ – алмазоносные кимберлиты.

На круговых диаграммах (рис. 2, E) показаны секторами соотношения средних содержаний в пробах пиропов, диопсидов и хромшпинелей окиси титана TiO_2 , а в пробах ильменитов – закисного железа Fe_2O_3 . Это позволяет количественно по линейным

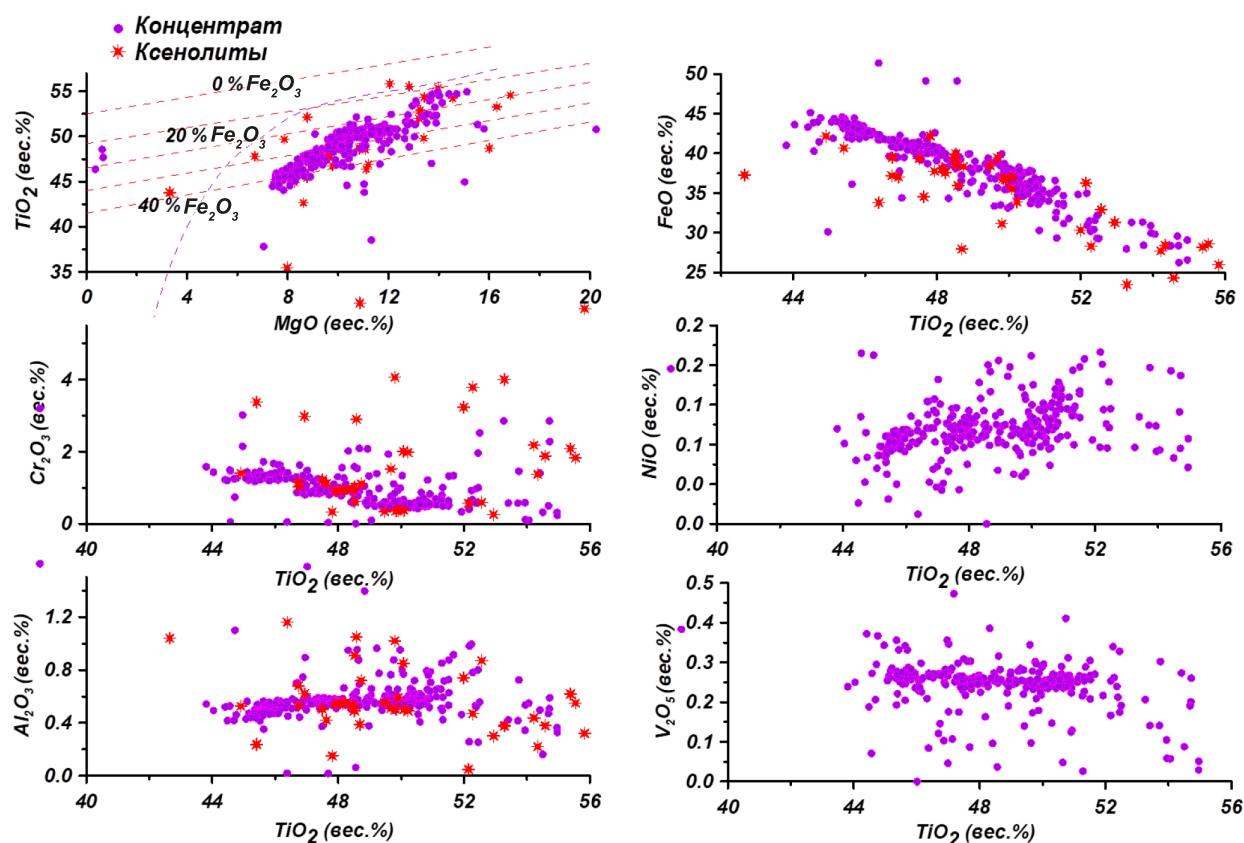


Рис. 6. Составы ильменитов из концентрата кимберлитов и мантийных ксенолитов трубки Зарница
Разделение на кимберлитовые и не кимберлитовые типы ильменита (бордовая штриховая линия) – согласно [72]

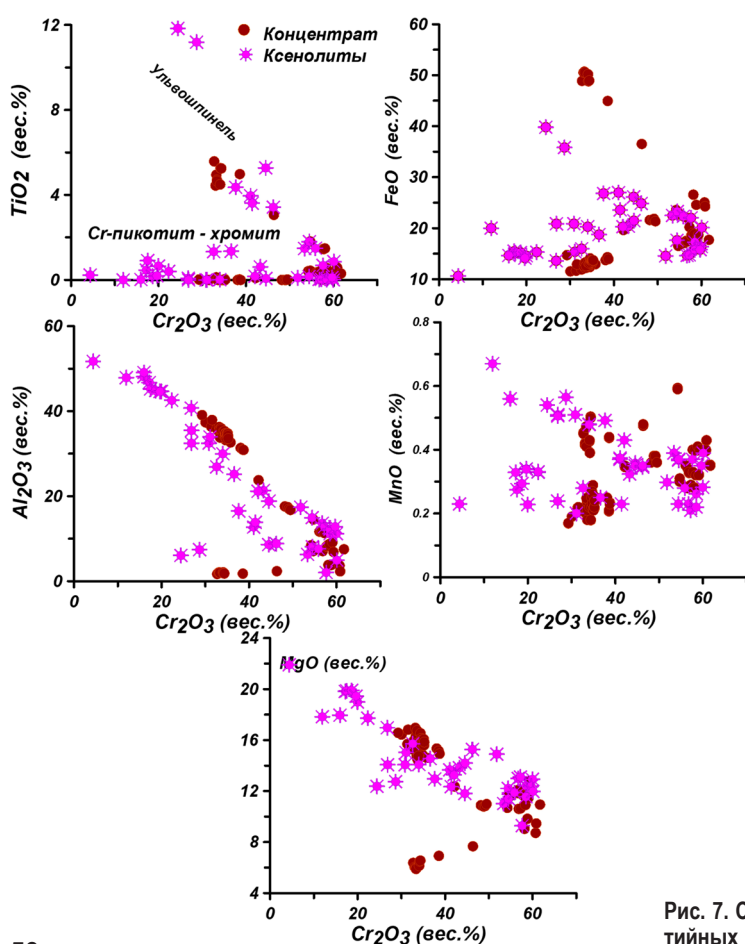


Рис. 7. Составы хромитов из концентрата кимберлитов и мантийных ксенолитов трубки Зарница

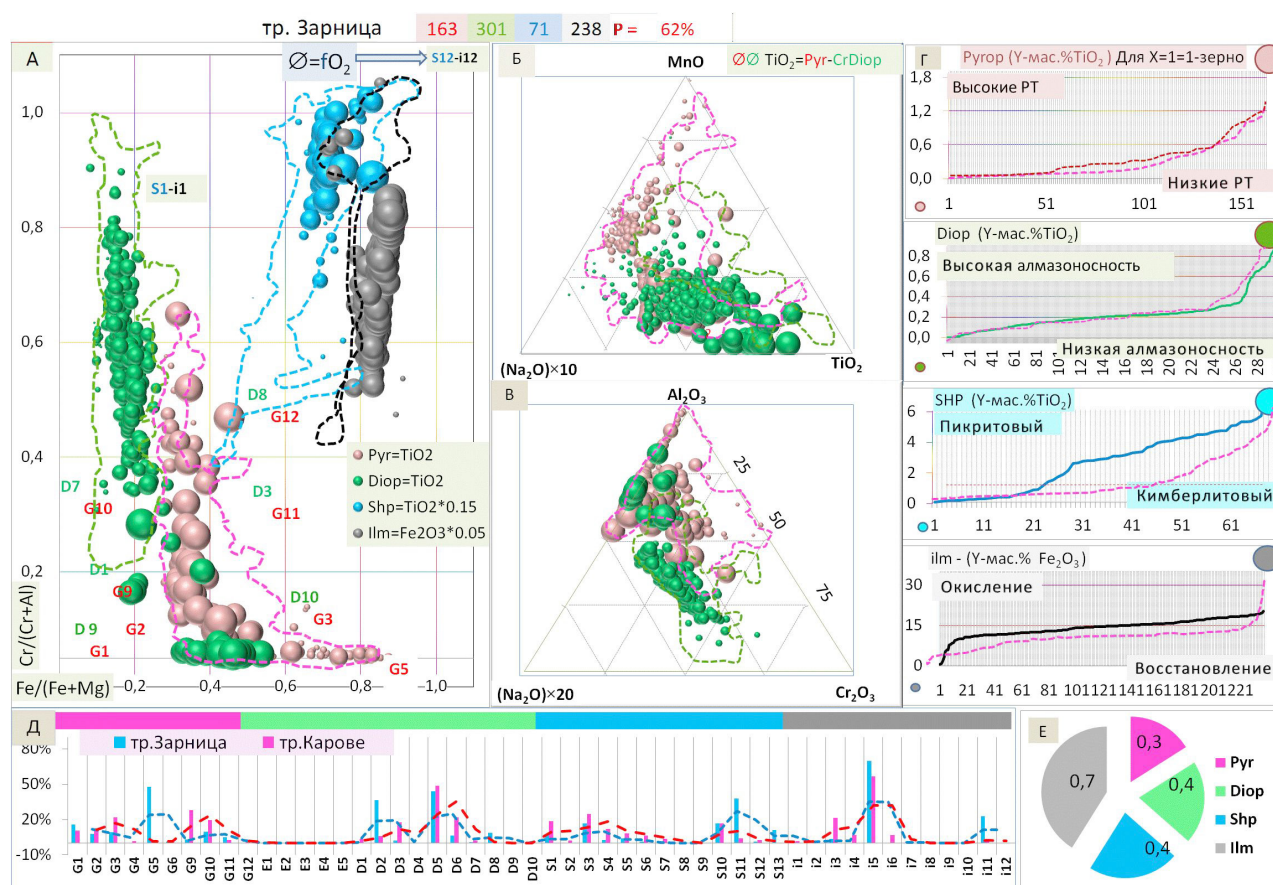


Рис. 8. Результаты изучения составов МСА трубки Зарница

5Е диаграмма $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ – $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ – (Ti) для КГ МСА трубки Зарница (А), треугольные диаграммы составов пиропов и диопсидов (Б и В), линейные диаграммы содержаний TiO_2 и Fe_2O_3 в МСА (Г), гистограммы частот встречаемости их КГ (Д) и круговая диаграмма средних содержаний TiO_2 и Fe_2O_3 (Е). Условные обозначения – на рис. 2

распределениям сравнить несколько выше или ниже эти параметры отличаются от составов МСА «эталонной» трубки Карове (рис. 2, Г, Е).

Метод «4Е» диаграмм заключается в сравнении составов КГ пиропов «трубки-эталона», содержащей CLIPPIR алмазы, и прогнозируемой трубки на треугольной диаграмме Na_2O – MnO – TiO_2 , где содержание четвертого окисла (CaO для правой и MgO для левой диаграммы) отражается диаметром аналитической точки («пузырька») (рис. 10, а) [8]. На второй диаграмме (рис. 10, б) показаны тренды изменения среднекластерных составов КГ пиропов «трубки-эталона» и прогнозируемой трубки, демонстрирующие степень их совпадения/различия. Здесь, ниже диаграмм приведены гистограммы (%) среднекластерных содержаний Na_2O в пиропках прогнозируемой трубки (рис. 10, д) и частот встречаемости КГ пиропов сравниваемых трубок (рис. 10, е). Справа от диаграмм – P1 – вероятность совпадения по среднекластерным значениям окислов трех указанных элементов-примесей в пиропках (по расстояниям Эвклида), а P2 – вероятность совпадения их по частотам встречаемости кластерных групп составов пиропов (по критерию Пирсона).

Гистограммы сопровождаются аппроксимирующими полиномиальными линиями. Для процент-

ного выражения вероятности P1 нами предложена сумма расстояний Эвклида. При вычислении вероятности P1 расстояния Эвклида (P_3) всех координат кластеров вычислены по алгоритму $R_3 = \sqrt{((x_1 - x_2)^2 + (y_1 - y_2)^2 + \dots)}$. После суммирования всех расстояний вероятность преобразуется в проценты $P1 = [(1000 - \sum R_3)/1000]\%$. Вероятность совпадения P2 определяется коэффициентом Пирсона, также преобразованного в проценты.

Термобарометрические методы и PTxfO_2 диаграммы. Для кимберлитов характерен широкий набор КГ составов МСА, происхождение которых связано с разными глубинами литосферной мантии, т. е. с разными глубинными источниками (породами), отличающимися физико-химическими параметрами среды их формирования. Как было показано выше, интерпретация данных о составах МСА кимберлитов методами математической статистики позволят рассчитать физико-химические параметры (PT, f_{O_2}) и показать вещественно-структурную расслоенность мантии как среды генерации алмазов [2; 26]. Основным методом такой интерпретации и построения PTfO_2 разрезов и транслитосферных профилей мантии (SCLM) является **термобарометрия** мантийных пород, мономинеральные версии которой последние годы активно разрабатываются И. В. Ащепковым [20; 24; 25; 28].

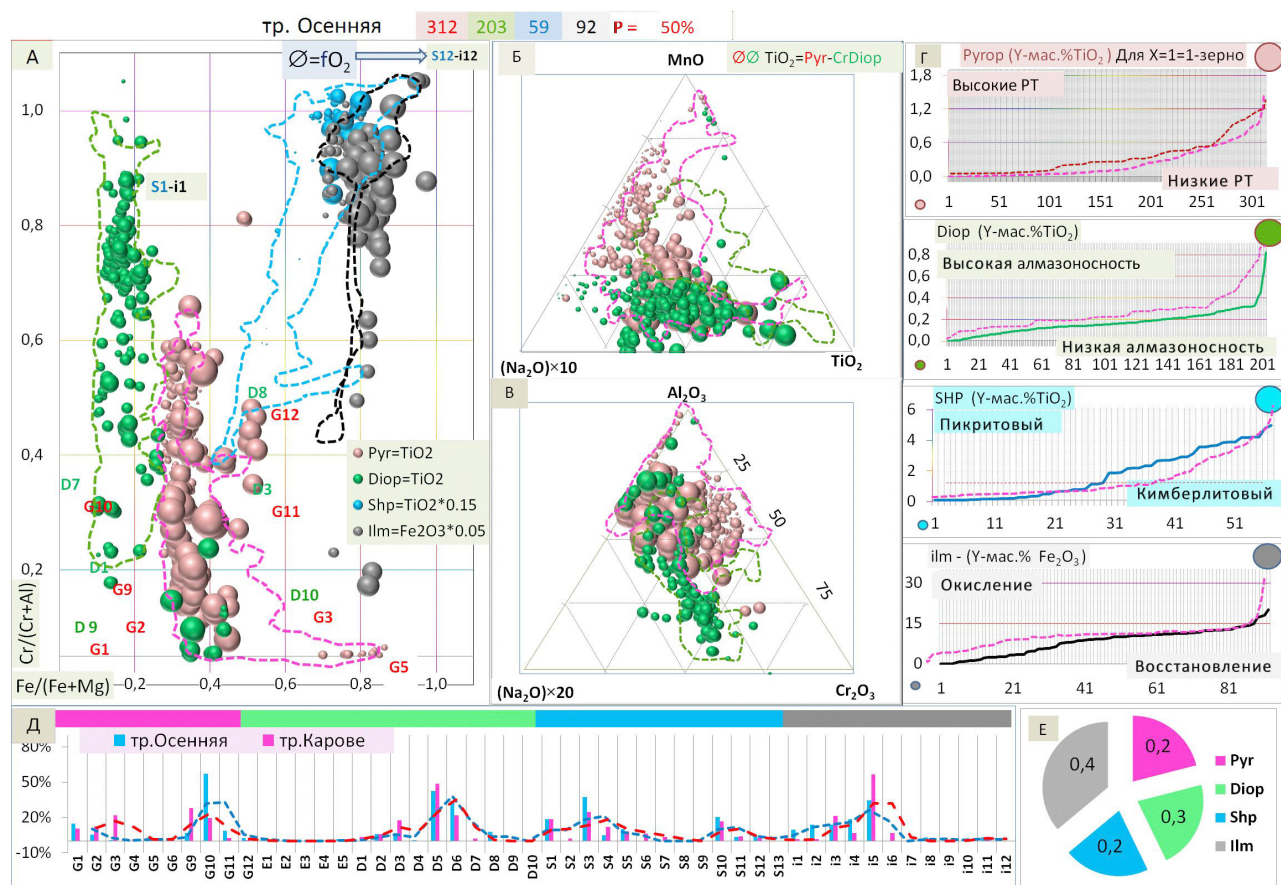


Рис. 9. Результаты изучения составов МСА трубки Осенняя

5Е диаграмма $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})-\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})-(\text{Ti})$ для КГ МСА трубки Осенняя (А), треугольные диаграммы составов пиропов и диопсидов (Б и В), линейные диаграммы содержаний TiO_2 и Fe_2O_3 в МСА (Г), гистограммы частот их встречаемости (Д) и круговая диаграмма средних содержаний TiO_2 и Fe_2O_3 (Е). Условные обозначения – на рис. 2

Методы мономинеральной термобарометрии основаны на внутреннем обмене компонентов минералов и зависимости размеров их элементарной кристаллической ячейки от давления (Р) и температуры (Т) [54; 62; 70]. Для калибровки термометров и барометров используются минеральные равновесия изоморфного обмена и КД внутренних обменных реакций (коэффициент распределения элементов между минералом и расплавом). Совместное решение уравнений итерационными методами позволяет находить оценки давлений и температур, которые весьма близки к полученным полиминеральными методами, а также к экспериментальным данным. Для оценки алмазонасного потенциала кимберлитов важно знать долю алмазных ассоциаций среди включений в алмазы (DIA) [23], которые были сформированы в РТ области «алмазного окна» [40; 42], а также оценить численно соотношения перидотитовых, эклогитовых и вебстеритовых DIA и парагенезисов МСА. Алмазонасность кимберлитов также зависит от окислительных условий, которые характеризуются обычно относительно буфера QMF – кварц (Qu) – магнетит (Mt) – фаялит (Fa) [31; 70]. Необходимым условием алмазонасности является попадание проб МСА в область выше буфера EMOG/D – Ens–Mt–Ol–Gar/Di (буфер алмаза) [67; 68] (рис. 11).

Значения Р, Т и $f\text{O}_2$ рассчитывались мономинеральным методом с использованием барометров для граната и клинопироксена [24], хромита [28] и ильменита [25]. Параметр $\text{Fe}^{\#}_{\text{Ol}}$ оливинов ($\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+})/\text{Mg}$ рассчитывался с использованием регрессий зависимости его от Т. Для расчета фугтивности кислорода $f\text{O}_2$ (единицы $\Delta\log f\text{O}_2$ относительно QMF буфера) использованы модифицированные мономинеральные методы по перидотитовым гранатам [39], а для эклогитов – мономинеральная версия кислородных барометров [20]. Мономинеральная версия расчета $\#Fe$ для клино- и ортопироксена из мантийных ксенолитов также основана на регрессионных зависимостях. Оценки $f\text{O}_2$ для пироксенов основаны на вариации стехиометрии Fe^{3+} в них и коррелируется с оценками $f\text{O}_2$ по гранатам [25]. Для оценок $f\text{O}_2$ по хромитам и ильменитам использованы уравнения из работы [70], где $\#Fe$ также вычисляется по регрессионным зависимостям (полиномиальным формулам) [25]. Для численной оценки используются диаграммы Р– $f\text{O}_2$, построенные для каждого из минералов.

Перечисленные физико-химические характеристики литосферной мантии демонстрируются ниже на примере алмазонасных кимберлитовых трубок – Карове, Зарницы и Осенней (рис. 13–15). Их расчеты производились с использованием

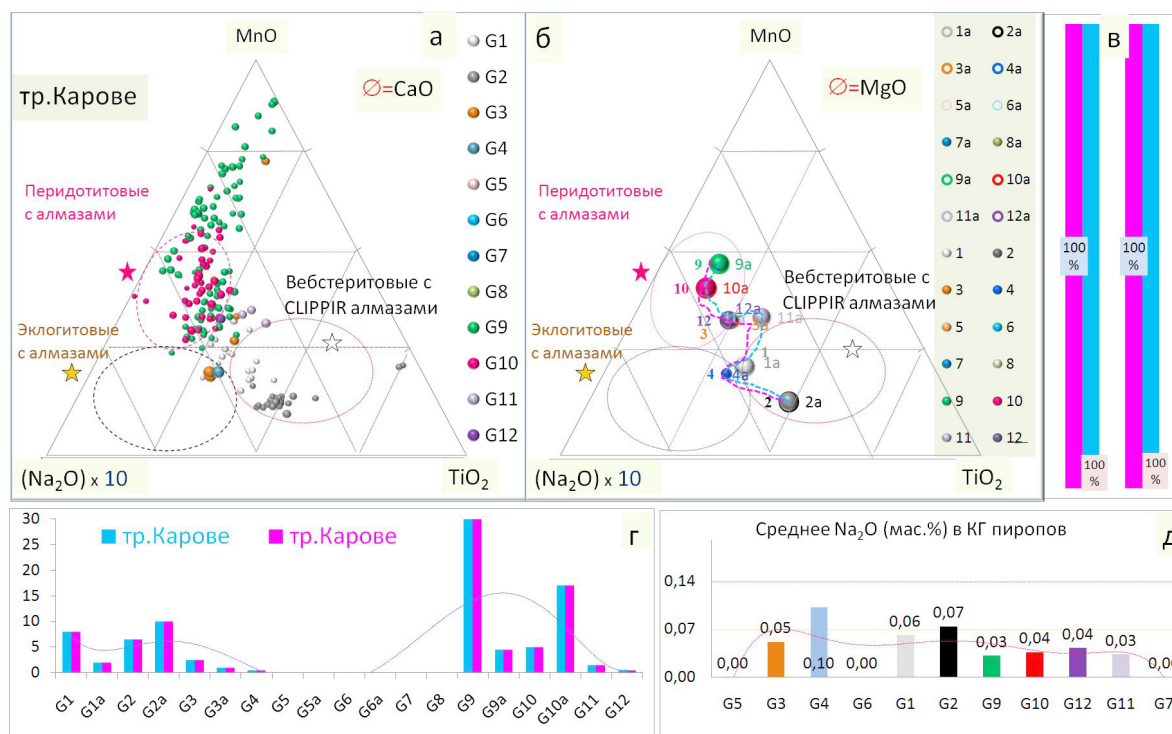


Рис. 10. Комплекс пузырьковых треугольных 4Е диаграмм $\text{Na}_2\text{O}-\text{MnO}-\text{TiO}_2$ (CaO) и гистограмм для составов пиропов трубки Карове

а – G1–G12 – КГ пиропов Дуусона [35]; диаметр аналитической точки («пузырька») пропорционален содержанию CaO; овальные области, ограниченные штриховыми линиями – алмазные парагенезисы пиропов с алмазами «Р», «Е» и «W» типов; б – трендовые линии среднекластерных составов пиропов с номерами КГ Дуусона (1–12); в – левая гистограмма – вероятность совпадения составов КГ пиропов эталонной и прогнозируемой трубки, правая – то же для среднекластерных составов пиропов; г – гистограммы частот встречаемости КГ пиропов эталонной и прогнозируемой трубок; д – среднекластерные содержания Na_2O в пиропе прогнозируемой трубки

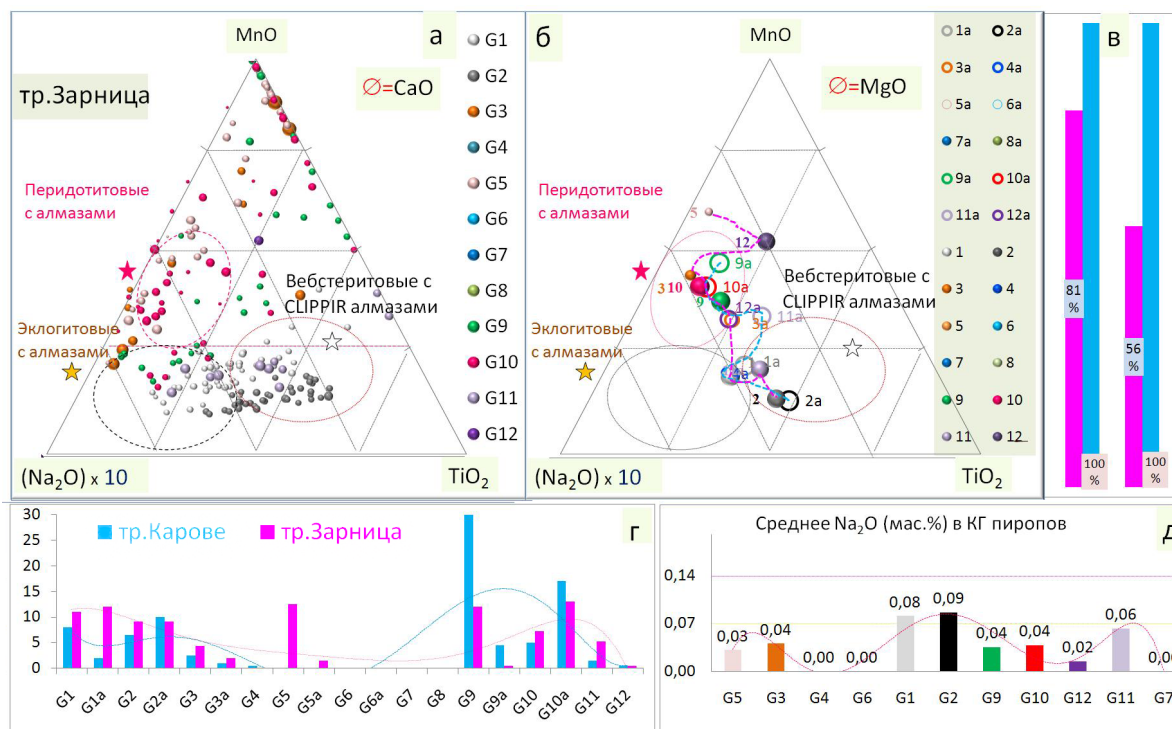


Рис. 11. Комплекс пузырьковых треугольных 4Е диаграмм $\text{Na}_2\text{O}-\text{MnO}-\text{TiO}_2$ (CaO, MgO) и гистограмм для составов пиропов трубки Зарница

Условные обозначения см. на рис. 10

авторской программы И. В. Ащепкова TERA55 (FORTRAN 77), включающей 48 минеральных термометров и 44 барометра для мантийных пород, которые рассчитываются одновременно по итерационной схеме [3]. Она позволяет совместно рассчитывать несколько пар параметров P и fO_2 и записывать их вместе с минеральными составами, а полученные матрицы экспортировать в Excel, Grapher 5-7, Surfer 8, Statistics и другие программные приложения. Для построения разрезов P - T , P - fO_2 используются диаграммы P - T , P - $Fe\#$, P -(Al, Ca, Ti), P - fO_2 для различных минералов (рис. 13–15). Каждая трубка при этом рассматривается как скважина, достигшая мантии. Горизонтальные координаты профилей SCLM задаются положением трубок на профиле, вертикальные координаты – расчетными значениями давления (P), связанными со шкалой глубин. На профилях SCLM в изолиниях отображаются расчетные параметры составов MCA – $Fe\#$ для оливинов ($Fe\#_{Ol}$), сосуществующих с другими MCA, значения CaO , TiO_2 , Cr_2O_3 для гранатов, а также расчетные температуры T °C и значения fO_2 для всех минералов или для отдельных фаз (рис. 16).

Химия минералов. Состав MCA изучался как в мантийных ксенолитах (коллекция И. В. Ащепкова, около 110 образцов), так и в концентратах обогащения кимберлитовых проб трубки Зарница.

Гранаты. Двумерная диаграмма Cr_2O_3 – CaO и вариации содержания Cr_2O_3 показывают несколько парагенетических кластеров для гранатов

(рис. 2). Самые высокохромистые гранаты – пиропы (Cr_2O_3 – до 9–10 масс. %) локализуются в полях дунита и гарцбургита [36; 65]. Еще одна область дунит-гарцбургитовых пиропов характеризуется содержаниями Cr_2O_3 – 4–9 масс. %. Большая часть пиропов соответствует лерцолитовой области с содержаниями Cr_2O_3 от 1 до 8 масс. %. Гранаты, расположенные в интервале 1–3 масс. % Cr_2O_3 , близки к верлитовому полю. Гранаты из интервала 2–7 масс. % Cr_2O_3 располагаются несколько выше верхней границы поля лерцолитов, но по модальным составам они в основном принадлежат к перидотитовому парагенезису. Степень обогащения гранатов метасоматическими компонентами определяется существенными вариациями примеси TiO_2 от 0,3 до 1,5 масс. %. Высокие значения Na_2O в пиропе, вероятно, отражают гибридность со щелочными расплавами.

Клинопироксены представлены хром-диопсидами, обнаруживающими в целом отрицательные корреляции FeO с CaO и Cr_2O_3 и положительные с TiO_2 . По составу они относятся к перидотитовому парагенезису и делятся на 6 основных групп. Группа 1 с высоким содержанием CaO и низким FeO (0,5–6,0 масс. %) (рис. 4, а), с 1,6–2,5 масс. % Cr_2O_3 и низкими содержаниями Al_2O_3 и Na_2O соответствует обедненному гарцбургит-лерцолитовому парагенезису. Группа 2 представлена Sr х из лерцолитов, а разновидности с высоким содержанием CaO близки к верлитовому парагенезису. Группа 3 представлена разновидностями с высоким содержанием Na_2O и низким Al_2O_3 , иногда

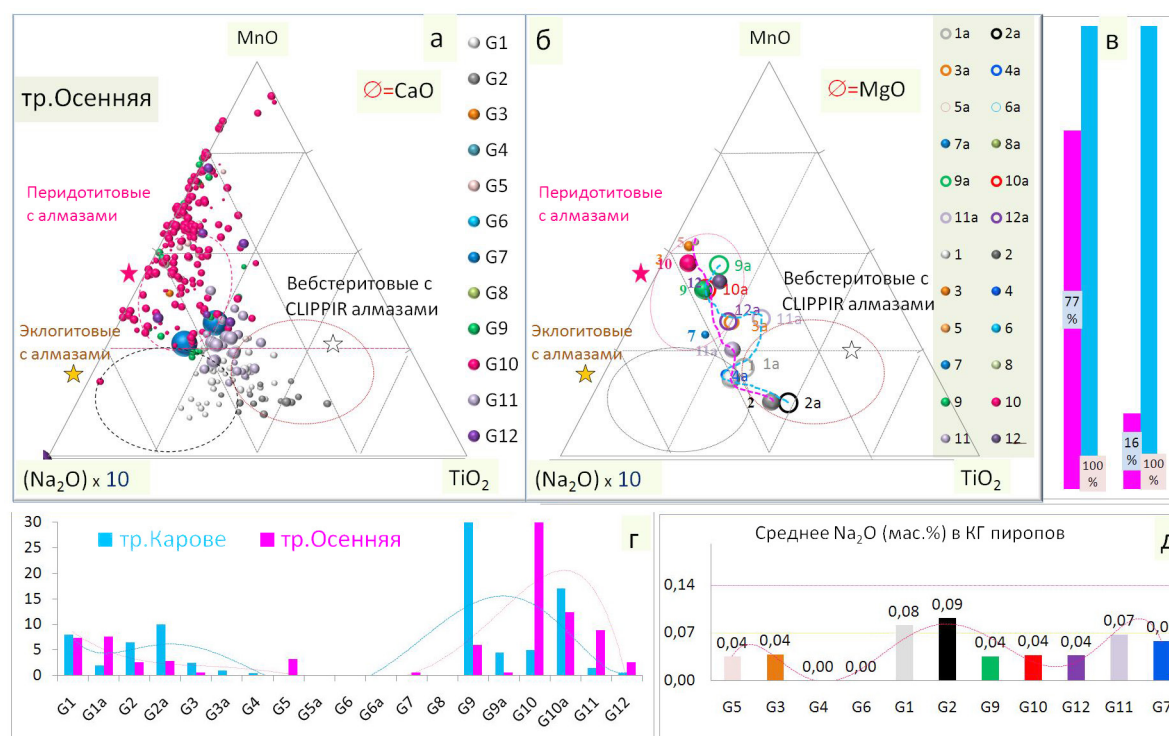


Рис. 12. Комплекс пузырьковых треугольных 4E диаграмм Na_2O – MnO – TiO_2 (CaO) и гистограмм для составов пиропов трубки Осенняя

Условные обозначения см. на рис. 10

с существенным содержанием до 0,3 масс. % K_2O , что указывает на реакцию рефertilизованных перидотитов с богатыми щелочами шшонитовыми расплавами. Наибольшее содержание Al_2O_3 в Срх соответствует реакции с адакитовыми расплавами. Группу 4 составляют Срх из прожилковых перидотитов и пироксенитов, которые содержат повышенное количество FeO и TiO_2 и демонстрируют высокие вариации Al_2O_3 и Na_2O . Группа 5 – Срх из деформированных и порфирокластических перидотитов, взаимодействовавших с прото-кимберлитами [21; 23]. Группа 6 – Срх из срост-

ков Ilm-Срх богатых Ti и бедных Al, связанных с влиянием протокимберлитовых расплавов [21]. Богатые Fe группы 5–6 с содержанием FeO – 7–11% близки к салитам, происходящим из кумулятов Мохо, нижней коры и гранулитов (разновидности, богатые Al, являются типичными омфацитами из эклогитов [22; 51] и богатых Fe пироксенитов. Наиболее богаты Cr Срх деплетированных ассоциаций и некоторых метасоматических разновидностей пород, а бедные Cr разновидности представлены Срх эклогитов или кумулятов коры и некоторых редких пироксенитов.

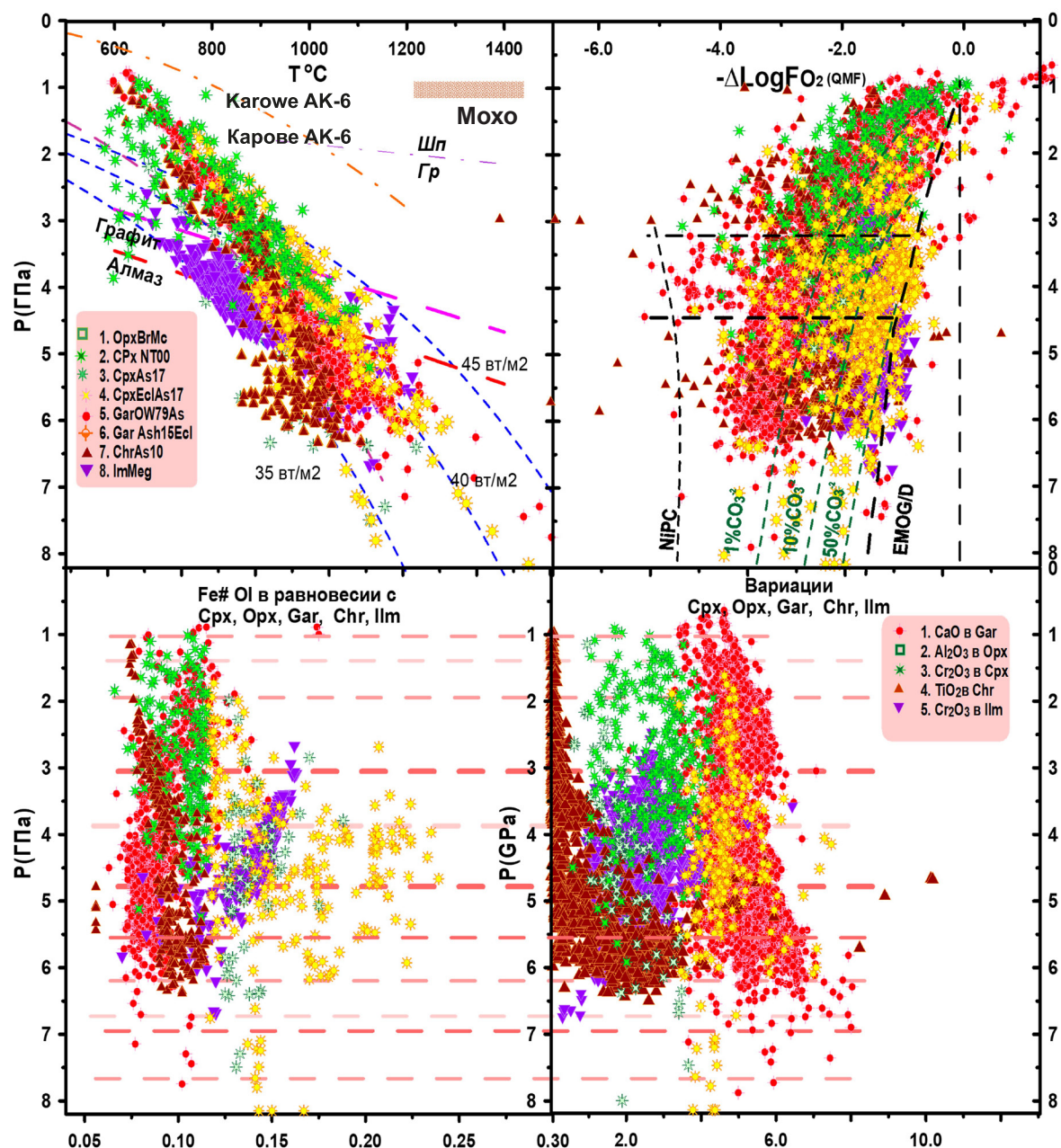


Рис. 13. Диаграмма $PTXfO_2$ мантийного разреза по ксенокристаллам МСА из трубы Карове (Ботсвана)

1 – Оpx: T °C [33] – P (гПа) [47]; 2 – Сpx: T °C [54] – P (гПа) [24] (для хром-диопсидов); 3 – то же самое для пироксенитов; 4 – то же для эклогитов; 5 – Gar: T °C [51] – P (гПа) [24]; 6 – то же для эклогитов; 7 – Chr: T °C [55] – P (гПа) [28]; 8 – Ilm: T °C [70] – P (гПа) [28] QMF – Qu-Mt-Fa буфер [55] EMOG/D – Ens-Mt-Ol-Gar/Di буфер алмаза [67]; NIPC–NiNiO буфер (Ni precipitation curve); SEA–South Australian geotherm [57] – 90 МВт/м²; Sp/Gar – граница шпинелевых и гранатовых перидотитов [41]; бежевый отрезок у шкалы $P = 1$ гПа – граница Мохо; линии «графит–алмаз»: красная по [42], фиолетовая по [37]; «X» – химический состав

Ильмениты варьируют по TiO_2 в их составе на диаграмме $\text{MgO}-\text{TiO}_2$ в пределах поля кимберлитовых составов, ниже пунктирной линии (рис. 6), что является результатом изменения давления при дифференциации расплавов прото-кимберлитов [25]. Они демонстрируют ступенчатый тренд $\text{TiO}_2-\text{Cr}_2\text{O}_3$, разделенный на 4 группы (рис. 6). Самые высокие значения Cr_2O_3 соответствуют наиболее богатым Mg ильменитам (ilm), связанным с метасоматическими жилами и контактными ассоциациями (рис. 6, А). Для мантийных ксенолитов характерны схожие вариации содержаний Ni и Cr (рис. 6). На графике $\text{TiO}_2-\text{Cr}_2\text{O}_3$ выделены 3 группы с плоскими трендами, сходными для большинства трубок кластера Зарница [18; 30].

Вариации V_2O_5 в ильменитах обычно отражают условия $f\text{O}_2$, и они схожи с NiO. Содержание Al_2O_3 ниже в группе, богатой MgO, где отмечаются наибольшие значения Cr_2O_3 в ильменитах, связанных с высокотемпературными метасоматическими жилами (рис. 6). Ильмениты, встречающиеся в мантийных ксенолитах перидотитов, богаты Cr [18].

Хромиты из трубки Зарница дают протяженный тренд, принадлежащий к типичной алмазональной ассоциации с Cr_2O_3 от 60 до 15%, который более выражен в хромистой части на диаграмме $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$. Характерно его деление на хромит-Сг-пикотитовую и ульвошпинелевую ветви (обогащенные FeTiO_3 и V_2O_5), последняя также отмечается в хромистой части диаграммы. Большинство образцов, богатых хромом, отклоняются от мантийного линейного тренда, образующего массив на диаграмме $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$ обогащенных Mg составов [30]. На графике $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{FeO}$ видны три отдельных направления, показывающие различные изоморфные замещения, отвечающие разным режимам летучести кислорода ($f\text{O}_2$). Наиболее богатые Fe_2O_3 разновидности соответствуют более окисленным условиям (рис. 7). Хромиты из трубки Зарница демонстрируют бимодальное распределение по числу зерен с пиками около 55 и 30% Cr_2O_3 .

Результаты исследования. Метод 5Е диаграмм составов МСА. Ниже представлены результаты изучения составов МСА «эталонной» трубки Карове, из БД которых групповым кластерным анализом сформировано по 200 среднекластерных составов «виртуальных» зерен каждого МСА, нанесенных на 5Е диаграмму Митчелла. В данной версии диаграмма получила название «5Е диаграмма» по пяти элементам – четырем главным (Mg, Fe, Al, Cr) и одному примесному (Ti), концентрации которого в МСА пропорциональны диаметру «пузырька» – аналитической точки на диаграммах [73; 74]. В данном случае реализовано сопоставление МСА трубки Карове с самими собой, что дает вероятность их совпадения по всем параметрам и диаграммам – $P = 100\%$ (рис. 2).

Диаграмма 5Е для МСА трубки Карове (рис. 2) демонстрирует геохимическую обстановку формирования их парагенезисов МСА в кимберлитовом

магматическом процессе, отвечающую интрателлурическому (мантийному) ее этапу (по В. А. Милашеву). Особое значение имеет КГ пиропов G2, установленная А. Муром во включениях в гигантских алмазах трубки Карове [51], которая доказывает парагенетическую связь CLIPPIR алмазов с пиропами КГ G2. Это позволяет использовать ее парагенезисы с КГ других МСА для построения минералого-геохимической модели среды генерации таких алмазов. Показательно, что частоты встречаемости пиропов КГ G2 в трубках Карове и имени Гриба, в которых добываются CLIPPIR алмазы, одинаковы (около 17%) [74]. Для полей составов индикаторных МСА трубки Карове характерны довольно широкие пределы содержаний главных химических элементов, что отражено на 5Е диаграмме (рис. 2). Характерно, что пределы вариаций отношения $\text{Cr}/(\text{Cr}+\text{Al})$ в хромдиопсидах и пикроильменитах, контролируемые РТ параметрами среды, достаточно широки (0,1–1,0), а последние близки к парамагнитному тренду. Напротив, в хромшпинелидах они достаточно узкие (0,8–1,0), с выраженным пикротовым трендом. Отношение $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ в целом для всех четырех МСА имеет достаточно широкие пределы вариации (0,1–0,7), но для отдельных КГ хромдиопсидов, хромшпинели и ильменитов пределы его колебаний укладываются в локальный интервал (0,1–0,2). Пиропы трубки Карове отличаются достаточно широким диапазоном вариаций $\text{Fe}/(\text{Fe}+\text{Mg})$ (0,1–0,6) и они представлены контрастными по генетической принадлежности КГ – от вебстерит-эклогитового парагенезиса до перидотит-дунитового и лерцолитового. Показательные для низкого окислительного потенциала среды КГ парамагнитных низкогематитовых ильменитов ilm1 и ilm2 слабо представлены в трубке Карове (0,6–1,5%), отличающейся низкой валовой алмазональностью – 0,15 кар/т [74]. На 5Е диаграмме обозначены характеристические («эталонные») контуры полей составов пиропов, пироксенов, ильменитов и хромитов трубки Карове, что позволяет оценить степень совпадения их составов с составами МСА тестируемой трубки (рис. 8, 9).

С этой целью такие же диаграммы построены для трубок Зарница и Осенняя как для объектов сравнения с трубкой Карове, которое проводится с оценкой вероятности сходимости составов их МСА. Ниже представлен комплекс диаграмм, который авторы предложили называть «QR-кодом» МСА [5], на которые вынесены составы МСА кимберлитовых трубок Зарница (рис. 8) и Осенняя (рис. 9).

Для составов МСА трубки Зарница вероятность близости составов их основных алмазональных парагенезисов с МСА трубки Карове (по Пирсону) определена на уровне 62%. На треугольных диаграммах составов пиропов и пироксенов можно оценить степень совпадения МСА трубок Карове и Зарница по примесям в них Na_2O , MnO , TiO_2 , Al_2O_3 и Cr_2O_3 (рис. 8, Б). На первой (верхней) диаграмме степень совпадения достаточно высока, и за «эталонный» контур составов пиропов (розо-

вая линия) и пироксенов (зеленая линия) трубки Карове выходит не более 10% зерен трубки Зарница. На второй (нижней) степень совпадения их составов еще выше, и за «эталонные» контуры выходят лишь составы единичных зерен пиропов и пироксенов трубки Зарница. На линейных графиках распределения содержаний TiO_2 в пиропе и хромдиоксидах трубки Зарница линии содержания TiO_2 практически совпадают с линиями распределения TiO_2 в этих минералах трубки Карове (рис. 9, Г). Это также отражено на секторах круговой диаграммы соотношений средних содержаний TiO_2 в пиропе (0,3%) и хромдиоксидах (0,4%), одинаковых для обеих трубок (рис. 8, Е и 9, Е). В хромшпинелях Зарницы среднее содержание TiO_2 в 2 раза выше (0,4%), чем в хромшпинелях Карове (0,2%). Линейный график содержания TiO_2 в составе хромитов Зарницы в большей степени сдвинут в сторону пикритового парагенезиса по сравнению с хромитами Карове, тяготеющими к кимберлитовому парагенезису (рис. 8, Г). Для составов пикроильменитов Зарницы средние содержания Fe_2O_3 по сравнению с пикроильменитами Карове примерно одинаковы (0,7% против 0,6%), что отражено и на линейных графиках содержания Fe_2O_3 , практически совпадающих (рис. 8, Г).

Ниже приведен такой же комплекс диаграмм, построенных для составов МСА трубки Осенняя, для которых вероятность сходимости содержаний основных химических элементов, по сравнению с характерным составом МСА трубки Карове, 50% (по Пирсону) (рис. 8). На треугольных диаграммах составов пиропов и пироксенов трубок Карове и Осенняя по примесям в них Na_2O , MnO , TiO_2 , Al_2O_3 и Cr_2O_3 отмечаются следующие тенденции (рис. 9, Б). На первой (верхней) диаграмме титановый тренд для пиропов и пироксенов выражен слабо в сравнении с их составами в трубке Карове, но более ярко выражен тренд натрия. На второй (нижней) степень совпадения их составов высокая и в сравнении с «эталонным» контуром хромистый и натровый тренды пиропов и пироксенов трубки Осенняя, трассируемые единичными зернами, выражены более отчетливо. На линейных графиках TiO_2 в составах пиропов линия распределения проходит несколько выше, а в составах диоксилов – ниже «эталонной» линии пиропов и диоксилов трубки Карове (рис. 9, Г). Для хромшпинелей трубки Осенняя линия распределения в них примеси TiO_2 в области низких значений (до 1%) практически совпадает с «эталонной», а в области $\text{TiO}_2 > 1\%$ она отклоняется в сторону пикритового парагенезиса, выше линии распределения TiO_2 в хромшпинелидах трубки Карове. На круговой диаграмме средних значений содержания TiO_2 (рис. 9, Е) оно составляет в пиропе 0,2 и 0,3% в хромдиоксидах, что ниже, чем в этих же минералах трубки Карове (0,3 и 0,4 соответственно). В хромшпинелях среднее содержание TiO_2 – 0,2% – одинаковое с хромшпинелями «эталонного» кимберлита Карове. Для составов пикроильменитов трубки Осенняя среднее содержание

Fe_2O_3 , по сравнению с пикроильменитами Карове в 2 раза ниже и составляет 0,2%, что, по критерию Герни [5], указывает на более благоприятные условия для сохранности алмазов в кимберлитах трубки Осенняя.

Метод 4Е диаграмм для составов пиропов. Пироп относится к числу ведущих типоморфных минералов большинства мантийных парагенезисов в кимберлитах. Кроме того, пироп наиболее информативен и наиболее изучен как представитель минералов мантийного происхождения перидотитового и эклогитового парагенезисов. Его состав и свойства широко используются для решения минерогенических и петрологических задач, а также при поисках коренных месторождений алмазов. Для построения «4Е» диаграмм необходимо исследовать составы четырех перечисленных выше МСА, что не всегда возможно при поисках и разведке кимберлитов в силу относительной редкости хромитов и хромдиоксилов. Со времен «пироповой съемки» профессора А. А. Кухаренко наиболее широко в поисковых целях используется часто встречающийся пироп [12]. Для составов пиропов предложен комплекс диаграмм, основу которого составляет треугольная диаграмма $\text{Na}_2\text{O}-\text{MnO}-\text{TiO}_2$, на которой содержания четвертого окисла (CaO для левой и MgO для правой диаграммы) отражается диаметром аналитической точки («пузырька»), и который можно назвать «4Е» по числу вовлеченных в анализ химических элементов (рис. 10).

Предложенный комплекс диаграмм позволяет на вероятностной основе сравнивать составы пиропов оцениваемой трубки с «эталонными» составами трубки Карове. На диаграммах (рис. 10) представлен такой комплекс для составов пиропов выборки из 200 зерен «эталонной» трубки Карове в сравнении с самими собой. На треугольной диаграмме справа и на гистограммах процентных содержаний (частот) КГ пиропов (рис. 10, б, в) показаны совпадения трендовых линий изменения среднекластерных составов и частот их встречаемости с вероятностью 100%. Для средних составов пиропов Карове характерны выраженные тренды алмазоносных перидотитового (Р) и эклогитового (Е) парагенезисов (области их составов оконтурены пунктирными линиями), а тренд нарастания содержания TiO_2 , характерного для пиропов КГ G1 и G2, связан с вебстеритовым (W) парагенезисом, контролирующим кристаллизацию CLIPPIR алмазов [51]. Тренды нарастания содержания Na_2O связаны с эклогитовым, а MnO – с перидотитовым парагенезисами. По Герни [40], уровень примеси $\text{Na}_2\text{O} > 0,07\%$ в пиропе связан с их алмазоносными парагенезисами, и вариации содержания этого окисла в их КГ отражены на гистограмме (рис. 11, д). В пиропе трубки Карове максимальные концентрации Na_2O (до 0,10%) характерны для вебстерит-эклогитовых КГ G1, G2 и G4, а минимальные (<0,07%) – для перидотитовых КГ.

Ниже представлены комплексы «4Е» диаграмм для трубок Зарница и Осенняя, которые сравниваются на вероятностном уровне по средним

значениям составов КГ их пиропов с составами пиропов «эталонной» трубки Карове (рис. 11, 12).

На графиках составов пиропов трубки Зарница (рис. 11, а) и средних составов их КГ (рис. 11, б) вероятность сходимости их с составами пиропов из «эталонного» кимберлита Карове по их средним составам КГ высокая и составляет 81%. По составам всех КГ вероятность такого совпадения невысока и составляет всего 56% (рис. 11, в). Для трубки Зарница характерен высокий процент низкохромистых и высокотитанистых пиропов КГ G1 и G2 и более низкий процент зерен пиропов из перидотитовых алмазоносных парагенезисов КГ G9 и G10 (рис. 11, в). Максимальные концентрации Na_2O характерны для вебстерит-эклогитовых КГ G1а и G2а, а минимальные – для перидотитовых КГ (<0,07%), что отмечалось и в пиропсах трубки Карове. Таким образом, в трубке Зарница

преобладают алмазоносные вебстерит-эклогитовые парагенезисы пиропов над перидотитовыми по сравнению с эталонным кимберлитом трубки Карове, где соотношение этих КГ пиропов обратное.

В слабоалмазоносной трубке Осенняя соотношения пироповых парагенезисов отличаются более высокими содержаниями КГ алмазоносных перидотитовых парагенезисов G10 при достаточно низких долях КГ вебстерит-эклогитового парагенезиса – G1 и G2 (рис. 12, в). Показательно, что в этой трубке гораздо меньше пиропов КГ G1 и G2 (около 15 и 5%) по сравнению с Зарницей (25 и 20%). Вероятность сходимости средних составов КГ пиропов трубки Осенняя и пиропов «эталонной» Карове немного ниже, чем составов пиропов трубки Зарница, она составляет 77%, а вероятность сходимости по составам всех КГ ее пиропов с пиропами «эталонной» крайне мала – всего 16% (рис. 12, в).

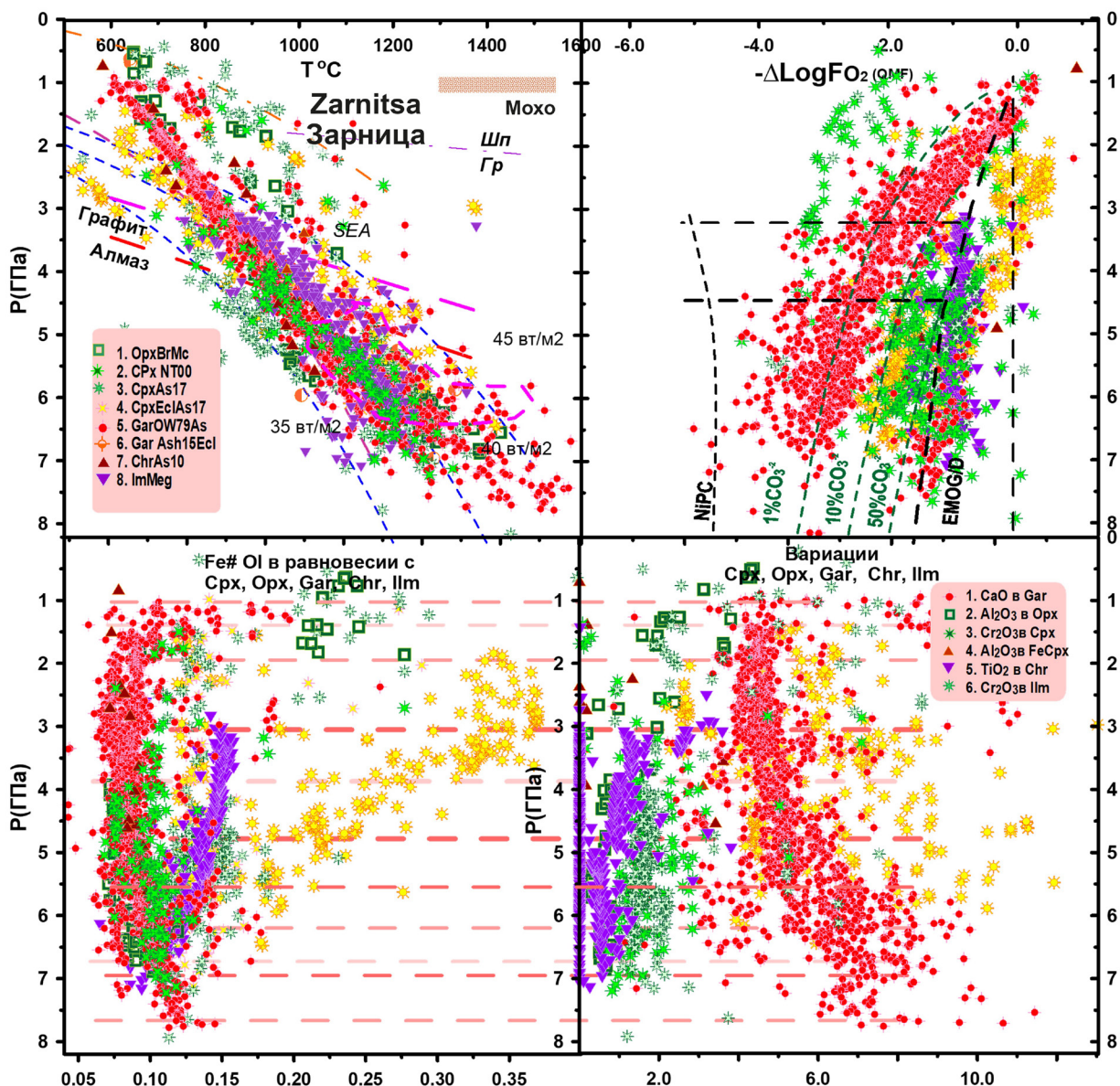


Рис. 14. Диаграмма PTXfO_2 мантийного разреза по ксенокристаллам МСА трубки Зарница (Якутия)

Условные обозначения см. на рис. 13

Термобарометрия и реконструкции мантийных разрезов. Мантийная колонна под трубкой Карове (АК-6) имеет специфическое строение. Пиропы обнаруживают на РТ диаграмме обычный для них адвективный тренд, который пересекает кондуктивные мантийные геотермы в средней части разреза [61]. На уровне перехода литосфера–астеносфера – LAB (6,0–7,5 гПа) обнаруживается разогрев. Клинопироксены в верхней части повторяют гранатовый тренд, а в нижней есть низкотемпературная ветвь, представленная эклогитами. Во всей нижней части мантийной колонны проявлено широкое развитие эклогитов, они разнообразны, в основном группы А–В субдуцированной океанической коры и Mg-андезитовых кумулатов ($Fe\# < 25$), хотя отмечено и наличие наиболее глубоких Ti-мегакристаллов [36]. Эклогитовые пироксены локализованы в интервале до от 7,5 до

4,0 гПа, и их значительно меньше гранатов. Хромистые пироксены обогащены Al_2O_3 , Cr_2O_3 и Na_2O , что является признаком гибридизма частичных выплавов из перидотитов с эклогитами [22]. Они образуют два субвертикальных субпараллельных тренда. Для пироповых гранатов характерно резкое увеличение содержаний CaO , а для хромитов – существенное обогащение TiO_2 в нижней части разреза за счет взаимодействия с прото-кимберлитовыми расплавами.

Ильмениты и хромиты дают сравнительно низкотемпературные условия в средней и верхней частях разреза. А в нижней условия существенно разогреты вследствие взаимодействия с прото-кимберлитами. Рост содержаний Cr_2O_3 в ильменитах вверх по разрезу обусловлен взаимодействием прото-кимберлитов с перидотитами. Существенной особенностью всех минералов

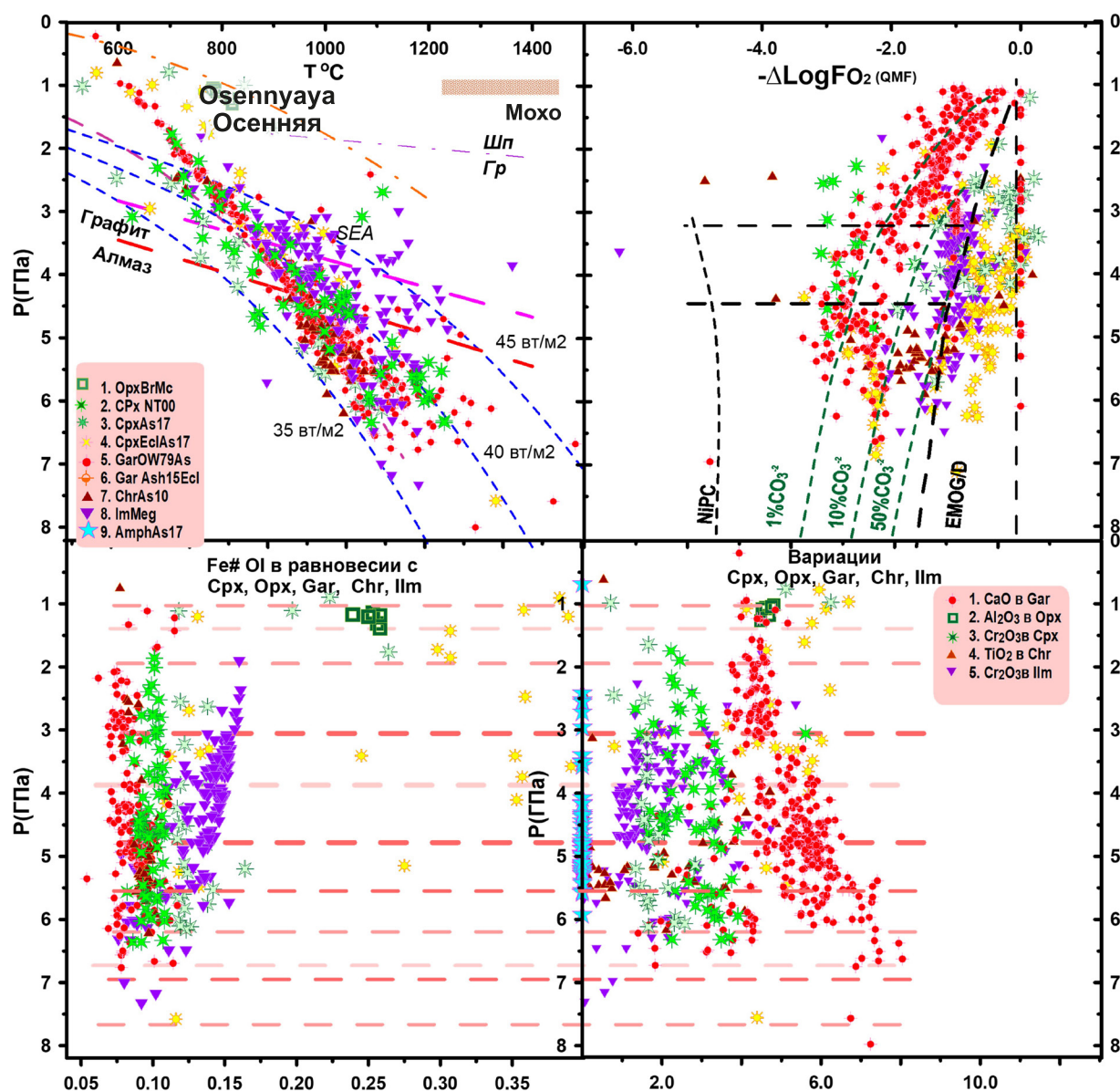


Рис. 15. Диаграмма РТХ/ O_2 мантийного разреза по ксенокристаллам МСА трубки Осенняя (Якутия)

Условные обозначения см. на рис. 13

является низкий окислительный потенциал – для всех в пределах устойчивости алмаза выше буфера EMOG/D [67].

Диаграмма $PTXfO_2$, реконструированная для трубки Зарница, сохраняет общие черты слоистости мантийных разрезов с чередованием горячих и холодных мантийных слоев, установленных для трубки Удачная [21; 23] в Далдынском кимберлитовом поле [19] (рис. 14). Расчетные условия PTX для Gar, Орх и Chr лежат в диапазоне кондуктивных геотерм от 35 до 45 МВт/м² (рис. 14). Наиболее высокие температуры имеют ксенолиты, расположенные вблизи литосферно-астеносферного основания (LAB) при давлении 6 гПа (от 5,0 до 8,0 гПа). Барометрия по Gar [24] и Орх [47] также показывает в целом высокие температуры на границе литосферы и астеносферы LAB при тепловом потоке от 34 до 45 мВт/м², которые выше в нижней части мантии, маркирующей положение деформированных и порфиорокластических перидотитов, ильменитсодержащих перидотитов и жил. Холодная ветвь 35 Вт/м² прослеживается по оценкам для дунит-гарцбургитовых пород от 6,5 до 5,0 гПа и совпадает с РТ условиями во включениях пиропов в алмазах [29]. В средней части (3,0–4,0 гПа) слой пироксенитов разделяет мантийный разрез на нижнюю и верхнюю части [18; 20–27; 29; 30]. От основания литосферы до 3,5 гПа, как и под большинством разрезов мантийных колонн под кимберлитовыми трубками Якутии [20–30], для мантийных эклогитов разреза Зарницы наблюдается тенденция к увеличению Fe# при снижении давления [22].

Относительно длительный тренд полибарического фракционирования для ильменита от 7,5 до 3,0 гПа LAB делится на три ветви с различным содержанием Cr, увеличивающимся от нижней к верхней группе. Они разделяются на пять групп по давлению. РТ условия для обогащенного Fe-Ti Crx с относительно низким содержанием Cr определяют высокотемпературный тренд, совпадающий с трендом ильменита, аналогичным трубке Дальняя. В большинстве из них содержание Fe# ниже, чем в $Fe\#_{lim}$, и они образуют плотный тренд, давление для которого в верхней части достигает 4,5 гПа.

Диаграмма $P-fO_2$ для Зарницы (рис. 14) повторяет конфигурацию диаграммы для трубки Дальняя [23]. Ильменитовый тренд представляет собой наиболее окисленный материал, расположенный немного выше буфера EMOG/D [67], наряду с Ti-авгитами. Гранатовые тренды делятся на две ветви – истощенный лерцолитовый и окисленный, соответствующий взаимодействию их с прото-кимберлитами. Лерцолитовый тренд соответствует содержанию CO_2 в расплаве от 1 до 10% [68], что характерно практически для всех кимберлитовых местонахождений [46], включая трубку Удачная [21], а вторая соответствует условиям для пикроильменитов из перидотитов с деформационными структурами, трассирующими границу литосферы и астеносферы (LAB). Наиболее глубинные гранаты (8–9 гПа) образуют конвективную ветвь, что

подтверждает оценки РТ для Орх по алмазным включениям [21; 22; 30].

Мантийная колонна, реконструированная под трубкой Осенняя (рис. 15), в целом повторяет особенности строения мантийного разреза под трубкой Зарница. Только здесь тренд для эклогитовых гранатов очень слабо выражен. И недостаточно данных по составам хромитов из-за малого количества проанализированных их зерен. На диаграмме $P-fO_2$ для окислительных условий видно, что материал мантийной колонны под трубкой Осенняя более окислен, чем под трубкой Зарница. Слоистость мантийных колонн в целом обусловлена чередованием первичных субдукционных пластин, количество которых близко и которое регулировалось эпохами активации суперплюмов в AR_{1-2} [27] – до 8–9 эпизодов, когда пластины не смогли погрузиться. Эти вопросы для Далдыно-Алакитского района и других кимберлитовых районов Якутии рассматривались неоднократно [18–27; 29; 30].

На диаграмме (рис. 16) представлен схематический разрез верхней мантии на протяжении 35 км с северо-северо-востока на юго-запад – запад от куста трубки Зарница до куста трубки Украинская. Видно, что на фоне довольно плоской слоистой структуры в верхней части мантии (выше 4 гПа) выявлен выступ в районе трубки Зарница, где ярко выражен существенный разогрев, наиболее проявленный как раз под основной трубкой. Резко истощенный дунитовый горизонт постепенно понижается от трубки Зарница к трубке Украинская. При детальном рассмотрении здесь выявляется структура из четырех промежуточных магматических камер, обозначенных красными овалами. Как в районе трубки Зарница, так и в западной части разреза установлена очень высокая железистость минералов мантийных колонн, что свидетельствует о широком развитии метасоматитов и пироксенитов и в целом неблагоприятно для алмазоносности.

Выводы. Минералогия и строение разреза литосферной мантии под трубкой Зарница во многом повторяет особенности мантийного разреза трубки Карове, но с более выраженной слоистостью. Однако здесь больше В-эклогитов ($Fe\# < 38$), и степень обогащения CaO как эклогитовых (группа С), так и перидотитовых гранатов существенно выше. Можно предположить, что эклогиты произошли из гетерогенных пластин, содержащих субдуцированные океанические базальты, пироксениты и океанические осадки, так как среди эклогитов много высококальциевых и глиноземистых гроспидитов (группа С) [22]. Гибридных хромистых пироксенов в разрезе Зарницы также много. Существенное отличие в том, что минералы Зарницы соответствуют более окисленным условиям (на ~1Lg ед. fO_2). Такое впечатление, что здесь и эклогиты более окислены, и степень взаимодействия с прото-кимберлитами более проявлена. Существенным плюсом является присутствие большого количества ультрахромистых пиропов,

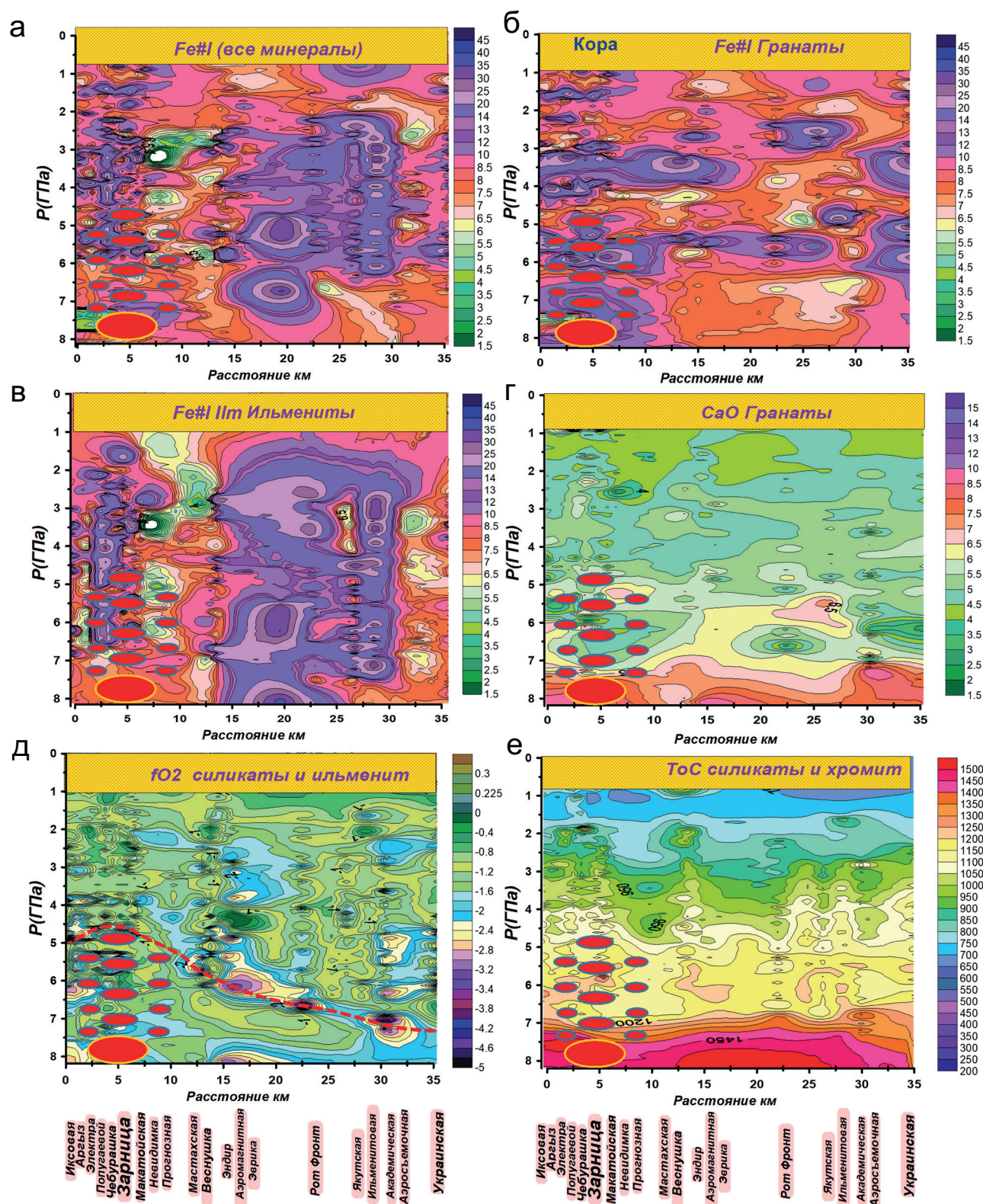


Рис. 16. Схематический разрез литосферной мантии (SCLM) кимберлитового поля Далдыньское (трубки Зарница – Украинская) на основе:

а – P GPa– $Fe\#$ для всех МСА; б – P GPa– $Fe\#$ для гранатов; в – P GPa– $Fe\#$ для ильменитов; г – P GPa– CaO масс. % для гранатов; д – P GPa– fO_2 для всех МСА; е – P GPa – T °C; линия профиля показана на рис. 1; расположение вероятных магматических камер обозначено красными овалами [18]

захваченных ниже LAB [18; 30], что является положительным фактором алмазности трубки Зарница, превосходящей трубку Карове в 3 раза. Для CLIPPIR алмазов благоприятным фактором является наличие в Зарнице пиропов вебстерит-эклогитового парагенезиса, сопровождающих этот тип алмазов в трубке Карове.

В целом в трубке Зарница наиболее перспективные на CLIPPIR алмазы пикритовые, порфировые кимберлиты, которые обогащены хром-пиропами и содержат менее окисленный материал, и которые очень редки в кратерной чаше, но, судя по данным бурения, гораздо чаще встречаются в нижней ее части – диатреме, глубже 250 м. Их много в виде включений «кимберлит в кимберлите» в автолитовой кимберлитовой брекчии диатремы.

В мантийной колонне под трубкой Осенняя не выражено обогащение эклогитовым материалом, и ее минералы еще более окислены, чем трубки Зарница, что делает ее малоперспективной на CLIPPIR алмазы.

Применение химико-минералогических методов «5Е» и «4Е», основанных на кластеризации составов МСА на базе известных химико-генетических классификаций Доусона-Стефенса и Гаранина позволяет на вероятностной основе оценить перспективность слабоалмазных кимберлитов на наличие в них гигантских CLIPPIR алмазов, что радикально меняет как методику их опробования, так и геолого-экономическую оценку итогов ГРП и их инвестиционный потенциал.

Работа проведена при поддержке Российского научного фонда, грант 24-27-00411. Авторы благодарят за поддержку исследований ИГМ СО РАН, ГИ СО РАН, Санкт-Петербургский горный университет.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Анастасенко Г. Ф., Масайтис В. Л. От трубки «Ягерсфонтейн» к трубке «Зарница» // Региональная геология и металлогения. – 2005. – № 26. – С. 28–33.
2. Ащепков И. В. Мантийные террейны Сибирского кратона: их взаимодействие с плюмовыми расплавами на основании термобарометрии и геохимии мантийных ксенокритов / И. В. Ащепков, А. С. Иванов, С. И. Костровицкий, М. А. Вавилов, С. А. Бабушкина, Н. В. Владыкин, Н. С. Тычков, Н. С. Медведев // Геодинамика и тектонофизика. – 2019. – Т. 10, № 2. – С. 197–245.
3. Ащепков И. В. Программа мантийных термометров и барометров-барометриков: использование для реконструкции и калибровки РТ-методов // Вестник отделения наук о Земле РАН. – 2011. – Т. 3. NZ6008.
4. Гаранин В. К. Включения в алмазе и алмазоносные породы / В. К. Гаранин, Г. П. Кудрявцева, А. С. Марфунина, О. А. Михайличенко; под ред. А. С. Марфунина. – М. : Изд-во МГУ, 1991. – 239 с.
5. Герни Дж. Дж., Мур Р. О. Геохимическая корреляция между минералами кимберлитов и алмазами кратона Калахари // Геология и геофизика. – 1994. – С. 12–24.
6. Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. – М. : Недра-Бизнесцентр, 2003. – 603 с.
7. Иванов А. С. Новый критерий алмазности кимберлитов // Труды XII Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской сессии. – Апатиты : КНЦ РАН, 2015. – С. 268–270.
8. Иванов А. С. Статистический анализ составов индикаторных минералов кимберлитов // Труды XIV Всероссийской (с международным участием) Научной школы «Математические исследования в естественных науках». – Апатиты, 2017. – С. 173–182.
9. Масайтис В. Л. Геолком–ВСЕГЕИ: вклад в региональное прогнозирование, поиски и открытие месторождений алмазов / В. Л. Масайтис, А. Ф. Морозов, О. В. Петров, Ю. М. Эринчек // Эффективность прогнозирования и поисков месторождений алмазов: прошлое, настоящее и будущее (Алмазы-50). – СПб., 2004. – С. 9–18.
10. Матерон Ж. Основы прикладной геостатистики. – М. : Мир, 1968. – 408 с.
11. Орлов Ю. Л. Минералогия алмаза. 2-е изд. – М. : Наука, 1984. – 264 с.
12. Сарсадских Н. Н., Попугаева Л. А. Новые данные об ультраосновном магматизме на Сибирской платформе // Разведка и охрана недр. – 1955. – № 5. – С. 11–20.
13. Соболев В. С. Основные итоги научно-исследовательских работ и задачи в области прогнозирования алмазных месторождений // Геология и геофизика. – 1980. – Т. 12. – С. 3–11.
14. Соболев Н. В. О минералогических критериях алмазности кимберлитов // Геология и геофизика. – 1971. – № 3. – С. 70–80.
15. Соболев Н. В. Перспективы поисков алмазоносных кимберлитов в северо-восточной части Сибирской платформы / Н. В. Соболев, А. В. Соболев, А. А. Томиленко, Д. В. Кузьмин, С. А. Граханов, В. Г. Батанова, А. М. Логвинова, Т. А. Бульбак, С. И. Костровицкий, Д. А. Яковлев, Е. Н. Федорова, Г. Ф. Анастасенко, Е. И. Николенко, А. В. Толстов, В. Н. Реутский // Геология и геофизика. – 2018. – Т. 59, № 10. – С. 1701–1719.
16. Соболев Н. В., Логвинова А. М., Ефимова Э. С. Включения эклогитовых гранатов, обогащенных марганцем, в алмазах: свидетельство рециклирования земной коры // Докл. РАН. – 2013. – Т. 453, № 3. – С. 326–328.
17. Юзмухаметов Р. Н. Вклад геологов НИИГА в открытие якутских алмазов // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. – 2005. – № 4. – С. 11–14.
18. Ashchepkov I. Deep mantle roots of the Zarnitsa kimberlite pipe, Siberian craton, Russia: Evidence for multistage polybaric interaction with mantle melts / I. Ashchepkov, N. Medvedev, A. Ivanov, N. Vladyskin, T. Ntaflos, H. Downes, A. Saprykin, A. Tolstov, M. Vavilov, G. Shmarov // Journal of Asian Earth Sciences. – 2021. – Vol. 213. – Pp. 104756.
19. Ashchepkov I. V. Alakit and Daldyn kimberlite fields, Siberia, Russia: Two types of mantle sub-terraces beneath central Yakutia? / I. V. Ashchepkov, A. M. Logvinova, T. Ntaflos, N. V. Vladyskin, H. Downes // Geoscience Frontiers. – 2017. – Vol. 8. – Pp. 671–692.
20. Ashchepkov I. V. Composition and thermal structure of the lithospheric mantle beneath kimberlite pipes from the Catoca cluster, Angola / I. V. Ashchepkov, A. Y. Rotman, S. V. Somov, V. P. Afanasiev, H. Downes, A. M. Logvinova, S. Nossyko, J. Shimupi, S. V. Palessky, O. S. Khmelnikova, N. V. Vladyskin // Tectonophysics. – 2012. – Vol. 530, 531. – Pp. 128–151.
21. Ashchepkov I. V. Deep-Seated Xenoliths from the Brown Breccia of the Udachnaya Pipe, Siberia. D. / I. V. Ashchepkov, T. Ntaflos, S. S. Kuligin, E. V. Malygina, A. M. Agashev, A. M. Logvinova, S. I. Mityukhin, N. V. Alymova, N. V. Vladyskin, S. V. Palessky, O. S. Khmelnikova // In: G. Pearson et al. (eds.). Proceedings of 10th International Kimberlite Conference. – New Delhi : Springer India, 2013. – Vol. 1. – Pp. 59–74.
22. Ashchepkov I. V. Eclogite varieties and their positions in the cratonic mantle lithosphere beneath Siberian craton and Archean cratons worldwide / I. V. Ashchepkov,

- A. M. Logvinova, Z. V. Spetsius, H. Downes, T. Ntafos, A. S. Ivanov, V. N. Zinchenko, S. I. Kostrovitsky, Y. I. Ovchinnikov // *Minerals*. – 2022. – Vol. 12, no. 11. – Pp. 1353.
23. Ashchepkov I. V. Interaction between protokimberlite melts and mantle lithosphere: Evidence from mantle xenoliths from the Dalnyaya kimberlite pipe, Yakutia (Russia) / I. V. Ashchepkov, T. Ntafos, Z. V. Spetsius, R. F. Salikhov, H. Downes // *Geoscience Frontiers*. – 2017. – Vol. 8, iss. 4. – Pp. 693–710.
24. Ashchepkov I. V. Monomineral universal clinopyroxene and garnet barometers for peridotitic, eclogitic and basaltic systems / I. V. Ashchepkov, T. Ntafos, A. M. Logvinova, Z. V. Spetsius, N. V. Vladykin // *Geoscience Frontiers*. – 2017. – Vol. 8, no. 4. – Pp. 775–795.
25. Ashchepkov I. V. Picroilmenites in Yakutian kimberlites: Variations and genetic models / I. V. Ashchepkov, N. V. Alymova, A. M. Logvinova, N. V. Vladykin, S. S. Kuligin, S. I. Mityukhin, H. Downes, Y. B. Stegnitsky, S. A. Prokoviev, R. F. Salikhov, S. V. Palevsky, O. S. Khmelnikova // *Solid Earth*. – 2014. – Vol. 5, iss. 2. – Pp. 915–938.
26. Ashchepkov I. V. Problems of Mantle Structure and Compositions of Various Terranes of Siberian Craton / I. V. Ashchepkov, N. V. Vladykin, A. Ivanov, S. Babushkina, M. Vavilov, N. Medvedev // In: Vladykin N. (eds.) *Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis*. Springer Proceedings Earth Environmental Sciences. – Springer, Cham., 2021. – Pp. 15–48.
27. Ashchepkov I. V. Regularities and mechanism of formation of the mantle lithosphere structure beneath the Siberian Craton in comparison with other cratons / I. V. Ashchepkov, N. V. Vladykin, T. Ntafos, H. Downes, R. Mitchell, A. P. Smelov, N. V. Alymova, S. I. Kostrovitsky, A. Ya. Rotman, G. P. Smarov, I. V. Makovchuk, Yu. B. Stegnitsky, E. N. Nigmatulina, O. S. Khmelnikova // *Gondwana Research*. – 2013. – Vol. 23, no. 1. – Pp. 4–24.
28. Ashchepkov I. V. Structure and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian craton, thermobarometric study / I. V. Ashchepkov, N. P. Pokhilenko, N. V. Vladykin, A. M. Logvinova, S. I. Kostrovitsky, V. P. Afanasiev, L. N. Pokhilenko, S. S. Kuligin, L. V. Malygina, N. V. Alymova, O. S. Khmelnikova, S. V. Palevsky, I. V. Nikolaeva, M. A. Karpenko, Y. B. Stagnitsky // *Tectonophysics*. – 2010. – Vol. 485. – Pp. 17–41.
29. Ashchepkov I. V. Thermobarometry of diamond inclusions: Mantle structure and evolution beneath Archean cratons and mobile belts worldwide / I. V. Ashchepkov, A. M. Logvinova, Z. V. Spetsius, H. Downes // *Geosystems and Geoenvironment*. – 2022. – Vol. 2, no. 2. – Pp. 100156.
30. Ashchepkov I. V. Trace element geochemistry of mantle xenoliths from Zarnitsa kimberlite pipe, Daldyn field, Yakutia: Complex history of melts interactions with lithospheric mantle / I. V. Ashchepkov, N. Ntafos, N. S. Medvedev, G. P. Shmarov // *Geosystems and Geoenvironment*. – 2024. – Pp. 100313.
31. Ballhaus C., Berry R. F., Green D. H. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1991. – Vol. 107. – Pp. 27–40.
32. Brey G. P., Köhler T. Geothermobarometry in four-phase Iherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers // *Journal of Petrology*. – 1990. – Vol. 31, no. 6. – Pp. 1353–1378.
33. Chinn I. Deciphering the history of CLIPPIR diamonds from their morphology and surface features // *International Kimberlite Conference*. – 2024. – Vol. 12.
34. Davies R. M. Inclusions in diamonds from the K14 and K10 kimberlites, Buffalo Hills, Alberta, Canada: diamond growth in a plume? / R. M. Davies, W. L. Griffin, S. Y. O'Reilly, T. E. McCandless // *Lithos*. – 2004. – Vol. 77, no. 2. – Pp. 99–111.
35. Davies R. M. Mineral inclusions and geochemical characteristics of microdiamonds from the DO27, A154, A21, A418, DO18, DD17 and Ranch Lake kimberlites at Lac de Gras, Slave Craton, Canada / R. M. Davies, W. L. Griffin, S. Y. O'Reilly, B. J. Doyle // *Special Issue: Selected papers from the 8th IKC, Victoria, BC, Canada, 22–27 June 2003*. – 2004. – Vol. 2. – Pp. 39–55.
36. Dawson J. B., Stephens W. E. Statistical classification of garnets from kimberlites and xenoliths // *Journal of Geology*. – 1975. – Vol. 83, no. 5. – Pp. 589–607.
37. Day H. W. A revised diamond-graphite transition curve // *American Mineralogist*. – 2012. – Vol. 97. – Pp. 52–62.
38. Griffin W. L., Ryan C. G. Trace elements in indicator minerals: Area selection and target evaluation in diamond exploration // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1995. – Vol. 53. – Pp. 311–337.
39. Gudmundsson G., Wood B. J. Experimental tests of garnet peridotite oxygen barometry // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1995. – Vol. 119. – Pp. 56–67.
40. Gurney J. J., Zweistra P. The interpretation of the major element compositions of mantle minerals in diamond exploration // *Journal of Geochemical Exploration*. – 1995. – No. 53. – Pp. 293–309.
41. Jenkins D. M., Newton R. C. Experimental determination of the spinel peridotite to garnet peridotite inversion at 900 °C and 1,000 °C in the system CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂, and at 900 °C with natural garnet and olivine // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 1979. – Vol. 68. – Pp. 407–419.
42. Kennedy C. S., Kennedy G. C. The equilibrium boundary between graphite and diamond // *J. Geophys. Res.* – 1976. – Vol. 81. – Pp. 2467–2470.
43. Krogh E. J. The garnet-clinopyroxene Fe–Mg geothermometer – a reinterpretation of existing experimental data // *Contrib. Mineral. Petrol.* – 1988. – Vol. 99. – Pp. 44–48.
44. Lavrent'ev Y. G. Electron probe microanalysis of rock-forming minerals with a JXA-8100 electron probe microanalyzer / Y. G. Lavrent'ev, V. Korolyuk, L. Usova, E. Nigmatulina // *Russian Geology and Geophysics*. – 2015. – Vol. 56. – Pp. 1428–1436.
45. Lepekhina E. N. SHRIMP U–Pb zircon ages of Yakutian kimberlite pipes / E. N. Lepekhina, A. Y. Rotman, A. V. Antonov, S. A. Sergeev // 9th IKC Extended Abstracts. – Frankfurt, 2008. – No. 9.
46. McCammon C. A. Oxidation during metasomatism in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, South Africa: implications for the survival of diamond / C. A. McCammon, W. L. Griffin, S. R. Shee, H. S. O'Neill // *Contributions to Mineralogy and Petrology*. – 2001. – Vol. 141, no. 3. – Pp. 287.
47. McGregor I. D. The system MgO–SiO₂–Al₂O₃: solubility of Al₂O₃ in enstatite for spinel and garnet peridotite compositions // *American Mineralogy*. – 1974. – Vol. 59. – Pp. 110–119.
48. Mikhailenko D. S. Origin of graphite–diamond-bearing eclogites from Udachnaya kimberlite pipe / D. S. Mikhailenko, S. Aulbach, A. V. Korsakov, A. V. Golovin, E. V. Malygina, A. Gerdes, A. S. Stepanov, Y. G. Xu // *Journal of Petrology*. – 2021. – Vol. 62, no. 8. – egab033.
49. Mitchell R. H. *Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology*. – New York: Plenum Press, 1986. – 442 p.
50. Moore A. E. The origin of large irregular gem-quality type II diamonds and the rarity of blue type IIb varieties // *South African Journal of Geology*. – 2014. – Vol. 117, no. 2. – Pp. 219–236.
51. Moore A. E. Type II diamonds: flamboyant megacrysts // *South African Journal of Geology*. – 2009. – Vol. 112. – Pp. 23–38.
52. Moore A. E., Helmstaedt H. Evidence for two blue (type IIb) diamond populations // *Nature*. – 2019. – Vol. 570. – E26–E27.
53. Motsamai T. Mineral inclusions in diamonds from Karowe Mine, Botswana: super-deep sources for super-sized diamonds? / T. Motsamai, J. W. Harris, T. Stachel, D. G. Pearson, J. Armstrong // *Mineralogy and Petrology*. – 2018. – Vol. 112, suppl. 1. – Pp. 169–180.

54. Nimis P., Taylor W. Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites. Pt I // Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx thermometer Contributions to Mineralogy and Petrology. – 2000. – Vol. 39, no. 5. – Pp. 541–554.
55. O'Neill H. S. C., Wall V. J. The olivine orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer, the nickel precipitation curve, and the oxygen fugacity of the Earth's upper mantle // Journal of Petrology. – 1987. – Vol. 8. – Pp. 1169–1191.
56. O'Neill H. S. C., Wood B. J. An experimental study of Fe-Mg-partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer // Contributions Mineralogy and Petrology. – 1979. – Vol. 70. – Pp. 59–70.
57. O'Reilly S. Y., Griffin W. L. A xenolith derived geotherm for southeastern Australia and its geological implications // Tectonophysics. – 1985. – Vol. 111. – Pp. 41–63.
58. Pearson D. G. Archaean Re-Os age for Siberian eclogites and constraints on Archaean tectonics / D. G. Pearson, G. A. Snyder, S. B. Shirey, L. A. Taylor, R. W. Carlson, N. V. Sobolev // Nature. – 2005. – Vol. 374. – Pp. 711–713.
59. Pearson D. G. The age of continental roots // Lithos. – 1999. – Vol. 48. – Pp. 171–194.
60. Phillips D., Harris J. W., Viljoen K. S. Mineral chemistry and thermobarometry of inclusions from De Beers Pool diamonds, Kimberley, South Africa // Lithos. – 2004. – Vol. 77, no. 2. – Pp. 155–179.
61. Pollack H. N., Chapman D. S. On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness // Tectonophysics. – 1977. – Vol. 38. – Pp. 279–296.
62. Ryan C. G., Griffin W. L., Pearson N. J. Garnet geotherms: Pressure-temperature data from Cr-pyroxene garnet xenocrysts in volcanic rocks // J. Geophys. Res. B. – 1996. – Vol. 101, no. 3. – Pp. 5611–5625.
63. Schulze D. J. A classification scheme for mantle-derived garnets in kimberlite: a tool for investigating the mantle and exploring for diamonds // Lithos. – 2003. – Vol. 71. – Pp. 195–213.
64. Shatsky V. S. Diamondiferous subcontinental lithospheric mantle of the northeastern Siberian Craton: Evidence from mineral inclusions in alluvial diamonds / V. S. Shatsky, D. A. Zedgenizov, A. L. Ragozin, V. V. Kalinina // Gondwana Research. – 2015. – Vol. 28. – Pp. 106–120.
65. Sobolev N. V. Chrome-Rich Garnets from the Kimberlites of Yakutia and Their Parageneses / N. V. Sobolev, Y. G. Lavrentev, N. P. Pokhilenko, L. V. Usova // Contributions to Mineralogy and Petrology. – 1973. – Vol. 40. – Pp. 39–52.
66. Sobolev N. V. Deep-Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle // American Geophysical Union, Washington, D.C. – 1977. – 279 p.
67. Stagno V. The oxidation state of the mantle and the extraction of carbon from Earth's interior / V. Stagno, D. O. Ojwang, C. A. McCammon, D. J. Frost // Nature. – 2013. – Vol. 493, no. 7430. – Pp. 84–88.
68. Stagno V., Frost D. J. Carbon speciation in the asthenosphere: Experimental measurements of the redox conditions at which carbonate-bearing melts coexist with graphite or diamond in peridotite assemblages // Earth and Planetary Science Letters. – 2010. – Vol. 300, no. 1, 2. – Pp. 72–84.
69. Stephens W. E., Dawson J. B. Statistical comparison between pyroxenes from kimberlites and their associated xenoliths // The Journal of Geology. – 1977. – Vol. 85, no. 4. – Pp. 433–449.
70. Taylor W. R., Kammerman M., Hamilton R. New thermometer and oxygen fugacity sensor calibrations for ilmenite and chromium spinel-bearing peridotitic assemblages // 7th International Kimberlite Conference. Extended abstracts Cape Town. – 1998. – Pp. 891–901.
71. Wyatt B. A. Compositional classification of «kimberlitic» and «non-kimberlitic» ilmenite / B. A. Wyatt, M. Baumgartner, E. Ancker, H. Grutter // Lithos. – 2004. – Vol. 77. – Pp. 819–840.
72. Zedgenizov D. Eclogitic diamonds from variable crustal protoliths in the northeastern Siberian craton: trace elements and coupled $\delta^{13}\text{C}$ – $\delta^{18}\text{O}$ signatures in diamonds and garnet inclusions / D. Zedgenizov, D. Rubatto, V. Shatsky, A. Ragozin, V. Kalinina // Chem. Geol. – 2016. – Vol. 422. – Pp. 46–59.
73. Zinchenko V. N., Ivanov A. S. Simulation of physical-geochemical parameters of crystallization of large type IIa diamonds from parasteresis of their satellite minerals // Journal of science Lyon. – 2021. – Vol. 1, no. 17. – Pp. 9–14.
74. Zinchenko V. N., Ivanov A. S., Ashchepkov I. V. Composition of the Diamond Indicator Minerals on the Mitchell Chart–Criteria of CLIPPIR Diamonds in Kimberlites and Conditions of their Mantle Crystallization // Acta Geologica Sinica. – 2021. – Vol. 95 (S1). – Pp. 121–124.

REFERENCES

1. Anastasenko G. F., Masaytis V. L. Ot trubki «Yagersfonteyn» k trubke «Zarnitsa». *Regional geology and metallogeny*, 2005, no. 26, pp. 28–33.
2. Ashchepkov I. V., Ivanov A. S., Kostrovitskiy S. I., Vavilov M. A., Babushkina S. A., Vladynin N. V., Tykhov N. S., Medvedev N. S. Mantiynye terreyiny Sibirskogo kratona: ikh vzaimodeystvie s plyumovymi rasplavami na osnovanii termobarometrii i geokhimii mantiynykh ksenokristov [Mantle terranes of the Siberian craton: their interaction with plume melts based on thermobarometry and geochemistry mantle xenocrysts]. *Geodynamics and tectonophysics*, 2019, vol. 10, no. 2, pp. 197–245.
3. Ashchepkov I. V. Programma mantiynykh termometrov i barometrov-barometrikov: ispol'zovanie dlya rekonstruktsii i kalibrovki PT-metodov [Program of the mantle thermometers and barometers: usage for reconstructions and calibration of PT methods]. *Vestnik otdeleniya nauk o Zemle RAN*, 2011, vol. 3, NZ6008.
4. Garanin V. K., Kudryavtseva G. P., Marfunin A. S., Mikhaylichenko O. A. Vklucheniya v almaze i amazonosnyye porody [Inclusions in diamond and diamond-bearing rocks]. Ed. by A. S. Marfunina. Moscow, Publishing house of Moscow State University, 1991, 239 p.
5. Gerni Dzh. Dzh., Mur R. O. Geokhimicheskaya korrelyatsiya mezhdu mineralami kimberlitov i almazami kratona Kalakhari. *Geologiya i geofizika*, 1994, pp. 12–24.
6. Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Tipomorfizm almazov Sibirskoy platformy. Moscow, Nedra-Biznestsentr, 2003, 603 p.
7. Ivanov A. S. Novyy kriteriy amazonosnosti kimberlitov. *Trudy XII Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) Fersmanovskoy sessii*. Apatity, KNTs RAN, 2015, pp. 268–270.
8. Ivanov A. S. Statisticheskiy analiz sostavov indikatornykh mineralov kimberlitov. *Trudy XIV Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiem) Nauchnoy shkoly «Matematicheskie issledovaniya v estestvennykh naukakh»*. Apatity, 2017, pp. 173–182.
9. Masaytis V. L., Morozov A. F., Petrov O. V., Erinchek Yu. M. Geolkom–VSEGEI: vklad v regional'noe prognozirovaniye, poiski i otkrytie mestorozhdeniy almazov. Effektivnost' prognozirovaniya i poiskov mestorozhdeniy almazov: proshloe, nastoyashchee i budushchee (Almazy-50) [Geolkom–VSEGEI: contribution to regional forecasting, prospecting and discovery of diamond deposits. In The effectiveness of forecasting and prospecting for diamond deposits: past, present and future (Diamonds-50)]. St. Petersburg, 2004, pp. 9–18.
10. Matheron J. Osnovy prikladnoy geostatistiki [Fundamentals of applied geostatistics]. Moscow, Mir, 1968, 408 p.
11. Orlov Yu. L. Mineralogiya almaza. 2-e izd. Moscow, Nauka, 1984, 264 p.
12. Sarsadskikh N. N., Popugaeva L. A. Novye dannye ob ul'traosnovnom magmatizme na Sibirskoy platforme. *Razvedka i okhrana nedr*, 1955, no. 5, pp. 11–20.

13. Sobolev V. S. Osnovnye itogi nauchno-issledovatel'skikh rabot i zadachi v oblasti prognozirovaniya almaznykh mestorozhdeniy [The main results of scientific research and tasks in the field of forecasting diamond deposits]. *Geology and geophysics*, 1980, vol. 12, pp. 3–11.
14. Sobolev N. V. O mineralogicheskikh kriteriyakh almazonosnosti kimberlitov. *Geology and geophysics*, 1971, no. 3, pp. 70–80.
15. Sobolev N. V., Sobolev A. V., Tomilenko A. A., Kuz'min D. V., Grakhanov S. A., Batanova V. G., Logvinova A. M., Bul'bak T. A., Kostrovitskiy S. I., Yakovlev D. A., Fedorova E. N., Anastasenko G. F., Nikolenko E. I., Tolstov A. V., Reutskiy V. N. Perspektivy poiskov almazonosnykh kimberlitov v severo-vostochnoy chasti Sibirskoy platformy. *Geology and geophysics*, 2018, vol. 59, no. 10, pp. 1701–1719.
16. Sobolev N. V., Logvinova A. M., Efimova E. S. Vkluycheniya eklogitovykh granatov, obogashchennykh margantsem, v almazakh: svidetel'stvo retsiklirovaniya zemnoy kory. *Dokl. RAN*, 2013, vol. 453, no. 3, pp. 326–328.
17. Yuzmukhametov R. N. Vklad geologov NIIGA v otkrytie yakutskikh almazov [Contribution of NIIGA geologists to the discovery of Yakut diamonds]. *Natural resources of the Arctic and Subarctic*, 2005, no. 4, pp. 11–14.
18. Ashchepkov I., Medvedev N., Ivanov A., Vladyskin N., Ntaflou T., Downes H., Saprykin A., Tolstov A., Vavilov M., Shmarov G. Deep mantle roots of the Zarnitsa kimberlite pipe, Siberian craton, Russia: Evidence for multistage polybaric interaction with mantle melts. *Journal of Asian Earth Sciences*, 2021, vol. 213, pp. 104756.
19. Ashchepkov I. V., Alymova N. V., Logvinova A. M., Vladyskin N. V., Kuligin S. S., Mityukhin S. I., Downes H., Stegnitsky Y. B., Prokoviev S. A., Salikhov R. F., Palessky S. V., Khmelnikova O. S. Picrolilmenites in Yakutian kimberlites: Variations and genetic models. *Solid Earth*, 2014, vol. 5, iss. 2, pp. 915–938.
20. Ashchepkov I. V., Logvinova A. M., Ntaflou T., Vladyskin N. V., Downes H. Alakit and Daldyn kimberlite fields, Siberia, Russia: Two types of mantle sub-terrane beneath central Yakutia? *Geoscience Frontiers*, 2017, vol. 8, pp. 671–692.
21. Ashchepkov I. V., Rotman A. Y., Somov S. V., Afanasiev V. P., Downes H., Logvinova A. M., Nossyko S., Shimpi J., Palessky S. V., Khmelnikova O. S., Vladyskin N. V. Composition and thermal structure of the lithospheric mantle beneath kimberlite pipes from the Catoca cluster, Angola. *Tectonophysics*, 2012, vol. 530, 531, pp. 128–151.
22. Ashchepkov I. V., Ntaflou T., Kuligin S. S., Malygina E. V., Agashev A. M., Logvinova A. M., Mityukhin S. I., Alymova N. V., Vladyskin N. V., Palessky S. V., Khmelnikova O. S. Deep-Seated Xenoliths from the Brown Breccia of the Udachnaya Pipe, Siberia. D. In: G. Pearson et al. (eds.). Proceedings of 10th International Kimberlite Conference. New Delhi, Springer India, 2013, vol. 1, pp. 59–74.
23. Ashchepkov I. V., Logvinova A. M., Spetsius Z. V., Downes H., Ntaflou T., Ivanov A. S., Zinchenko V. N., Kostrovitsky S. I., Ovchinnikov Y. I. Eclogite varieties and their positions in the cratonic mantle lithosphere beneath Siberian craton and Archean cratons worldwide. *Minerals*, 2022, vol. 12, no. 11, pp. 1353.
24. Ashchepkov I. V., Ntaflou T., Spetsius Z. V., Salikhov R. F., Downes H. Interaction between protokimberlite melts and mantle lithosphere: Evidence from mantle xenoliths from the Dalnyaya kimberlite pipe, Yakutia (Russia). *Geoscience Frontiers*, 2017, vol. 8, iss. 4, pp. 693–710.
25. Ashchepkov I. V., Ntaflou T., Logvinova A. M., Spetsius Z. V., Vladyskin N. V. Monomineral universal clinopyroxene and garnet barometers for peridotitic, eclogitic and basaltic systems. *Geoscience Frontiers*, 2017, vol. 8, no. 4, pp. 775–795.
26. Ashchepkov I. V., Vladyskin N. V., Ivanov A., Babushkina S., Vavilov M., Medvedev N. Problems of Mantle Structure and Compositions of Various Terranes of Siberian Craton. In: Vladyskin N. (eds.) Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis. Springer Proceedings Earth Environmental Sciences. Springer, Cham., 2021, pp. 15–48.
27. Ashchepkov I. V., Vladyskin N. V., Ntaflou T., Downes H., Mitchell R., Smelov A. P., Alymova N. V., Kostrovitsky S. I., Rotman A. Ya., Smarov G. P., Makovchuk I. V., Stegnitsky Yu. B., Nigmatulina E. N., Khmelnikova O. S. Regularities and mechanism of formation of the mantle lithosphere structure beneath the Siberian Craton in comparison with other cratons. *Gondwana Research*, 2013, vol. 23, no. 1, pp. 4–24.
28. Ashchepkov I. V., Pokhilenko N. P., Vladyskin N. V., Logvinova A. M., Kostrovitsky S. I., Afanasiev V. P., Pokhilenko L. N., Kuligin S. S., Malygina L. V., Alymova N. V., Khmelnikova O. S., Palessky S. V., Nikolaeva I. V., Karpenko M. A., Stagnitsky Y. B. Structure and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian craton, thermobarometric study. *Tectonophysics*, 2010, vol. 485, pp. 17–41.
29. Ashchepkov I. V., Logvinova A. M., Spetsius Z. V., Downes H. Thermobarometry of diamond inclusions: Mantle structure and evolution beneath Archean cratons and mobile belts worldwide. *Geosystems and Geoenvironment*, 2022, vol. 2, no. 2, pp. 100156.
30. Ashchepkov I. V., Ntaflou N., Medvedev N. S., Shmarov G. P. Trace element geochemistry of mantle xenoliths from Zarnitsa kimberlite pipe, Daldyn field, Yakutia: Complex history of melts interactions with lithospheric mantle. *Geosystems and Geoenvironment*, 2024, pp. 100313.
31. Ballhaus C., Berry R. F., Green D. H. High pressure experimental calibration of the olivine-orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer: implications for the oxidation state of the upper mantle. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1991, vol. 107, pp. 27–40.
32. Brey G. P., Köhler T. Geothermobarometry in four-phase lherzolites II. New thermobarometers, and practical assessment of existing thermobarometers. *Journal of Petrology*, 1990, vol. 31, no. 6, pp. 1353–1378.
33. Chinn I. Deciphering the history of CLIPPIR diamonds from their morphology and surface features. *International Kimberlite Conference*, 2024, vol. 12.
34. Davies R. M., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., McCandless T. E. Inclusions in diamonds from the K14 and K10 kimberlites, Buffalo Hills, Alberta, Canada: diamond growth in a plume? *Lithos*, 2004, vol. 77, no. 2, pp. 99–111.
35. Davies R. M., Griffin W. L., O'Reilly S. Y., Doyle B. J. Mineral inclusions and geochemical characteristics of microdiamonds from the DO27, A154, A21, A418, DO18, DD17 and Ranch Lake kimberlites at Lac de Gras, Slave Craton, Canada. Special Issue: Selected papers from the 8th IKC, Victoria, BC, Canada, 22–27 June 2003, 2004, vol. 2, pp. 39–55.
36. Dawson J. B., Stephens W. E. Statistical classification of garnets from kimberlites and xenoliths. *Journal of Geology*, 1975, vol. 83, no. 5, pp. 589–607.
37. Day H. W. A revised diamond-graphite transition curve. *American Mineralogist*, 2012, vol. 97, pp. 52–62.
38. Griffin W. L., Ryan C. G. Trace elements in indicator minerals: Area selection and target evaluation in diamond exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, vol. 53, pp. 311–337.
39. Gudmundsson G., Wood B. J. Experimental tests of garnet peridotite oxygen barometry. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1995, vol. 119, pp. 56–67.
40. Gurney J. J., Zweistra P. The interpretation of the major element compositions of mantle minerals in diamond exploration. *Journal of Geochemical Exploration*, 1995, no. 53, pp. 293–309.
41. Jenkins D. M., Newton R. C. Experimental determination of the spinel peridotite to garnet peridotite inversion at 900 °C and 1,000 °C in the system CaO–MgO–Al₂O₃–SiO₂, and at 900 °C with natural garnet and olivine. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1979, vol. 68, pp. 407–419.
42. Kennedy C. S., Kennedy G. C. The equilibrium boundary between graphite and diamond. *J. Geophys. Res.*, 1976, vol. 81, pp. 2467–2470.

43. Krogh E. J. The garnet-clinopyroxene Fe-Mg geothermometer – a reinterpretation of existing experimental data. *Contrib. Mineral. Petrol.*, 1988, vol. 99, pp. 44–48.
44. Lavrent'ev Y. G., Korolyuk V., Usova L., Nigmatulina E. Electron probe microanalysis of rock-forming minerals with a JXA-8100 electron probe microanalyzer. *Russian Geology and Geophysics*, 2015, vol. 56, pp. 1428–1436.
45. Lepekhina E. N., Rotman A. Y., Antonov A. V., Sergeev S. A. SHRIMP U-Pb zircon ages of Yakutian kimberlite pipes. 9th IKC Extended Abstracts. Frankfurt, 2008, no. 9.
46. McCammon C. A., Griffin W. L., Shee S. R., O'Neill H. S. Oxidation during metasomatism in ultramafic xenoliths from the Wesselton kimberlite, South Africa: implications for the survival of diamond. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2001, vol. 141, no. 3, pp. 287.
47. McGregor I. D. The system $MgO-SiO_2-Al_2O_3$: solubility of Al_2O_3 in enstatite for spinel and garnet peridotite compositions. *American Mineralogy*, 1974, vol. 59, pp. 110–119.
48. Mikhailenko D. S., Aulbach S., Korsakov A. V., Golovin A. V., Malygina E. V., Gerdes A., Stepanov A. S., Xu Y. G. Origin of graphite–diamond-bearing eclogites from Udachnaya kimberlite pipe. *Journal of Petrology*, 2021, vol. 62, no. 8, egab033.
49. Mitchell R. H. Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. New York, Plenum Press, 1986, 442 p.
50. Moore A. E. The origin of large irregular gem-quality type II diamonds and the rarity of blue type IIb varieties. *South African Journal of Geology*, 2014, vol. 117, no. 2, pp. 219–236.
51. Moore A. E. Type II diamonds: flamboyant megacrysts. *South African Journal of Geology*, 2009, vol. 112, pp. 23–38.
52. Moore A. E., Helmstaedt H. Evidence for two blue (type IIb) diamond populations. *Nature*, 2019, vol. 570, E26–E27.
53. Motsamai T., Harris J. W., Stachel T., Pearson D. G., Armstrong J. Mineral inclusions in diamonds from Karowe Mine, Botswana: super-deep sources for super-sized diamonds? *Mineralogy and Petrology*, 2018, vol. 112, suppl. 1, pp. 169–180.
54. Nimis P., Taylor W. Single clinopyroxene thermobarometry for southeast Australia and its geological implications. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 2000, vol. 39, no. 5, pp. 541–554.
55. O'Neill H. S. C., Wall V. J. The olivine orthopyroxene-spinel oxygen geobarometer, the nickel precipitation curve, and the oxygen fugacity of the Earth's upper mantle. *Journal of Petrology*, 1987, vol. 8, pp. 1169–1191.
56. O'Neill H. S. C., Wood B. J. An experimental study of Fe-Mg-partitioning between garnet and olivine and its calibration as a geothermometer. *Contributions Mineralogy and Petrology*, 1979, vol. 70, pp. 59–70.
57. O'Reilly S. Y., Griffin W. L. A xenolith derived geotherm for southeastern Australia and its geological implications. *Tectonophysics*, 1985, vol. 111, pp. 41–63.
58. Pearson D. G., Snyder G. A., Shirey S. B., Taylor L. A., Carlson R. W., Sobolev N. V. Archaean Re-Os age for Siberian eclogites and constraints on Archaean tectonics. *Nature*, 2005, vol. 374, pp. 711–713.
59. Pearson D. G. The age of continental roots. *Lithos*, 1999, vol. 48, pp. 171–194.
60. Phillips D., Harris J. W., Viljoen K. S. Mineral chemistry and thermobarometry of inclusions from De Beers Pool diamonds, Kimberley, South Africa. *Lithos*, 2004, vol. 77, no. 2, pp. 155–179.
61. Pollack H. N., Chapman D. S. On the regional variation of heat flow, geotherms, and lithospheric thickness. *Tectonophysics*, 1977, vol. 38, pp. 279–296.
62. Ryan C. G., Griffin W. L., Pearson N. J. Garnet geotherms: Pressure-temperature data from Cr-pyroxene garnet xenocrysts in volcanic rocks. *J. Geophys. Res. B.*, 1996, vol. 101, no. 3, pp. 5611–5625.
63. Schulze D. J. A classification scheme for mantle-derived garnets in kimberlite: a tool for investigating the mantle and exploring for diamonds. *Lithos*, 2003, vol. 71, pp. 195–213.
64. Shatsky V. S., Zedgenizov D. A., Ragozin A. L., Kalinina V. V. Diamondiferous subcontinental lithospheric mantle of the northeastern Siberian Craton: Evidence from mineral inclusions in alluvial diamonds. *Gondwana Research*, 2015, vol. 28, pp. 106–120.
65. Sobolev N. V., Lavrentev Y. G., Pokhilenko N. P., Usova L. V. Chrome-Rich Garnets from the Kimberlites of Yakutia and Their Parageneses. *Contributions to Mineralogy and Petrology*, 1973, vol. 40, pp. 39–52.
66. Sobolev N. V. Deep-Seated Inclusions in Kimberlites and the Problem of the Composition of the Upper Mantle. *American Geophysical Union, Washington, D.C.*, 1977, 279 p.
67. Stagno V., Ojwang D. O., McCammon C. A., Frost D. J. The oxidation state of the mantle and the extraction of carbon from Earth's interior. *Nature*, 2013, vol. 493, no. 7430, pp. 84–88.
68. Stagno V., Frost D. J. Carbon speciation in the asthenosphere: Experimental measurements of the redox conditions at which carbonate-bearing melts coexist with graphite or diamond in peridotite assemblages. *Earth and Planetary Science Letters*, 2010, vol. 300, no. 1, 2, pp. 72–84.
69. Stephens W. E., Dawson J. B. Statistical comparison between pyroxenes from kimberlites and their associated xenoliths. *The Journal of Geology*, 1977, vol. 85, no. 4, pp. 433–449.
70. Taylor W. R., Kammerman M., Hamilton R. New thermometer and oxygen fugacity sensor calibrations for ilmenite and chromium spinel-bearing peridotitic assemblages. 7th International Kimberlite Conference. Extended abstracts Cape Town, 1998, pp. 891–901.
71. Wyatt B. A., Baumgartner M., Ancker E., Grutter H. Compositional classification of «kimberlitic» and «non-kimberlitic» ilmenite. *Lithos*, 2004, vol. 77, pp. 819–840.
72. Zedgenizov D., Rubatto D., Shatsky V., Ragozin A., Kalinina V. Eclogitic diamonds from variable crustal protoliths in the northeastern Siberian craton: trace elements and coupled $\delta^{13}C$ – $\delta^{18}O$ signatures in diamonds and garnet inclusions. D. Zedgenizov. *Chem. Geol.*, 2016, vol. 422, pp. 46–59.
73. Zinchenko V. N., Ivanov A. S. Simulation of physical-geochemical parameters of crystallization of large type IIa diamonds from parasteresis of their satellite minerals. *Journal of science Lyon*, 2021, vol. 1, no. 17, pp. 9–14.
74. Zinchenko V. N., Ivanov A. S., Ashchepkov I. V. Composition of the Diamond Indicator Minerals on the Mitchell Chart–Criteria of CLIPPIR Diamonds in Kimberlites and Conditions of their Mantle Crystallization. *Acta Geologica Sinica*, 2021, vol. 95 (S1), pp. 121–124.

Зинченко Владимир Николаевич – канд. геол.-минерал. наук, ГПО «Катока»¹. <vladimir.zin@mail.ru>

Иванов Александр Сергеевич – канд. геол.-минерал. наук, вед. науч. сотрудник, СПГУ². <Ivanov_AS6@pers.spmi.ru>

Ащепков Игорь Викторович – канд. геол.-минерал. наук, ст. науч. сотрудник, ИГМ СО РАН³, ГИН СО РАН⁴. <igora57@mail.ru>

Zinchenko Vladimir Nikolaevich – PhD (Geology and Mineralogy), Catoca¹. <vladimir.zin@mail.ru>

Ivanov Aleksandr Sergeevich – PhD (Geology and Mineralogy), Leading Researcher, SPMU². <Ivanov_AS6@pers.spmi.ru>

Ashchepkov Igor Viktorovich – PhD (Geology and Mineralogy), Senior Researcher, IGM SB RAS³, GIN SB RAS⁴.
<igora57@mail.ru>

¹ Горнорудное общество «Катока» (ГПО «Катока»). Талатона, Луанда, Ангола.

Catoca Mining Society (Catoca), Talatona, Luanda, Angola.

² Санкт-Петербургский горный университет императрицы Екатерины II (СПГУ). 21-я линия, 2, Санкт-Петербург, Россия, 199106.

Empress Catherine II Saint Petersburg Mining University (SPMU). 2 21 liniya, St. Petersburg, Russia, 199106.

³ Институт геологии и минералогии им. В. С. Соболева Сибирского отделения Российской академии наук (ИГМ СО РАН). Пр. Академика Коптюга, 3, Новосибирск, Россия, 630090.

V. S. Sobolev Institute of Geology and Mineralogy Siberian Branch Russian Academy of Sciences (IGM SB RAS). 3 Pr. Akademika Koptuyuga, Novosibirsk, Russia, 630090.

⁴ Геологический институт Сибирского отделения Российской академии наук (ГИН СО РАН). Ул. Сахьяновой, 6а, Улан-Удэ, Россия, 670047.

Geological Institute of Siberian Branch of Russian Academy of Sciences (GIN SB RAS). 6a Ul. Sakhyanovoy, Ulan-Ude, Russia, 670047.