

**ПАРАГЕНЕЗИС И СЛОЖНАЯ ЗОНАЛЬНОСТЬ ВКРАПЛЕННИКОВ ОЛИВИНА  
ИЗ НЕИЗМЕНЕННОГО КИМБЕРЛИТА ТРУБКИ УДАЧНАЯ-ВОСТОЧНАЯ (Якутия):  
СВЯЗЬ С УСЛОВИЯМИ ОБРАЗОВАНИЯ И ЭВОЛЮЦИЕЙ КИМБЕРЛИТА**

**Н.В. Соболев<sup>1,3</sup>, А.В. Соболев<sup>2,4</sup>, А.А. Томиленко<sup>1</sup>, С.В. Ковязин<sup>1</sup>, В.Г. Батанова<sup>2,4</sup>, Д.В. Кузьмин<sup>1,3</sup>**

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

<sup>2</sup> *Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия*

<sup>3</sup> *Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия*

<sup>4</sup> *Univ. Grenoble Alpes, ISTERRE, F-3804-1 Grenoble, France*

Неизменный магнезиальный оливин (Fo<sub>85-94</sub>) является основным минералом блока кимберлита трубки Удачная-Восточная, практически не содержащим серпентина. Он преобладает в ксенолитах перидотитов, а также в качестве включений в алмазах. В кимберлите указанной трубки, так же как и в серии гипабиссальных кимберлитов других регионов земного шара, выделяются два главных типа вкрапленников оливина в соответствии с размерами и морфологией: ксенокристаллы (макрокристаллы) округлой или неправильной формы — оливин I и идиоморфные вкрапленники — оливин II, размеры которых не превышают, как правило, 0.5 мм и очень редко достигают 1 мм. Объектом настоящего исследования явились несколько тысяч образцов оливина из вкрапленников, относимых как к оливину I, так и к оливину II с постепенными переходами между ними. Особое внимание уделялось поискам минеральных включений в оливине и поискам вкрапленников с четко выраженной зональностью. В центральных однородных по составу зонах серии вкрапленников выявлены включения ортопироксена, а также клинопироксена (хромдиопсида и хромомфациита) с широкими вариациями содержаний примесей Na<sub>2</sub>O и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, существенно превышающих ранее установленные и достигающих 6.00 мас. % Na<sub>2</sub>O и 4.23 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Убедительным свидетельством высокобарической природы центральных зон вкрапленников оливина является выявление в шести образцах включений пирропа, содержащего от 1.41 до 9.14 мас. % Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и от 4.64 до 6.61 мас. % CaO и характеризующегося высокой магнезиальностью с Mg# 75.6—83.7, что, несомненно, доказывает высокобарический лерцолитовый парагенезис вкрапленников. Составы центральных зон изученных вкрапленников оливина полностью совпадают по содержанию примесей Ni, Co, Ca, Cr и Mn с составами оливинов из алмазов и ксенолитов перидотитов. Однако значимые отличия наблюдаются в устойчивом повышенном содержании примеси Ti, составляющем 100—300 г/т для абсолютного большинства вкрапленников, включая и те, которые содержат включения пироксена и пирропа.

*Кимберлит, оливин, клинопироксен, пироп, элементы примеси, парагенезис, алмаз.*

**PARAGENESIS AND COMPLEX ZONING OF OLIVINE MACROCRYSTS FROM UNALTERED  
KIMBERLITE OF THE UDACHNAYA-EAST PIPE (Yakutia): RELATIONSHIP WITH  
THE KIMBERLITE FORMATION CONDITIONS AND EVOLUTION**

**N.V. Sobolev, A.V. Sobolev, A.A. Tomilenko, S.V. Kovyazin, V.G. Batanova, and D.V. Kuz'min**

Unaltered Mg-olivine (Fo<sub>85-94</sub>) is a predominant mineral of the kimberlite block (serpentine-free) of the Udachnaya-East pipe, and it prevails in peridotite xenoliths and as inclusions in diamonds. The kimberlite of this pipe, like a series of hypabyssal kimberlites in other regions, contains two main types of olivine macrocrysts according to their size and morphology: those rounded or irregularly shaped (olivine I) and euhedral phenocrysts (olivine II), which are usually no larger than 0.5 mm and very seldom reach 1 mm in size. This study was focused on several thousand olivine samples assigned both to olivines I and to olivines II, with a gradual transition between them. Particular attention was paid to the search for mineral inclusions in olivine and for phenocrysts with a clear zoning. In the phenocryst cores of homogeneous composition, we have revealed orthopyroxene inclusions as well as clinopyroxene (chrome-diopside and chrome-omphacite) inclusions with wide variations in the Na<sub>2</sub>O and Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents, significantly higher than the previously established ones: up to 6.00 wt.% Na<sub>2</sub>O and 4.23 wt.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. Convincing evidence for the high-pressure origin of the olivine macrocryst cores is the presence of pyrope inclusions with 1.41–9.14 wt.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 4.64–6.61 wt.% CaO, and Mg# = 75.6–83.7 in six samples, which testifies to the high-pressure lherzolite paragenesis of the phenocrysts cores. The cores of the studied olivine phenocrysts are identical in the contents of Ni, Co, Ca, Cr, and Mn to olivines from diamonds and peridotite xenoliths. However, they differ significantly in the steady elevated Ti content, equal to 100–300 ppm for the majority of the phenocrysts, including those containing pyroxene and pyrope inclusions.

*Kimberlite, olivine, clinopyroxene, pyrope, trace elements, paragenesis, diamond*

## ВВЕДЕНИЕ

Магнезиальный оливин ( $Fo [100Mg/(Mg + Fe)]$  от 85 до 94) является наиболее типичным минералом кимберлитов, присутствующим в них в виде изолированных вкрапленников различных размеров, а также в качестве наиболее распространенного минерального включения в алмазах [Ефимова, Соболев, 1977; Hervig et al., 1980; Meyer, 1987; Соболев и др., 1997, 2000; Armstrong et al., 2004; Sobolev et al., 2004, 2008, 2009; Stachel, Harris, 2008, 2009; Brett et al., 2009; Arndt et al., 2010; De Hoog et al., 2010; Moss et al., 2010; Moore, 2012; Bernstein et al., 2013; Shirey et al., 2013]. Он также является главным породообразующим минералом ксенолитов шпинелевых и пироповых перидотитов. В процессе сложной эволюции кимберлита, оливин, как продемонстрировано экспериментальными исследованиями [Чепуров и др., 2013], является наиболее устойчивым минералом. Среди вкрапленников выделяются два типа в соответствии с размерами и морфологией: ксенокристаллы (макрокристаллы) округлой или неправильной формы — оливин I и идиоморфные вкрапленники — оливин II, размеры которых не превышают, как правило, 0.5 мм и очень редко достигают 1 мм [Kamenetsky et al., 2008, 2009a,b,c; Brett et al., 2009; Arndt et al., 2010]. Для обоих типов вкрапленников, характеризующихся переходами, различаются доминирующая центральная часть неправильной формы и узкая внешняя кайма (~ 50 мкм) сплошная для оливина II и прерывистая для оливина I, имеющая практически постоянный состав с  $Fo_{89-90}$ , который, однако, может меняться для различных кимберлитов, как показано для кимберлитов Канады и Гренландии [Kamenetsky et al., 2009a]. Однородные центральные зоны различаются по составу в разных вкрапленниках. Между узкой внешней каймой и однородной центральной зоной вкрапленников, как правило, фиксируются несколько зон, часто очень узких шириной менее 5 мкм [Kamenetsky et al., 2008], характеризующихся переменным составом.

В абсолютном большинстве кимберлитовых трубок различных регионов земного шара оливин полностью или почти полностью изменен и замещен серпентином, и только в редких проявлениях гипабиссальных кимберлитов [Mitchell, 2008] неизменный оливин доступен для исследований содержания главных и примесных элементов. Одним из таких проявлений гипабиссального кимберлита является уникальный, совершенно неизменный блок в тр. Удачная-Восточная, в отдельных участках не содержащий серпентина [Kamenetsky et al., 2004, 2008, 2009].

Природа вкрапленников оливина в кимберлитах является одной из главных проблем, связанных непосредственно с происхождением самих кимберлитов. В результате изучения неизменных оливинов в различных гипабиссальных кимберлитах, мнения о происхождении вкрапленников существенно различаются. Так, для оливинов канадских кимберлитов первоначальным заключением было родственное кимберлитам происхождение всех вкрапленников оливина [Mitchell, 1973, 1986], позднее был сделан вывод о ксеногенном характере почти всех вкрапленников, за исключением 5 % фенокристаллов [Brett et al., 2009]. Для вкрапленников кимберлитов тр. Удачная-Восточная признаются множественные источники, включая родственные по отношению к самому кимберлиту [Kamenetsky et al., 2008]. Таким образом, налицо существенные расхождения в интерпретации происхождения оливина кимберлитов, которые только усиливаются при более детальном изучении неизменных оливинов. Если для центральных ксеноморфных и однородных областей оливина из кимберлитов различных регионов предполагается происхождение за счет мантийных дунитов [Arndt et al., 2010] либо перидотитов [Brett et al., 2009; Kamenetsky et al., 2008; и др.], то внешние зоны большинство исследователей относят к продуктам кристаллизации самих кимберлитов.

Несмотря на простой химический состав в отношении содержания главных элементов (Si, Mg, Fe), оливины, связанные с кимберлитами, характеризуются наличием целой серии примесных элементов, фиксируемых в количествах от 10 до 4000 г/т, концентрация которых зависит от влияния давления, температуры и состава расплава, что позволяет выявить различие между оливинами вулканического и мантийного (высокобарического) происхождения. Первое сопоставление особенностей состава таких оливинов было выполнено в работе [Simkin, Smith, 1970]. Первые успешные попытки определения содержания Ti, Al, Cr, Ca, Mn, Zn, Ni, Co, Na были предприняты сравнительно давно с помощью ионного зонда [Hervig et al., 1980]. Однако в настоящее время специальные исследования позволили не только существенно упростить и ускорить определение примесей в оливине методом рентгеноспектрального микроанализа с электронным зондом (EPMA) [Sobolev et al., 2005, 2007, 2013], но и повысить надежность и локальность определений.

Из приведенной выше серии примесных элементов одним из самых информативных оказался титан. Несмотря на экспериментально доказанную независимость примеси Ti от давления и его возможное максимальное содержание в оливине, не превышающее 700 г/т [Hermann et al., 2005], оказалось, что при содержании Ti в пределах 20—400 г/т можно четко различить оливины из меймечитов [Соболев и др., 2009a], ксенолитов глубинных перидотитов и алмазов [Sobolev et al., 2008, 2009]. Показано, что замещение титаном клиногумитоподобных дефектов в оливине, связано с присутствием в нем воды [Betty et al., 2007], наибольшее ее количество в оливине как номинально безводном минерале зафиксировано

во вкрапленниках оливина в кимберлите и приближается к 600 г/т [Hilchie et al., 2014]. Совершенно очевидно, что установленный парагенезис флогопита с оливином в виде включений в алмазах [Соболев и др., 2009б] также может влиять на распределение примеси воды между этими минералами. Недавний обзор содержания воды в номинально безводных глубинных минералах [Рагозин и др., 2014] подвел итог серии работ последних лет в этом направлении, а новейшие экспериментальные исследования плавления кимберлитов при высоких *PT* параметрах [Sokol et al., 2013; Пальянов и др., 2015] в сочетании с новыми результатами по составу и сложной зональности оливина из кимберлита могут способствовать лучше пониманию параметров эволюции и внедрения кимберлитов.

Несмотря на отдельные находки включений клино- и ортопироксена во вкрапленниках оливина в кимберлите тр. Удачная предыдущими исследователями [Sobolev et al., 1989; Kamenetsky et al., 2008, 2009b], полный парагенезис оливина нельзя считать установленным.

В задачу настоящей работы входили как систематические поиски минеральных включений в однородных центральных зонах вкрапленников оливина, так и попытка выявления сложной зональности вкрапленников, признаки которой обнаружены ранее [Kamenetsky et al., 2008]. Нами была также поставлена специальная задача систематических поисков вкрапленников, имеющих минимальную площадь центральной части и максимальную площадь периферийной области с целью оценки изменения состава оливина в процессе его регенерации и эволюции кимберлита вплоть до его внедрения. Поиски включений, в частности хромшпинелидов, во внешних зонах регенерированных оливинов могут дать ответ об эволюции температурного режима внедрения кимберлитов [Wan et al., 2008].

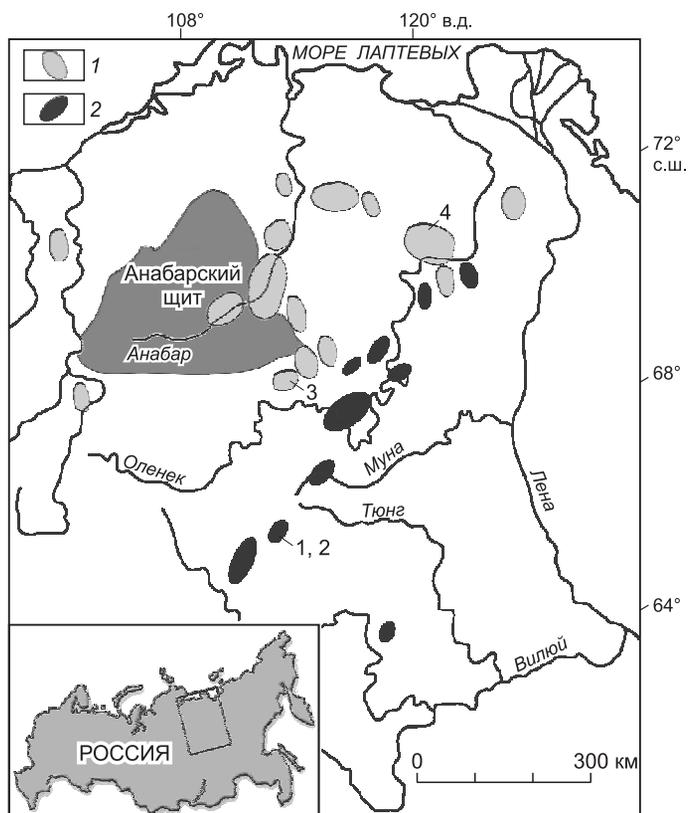
## ОБРАЗЦЫ

**Кимберлитовая тр. Удачная**, представляющая собой одно из главных месторождений алмазов Якутии, расположена в районе Северного полярного круга, в северо-восточной части Далдынского кимберлитового поля (рис. 1). Наряду с другими разрабатываемыми месторождениями алмазов, такими как трубки Мир, Интернациональная, Юбилейная, Комсомольская, Сытыканская, Нюрбинская и Ботуобинская, она приурочена к верхнедевонскому этапу кимберлитового магматизма (364—344 млн лет) в соответствии с изотопными датированиями [Дэвис и др., 1980; Кинни и др., 1997; Агашев и др., 2004] и геологической информацией [Киселев и др., 2014]. Находка серии особо глубинных минералов в алмазах тр. Удачная, в частности ферропериклаза [Зедгенизов и др., 2001], а также майджоритовых гранатов в алмазах соседних кимберлитов [Sobolev et al., 2004] позволяет предположить особо глубокий характер кимберлита этой трубки.

В качестве одного из ключевых геологических объектов в районе тр. Удачная уже давно рассматривается тр. Загадочная, характеризующаяся уникальным набором глубинных ксенолитов, но не содержащая алмазов [Соболев, 1974]. Детальные минералого-геохимические исследования этой трубки в сопоставлении с тр. Удачная [Nimis et al., 2009; Zibera et al., 2013] подтвердили предположение, основанное на изучении пиропов этой трубки и минералогии ксенолитов гроспидитов [Соболев, 1974] о значительно меньшей глубинности извлечения материала литосферы, не достигающей области устойчивости алмаза.

**Рис. 1. Схема расположения мезозойских (1) и палеозойских (2) кимберлитовых полей в пределах Сибирской платформы, по [Соболев и др., 2013] с изменениями.**

1—4 — показано приблизительное положение кимберлитовых трубок Удачная (1), Загадочная (2) в пределах Далдынского кимберлитового поля, Малокуонапская (3) в пределах Куранахского кимберлитового поля и Обнаженная (4) в пределах Куойкского кимберлитового поля. На врезке — район исследований.



Наряду с упомянутыми кимберлитовыми трубками, высокоалмазоносной тр. Удачная и тр. Загадочная, тщательное опробование которой не принесло находок алмазов, на схеме расположения главных кимберлитовых полей Якутии (палеозойских (девонских) и мезозойских (см. рис. 1)) показано приближительное положение триасовой алмазоносной тр. Малокуонапская с содержанием алмазов, приближающимся к промышленному [Харькив и др., 1998] и тр. Обнаженная юрского возраста [Дэвис и др., 1980], не содержащей алмазов. В Куойкском кимберлитовом поле юрского возраста имеется целый ряд кимберлитовых трубок, содержащих неизменный оливин, включая трубки Русловая, Второгодница, Оливиновая.

## ПОДГОТОВКА ОБРАЗЦОВ

Суммарная оценка содержания оливина в наиболее свежем неизменном блоке порядка 45—60 об. % [Kamenetsky et al., 2008] делает возможным систематический отбор и комплексное изучение вкрапленников различных размеров и морфологии.

Тщательный систематический отбор образцов неизменного кимберлита непосредственно в карьере тр. Удачная позволил сосредоточить внимание на «ультрасвежих» образцах с наиболее высоким содержанием оливина. Образцы свежего кимберлита из тр. Удачная-Восточная распиливали на тонкие пластинки (толщиной около 5—7 мм), далее вручную разламывали их на мельчайшие фрагменты и помещали в 10%-ный раствор соляной кислоты до полного растворения карбонатов матрицы. То вещество, которое оставалось после полного растворения карбонатов, тщательно промывали в дистиллированной воде в ультразвуковой ванне и сушили при температуре 105 °С. В дальнейшем под микроскопом отбирали кристаллы оливина и монтировали их в шашки, при этом для каждой отдельной шашки подбирали партии кристаллов, близких по размеру. Далее все оливины из одной шашки сошлифовывали вручную примерно до середины кристалла и тщательно полировали. Детальные исследования приготовленных препаратов проводили с помощью оптической и сканирующей электронной микроскопии и рентгеноспектрального микрозондового анализа. С целью поисков минеральных включений просмотрены тысячи пришлифованных зерен. Особое внимание при подготовке образцов уделялось поискам оливинов, характеризующихся сложной зональностью с отбором материала на основании предварительного анализа изображений в обратнорассеянных электронах.

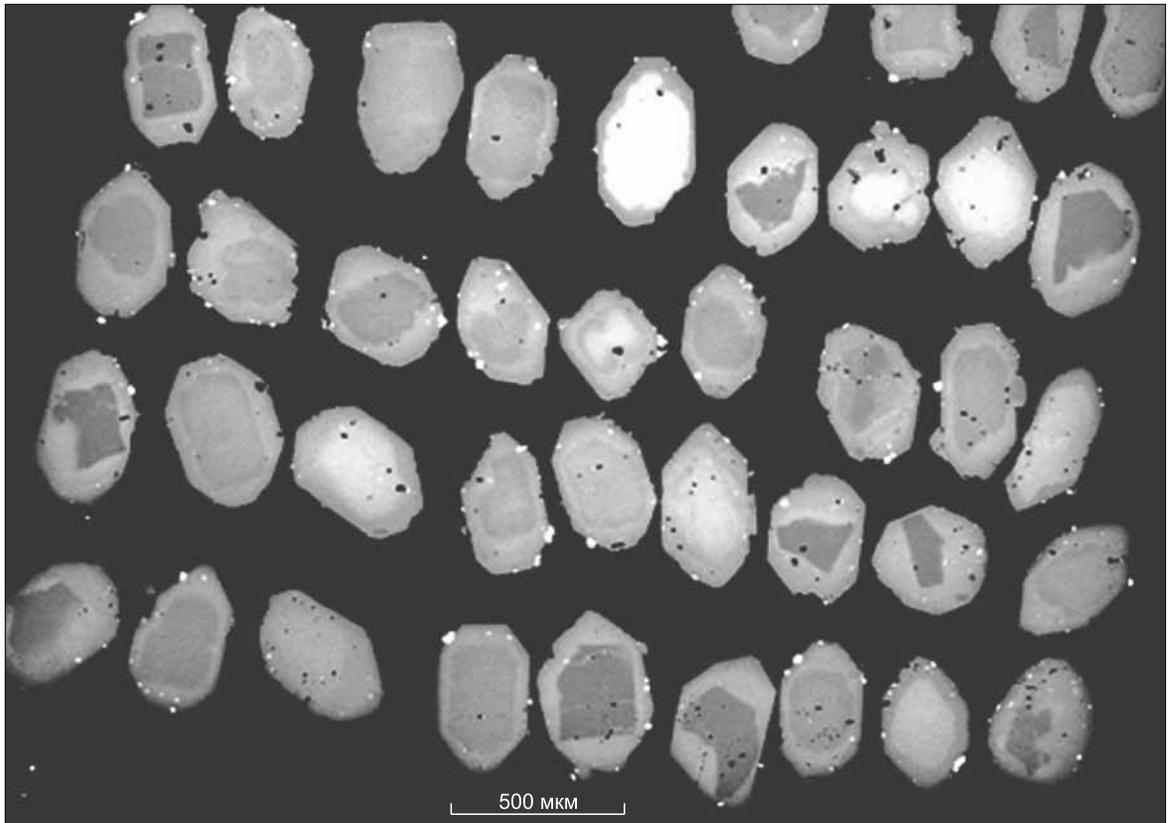
## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ГЛАВНЫХ И ПРИМЕСНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОЛИВИНЕ

Главные и примесные элементы определялись методом рентгеновского микроанализа с электронным зондом (EPMA) на электронном микроанализаторе Jeol 8200 SuperProbe в Институте химии им. Макса Планка, Майнц (Германия) и Jeol 8230 в университете Фурье, Гренобль, Франция. Состав оливина анализировался при ускоряющем напряжении 20 кВ и токе 300 нА сфокусированным пучком по специальной методике, позволяющей достигать точности 10—20 г/т (две стандартные ошибки) для Ni, Ca, Mn, Al, Ti, Cr, Co, Zn, P, Na и 0.02 мол. % для форстеритовой составляющей (Fo) в оливине (Sobolev et al., 2005, 2007, 2013; Соболев и др., 2009а). Для расчета концентрации был использован ZAF метод коррекции. В качестве стандартов использованы природные и синтетические оксиды, минералы и стекла (стандарты для калибровки электронного микрозонда, набор Гео (P&H Developments Ltd.) и стандарты Смитсоновского института для электронного зонда (Jarosevich et al., 1980)). Для мониторинга стабильности и дрейфа прибора использовался внутренний стандарт, близкий по составу исследуемым образцам (San Carlos olivine, USNM 111312/444). Внутренний стандарт измерялся через каждые 30—50 точек и затем, при необходимости, вводилась коррекция. Линии профиля через оливин проводились по аналогичной методике сфокусированным пучком с шагом зонда 5 мкм. Составы пироксенов и пиропов определялись по стандартной методике [Королук и др., 2008] с помощью микроанализатора Jeol 8100 в ИГМ СО РАН.

## ПАРАГЕНЕЗИС И СОСТАВ ОЛИВИНА

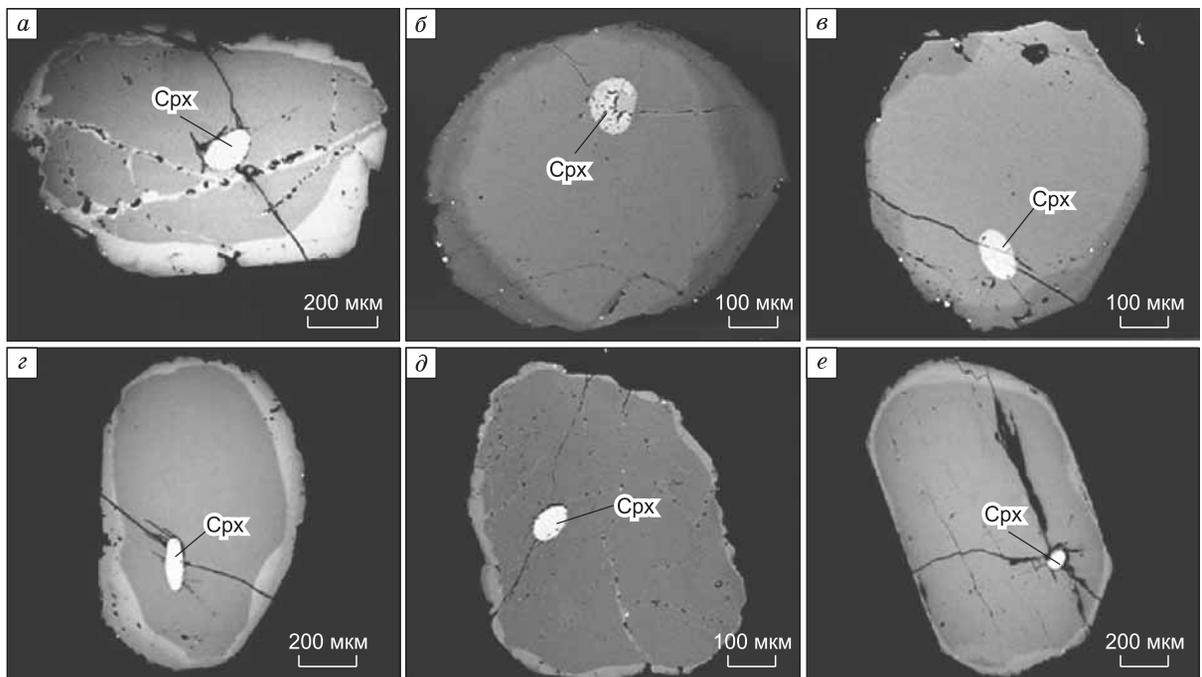
Основные систематические усилия в предлагаемой работе были предприняты для поисков вкрапленников оливина с минеральными включениями во внутренних однородных зонах кристаллов. Общий вид избранных вкрапленников, характеризующихся прямой и обратной зональностью, хорошо различимой в обратнорассеянных электронах, показан на рис. 2. Здесь обращает на себя внимание как неправильный, реликтовый характер морфологии внутренних зон, так и различное соотношение площади, занимаемой внутренней однородной и внешней зональной, регенерированных областей. Идиоморфный характер зерен позволяет отнести их к оливину II [Kamenetsky et al., 2008].

**Клинопироксен** влед за работой [Kamenetsky et al., 2009b] обнаружен в 11 вкрапленниках, относимых, в соответствии с предыдущими исследованиями, к оливину I и к оливину II [Kamenetsky et al., 2008]. Изолированные зерна клинопироксена как одиночные, так и многочисленные, достигающие 33 в



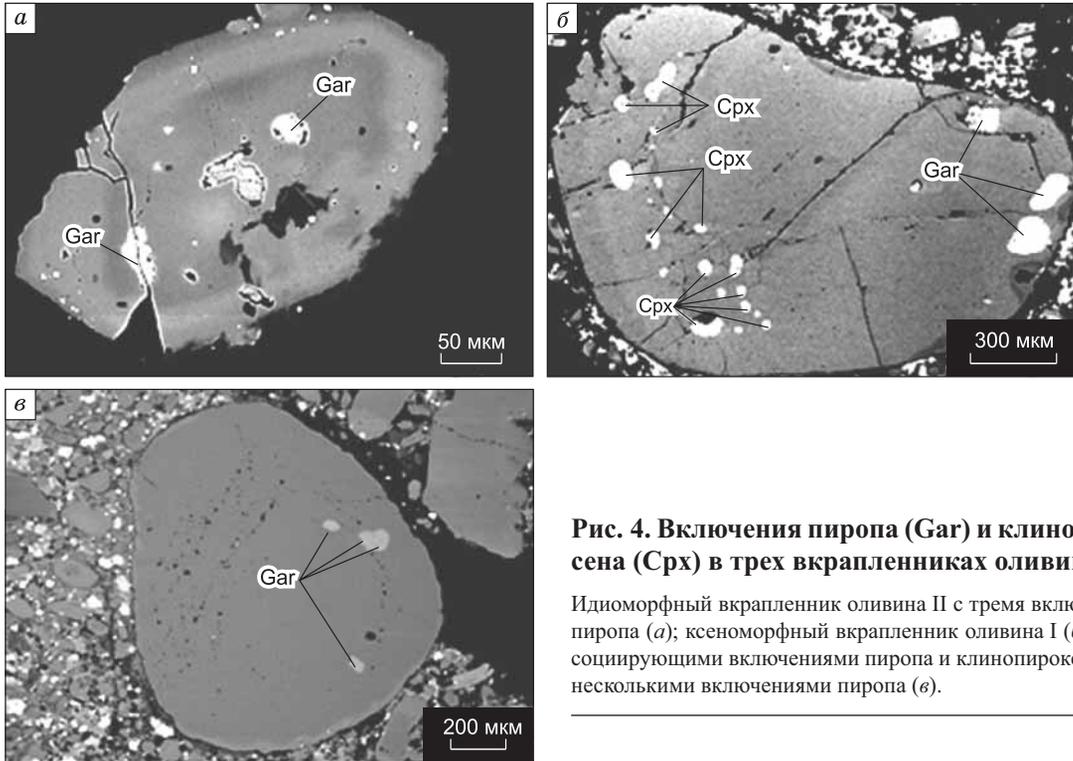
**Рис. 2.** Серия идиоморфных вкрапленников оливина II, демонстрирующая различные типы зональности и соотношения внутренних и периферических областей вкрапленников.

Снимок в обратнорассеянных электронах.



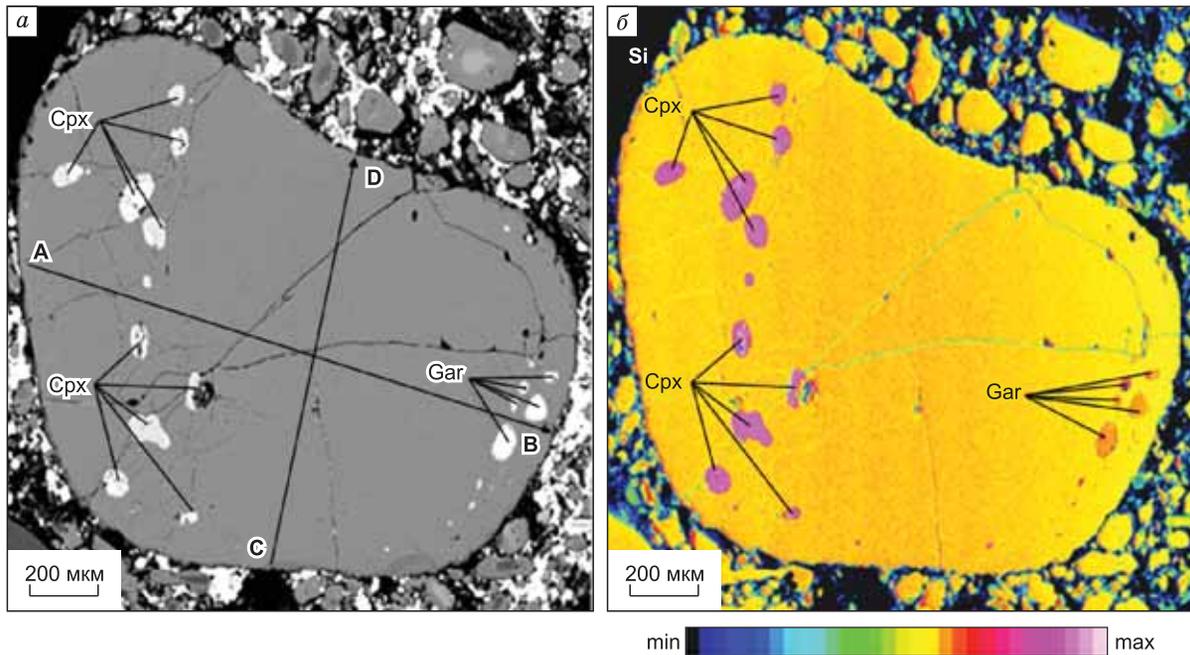
**Рис. 3.** Включения клинопироксена в ксеноморфных (*а, д* — оливин I) и идиоморфных (*б, в, з, е* — оливин II) вкрапленниках оливина.

Для вкрапленников характерна прямая (*а, в, з, д, е*) и обратная (*б*) зональность. Внешние каймы характерны для большинства образцов.



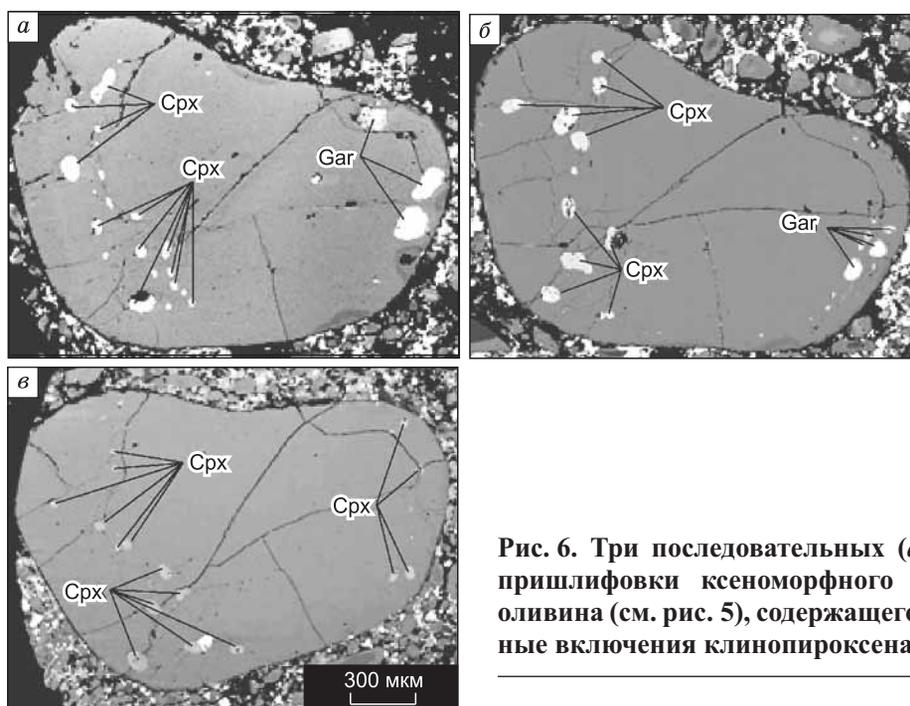
**Рис. 4.** Включения пиропы (Gar) и клинопироксена (Cpx) в трех вкрапленниках оливина.

Идиоморфный вкрапленник оливина II с тремя включениями пиропы (а); ксеноморфный вкрапленник оливина I (б, в) с ассоциирующими включениями пиропы и клинопироксена (б) и несколькими включениями пиропы (в).



**Рис. 5.** Ксеноморфный вкрапленник оливина I в кимберлите (а), содержащий серию включений клинопироксена (Cpx) и пиропы (Gar).

Изображение в обратнорассеянных электронах. Элементная карта (Si) того же зерна (б). Видны четкие цветовые различия в содержании Si в пиропе и клинопироксене, а также многочисленные вкрапленники оливина во вмещающем кимберлите. По профилям А—В и С—D выполнено в общей сложности 109 анализов (см. табл. 2).



**Рис. 6.** Три последовательных (а, б, в) уровня шлифовки ксеноморфного вкрапленника оливина (см. рис. 5), содержащего многочисленные включения клинопироксена и пиропса.

одном вкрапленнике (рис. 3, 4, б), частично изменены, хотя вмещающие их оливины не претерпели никаких изменений. В одном из крупных овальных вкрапленников оливина (оливин I, см. рис. 4, б) обнаружена серия включений пироксена и граната (см. рис. 4, б, 5). Элементная карта кремния (см. рис. 5) позволила четко наблюдать разницу в цвете включений пироксена и граната, а также обилие мелких вкрапленников неизмененного оливина в основной массе кимберлита. Методом последовательной шлифовки вкрапленника оливина с выполнением микрозондовых анализов включений, обнаруженных на каждом уровне (рис. 6), удалось проанализировать 33 включения пироксена и 6 — граната (табл. 1).

Главные особенности состава проанализированных клинопироксенов (см. табл. 1), а также ранее опубликованные данные [Kamenetsky et al., 2009b] представлены на рис. 7. Особо следует подчеркнуть исключительное разнообразие состава 33 включений пироксена из овального вкрапленника оливина (см. рис. 4—6). Вмещающий оливин, проанализированный по двум профилям (А—В и С—D, см. рис. 5), продемонстрировал исключительную однородность по содержанию главных и примесных элементов (см. табл. 2). В то же время составы индивидуальных включений клинопироксена по Mg# и по содержанию CaO, Na<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и TiO<sub>2</sub> (см. рис. 7) характеризуются переменным составом. В оконтуренной области состава этих пироксенов обращает на себя внимание в первую очередь значимая отрицательная корреляция TiO<sub>2</sub> и Mg#. Тенденция к отрицательной корреляции наблюдается для Na<sub>2</sub>O и Mg# множественных включений клинопироксена. Здесь следует подчеркнуть более высокий уровень содержания примеси Na<sub>2</sub>O в пироксенах, обнаруженных в результате наших исследований по сравнению с ранее опубликованными [Kamenetsky et al., 2009b] и наличие включения, по сути, уникального состава (см. табл. 1, ан. 17) с содержанием 5.96 мас. % Na<sub>2</sub>O. Это соответствует суммарной примеси более 40 % Na-компонента, включая около 20 % жадеита и столько же эгирина, CaO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> для рассматриваемых пироксенов демонстрируют положительную корреляцию с Mg# (см. рис. 7).

Полученные данные по составу клинопироксенов существенно расширяют пределы колебания по содержанию главных и примесных компонентов, приведенные ранее для включений в оливинах тр. Удачная-Восточная [Kamenetsky et al., 2009b].

**Ортопироксен** был установлен в виде двух включений только в одном вкрапленнике оливина. Его высокая магнезиальность (см. табл. 1, ан. 58, 59) свидетельствует о принадлежности к перидотитовому парагенезису и подтверждается также другими особенностями состава, в частности, повышенной примесью Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0.40 мас. %). В отличие от работы [Kamenetsky et al., 2009b], в которой утверждается широкая распространенность включений ортопироксена в оливинах тр. Удачная-Восточная, выявленные нашими исследованиями включения характеризуются существенно более высокой магнезиальностью (Mg# 92.9) по сравнению с 12 образцами с пределами колебания Mg# 86.4—91.3 из работы [Kamenetsky et al., 2009c].

**Гранат** в виде включений в серии из шести вкрапленников оливина, относимых как к оливину I, так и к оливину II, впервые установлен для тр. Удачная-Восточная. По результатам определения химического состава все включения граната отнесены к пиропу с достаточно широкими колебаниями Mg# от

Таблица 1. Химический состав кристаллических включений клинопироксена, граната и ортопироксена в регенерированных оливинах из кимберлитов тр. Удачная-Восточная, Якутия (мас. %)

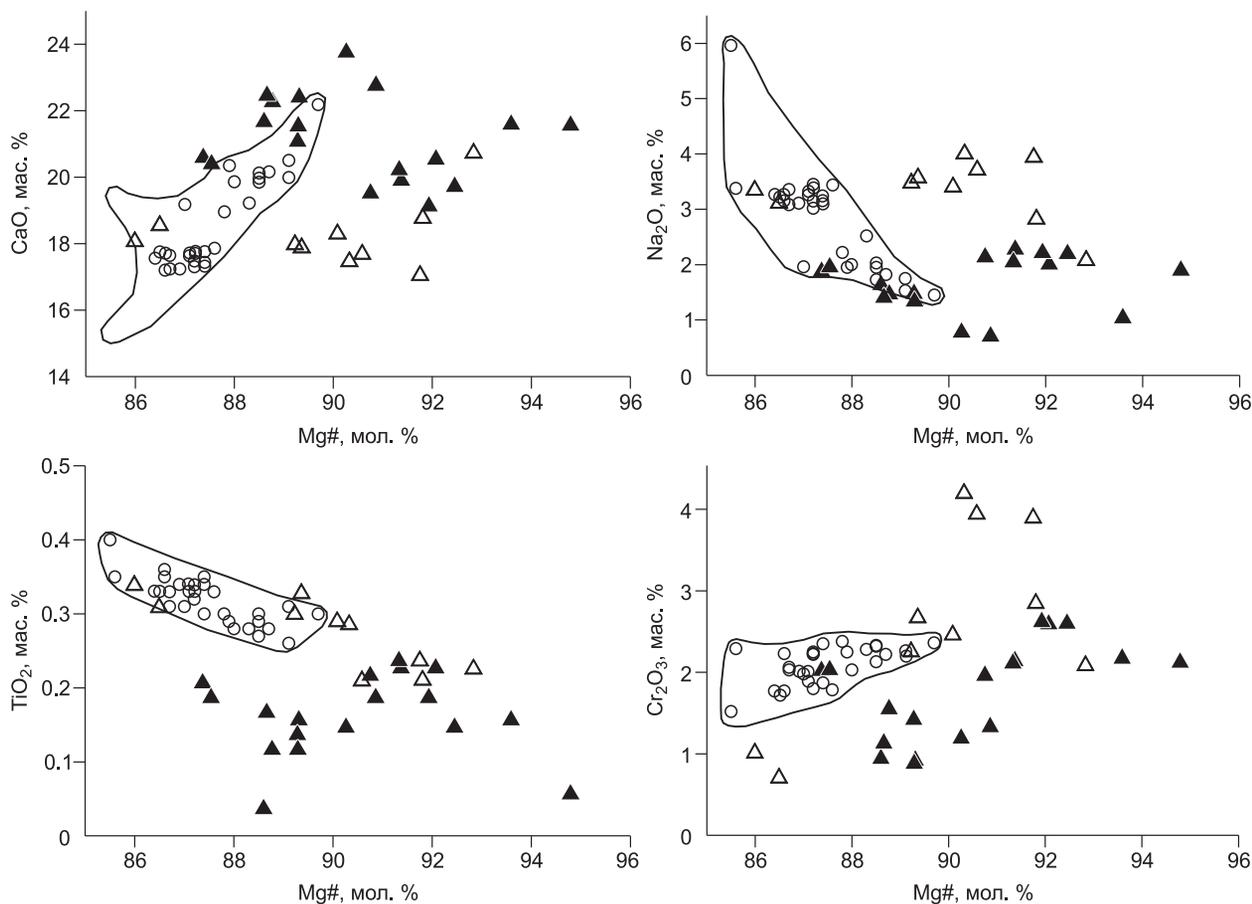
№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Mg#
<b>Клинопироксены</b>												
<i>Оливин 1</i>												
1	54.90	0.31	3.19	2.06	3.9	0.90	14.26	17.65	3.36	0.02	100.55	86.7
2	54.88	0.31	2.31	1.98	3.98	0.08	14.95	19.18	1.96	0.07	99.70	87.01
3	51.69	0.35	1.77	2.29	4.74	0.08	15.85	19.43	3.38	0.10	99.68	85.63
4	54.47	0.28	1.84	2.03	3.82	0.09	15.76	19.86	2.00	0.0	100.15	88.03
5	55.22	0.33	3.19	1.72	4.09	0.09	14.65	17.75	3.22	0.02	100.28	86.46
6	54.50	0.29	1.56	2.25	3.85	0.10	15.71	20.35	1.95	0.0	100.56	87.91
7	54.14	0.30	1.08	2.36	3.13	0.07	15.26	22.20	1.45	0.02	100.01	89.68
8	54.69	0.33	3.13	1.77	4.09	0.09	14.62	17.56	3.27	0.03	99.58	86.43
9	55.49	0.33	2.98	2.25	3.83	0.10	14.67	17.43	3.03	0.01	100.12	87.22
10	54.63	0.29	1.40	2.13	3.66	0.07	15.88	19.85	1.73	0.0	99.64	88.55
11	55.69	0.30	3.11	2.35	3.74	0.10	14.51	17.44	3.10	0.01	100.35	87.37
12	55.34	0.35	3.20	2.03	3.73	0.06	14.58	17.32	3.25	0.02	99.88	87.45
13	55.59	0.34	3.13	1.80	3.83	0.09	14.59	17.30	3.15	0.02	99.84	87.16
14	55.15	0.34	3.23	2.01	3.90	0.06	14.54	17.24	3.11	0.01	99.59	86.92
15	54.65	0.30	1.67	2.38	3.98	0.09	16.09	18.96	2.22	0.0	100.34	87.81
16	54.99	0.36	3.11	2.23	4.04	0.08	14.60	17.2	3.15	0.02	99.78	86.56
17	54.72	0.40	5.53	1.52	4.01	0.10	13.23	15.28	5.96	0.20	100.95	85.47
18	54.51	0.26	0.99	2.20	3.6	0.12	16.44	20.49	1.53	0.0	100.14	89.06
19	54.97	0.32	2.98	2.25	3.79	0.09	14.54	17.48	3.02	0.02	99.46	87.24
20	54.93	0.33	3.09	2.03	4.06	0.10	14.80	17.25	3.09	0.01	99.69	86.66
21	54.09	0.27	1.52	2.33	3.69	0.08	15.88	20.11	1.95	0.0	99.92	88.47
22	54.99	0.33	3.12	1.89	3.83	0.10	14.54	17.71	3.26	0.02	99.79	87.12
23	54.77	0.32	3.13	2.22	3.71	0.09	14.23	17.75	3.45	0.02	99.69	87.24
24	54.71	0.32	3.11	2.23	3.77	0.10	14.45	17.71	3.39	0.02	99.81	87.23
25	54.58	0.28	1.91	2.28	3.62	0.10	15.33	19.22	2.52	0.01	99.85	88.30
26	54.69	0.28	1.23	2.22	3.67	0.06	16.15	20.16	1.82	0.03	100.31	88.69
27	54.86	0.35	3.24	1.77	3.99	0.08	14.52	17.71	3.27	0.03	99.82	86.64
28	55.10	0.33	3.13	1.79	3.69	0.12	14.59	17.86	3.44	0.02	100.07	87.57
29	54.24	0.30	1.67	2.32	3.6	0.07	15.57	19.97	2.03	0.0	99.77	88.52
30	55.05	0.34	3.12	1.87	3.74	0.08	14.56	17.76	3.16	0.02	99.70	87.40
31	54.39	0.31	1.72	2.26	3.48	0.07	16.05	19.99	1.75	0.01	100.03	89.15
32	54.99	0.34	3.21	2.06	3.78	0.08	14.33	17.64	3.33	0.01	99.72	87.11
<i>Оливин 4</i>												
33	54.46	0.24	2.69	3.92	2.35	0.08	14.67	17.12	3.99	0.03	99.55	91.8
<i>Оливин 5</i>												
34	54.02	0.29	2.82	4.23	2.62	0.09	13.71	17.54	4.05	0.02	99.39	90.3
<i>Оливин 6</i>												
35	54.71	0.29	2.88	2.49	2.90	0.08	14.80	18.37	3.45	0.02	99.99	90.1
<i>Оливин 7</i>												
36	54.68	0.21	2.13	2.88	2.51	0.08	15.75	18.84	2.87	0.03	99.98	91.8
<i>Оливин 8</i>												
37	54.79	0.31	3.24	0.73	4.18	0.09	15.01	18.62	3.16	0.02	100.15	86.5
<i>Оливин 9</i>												
38	54.49	0.33	2.92	2.70	3.09	0.08	14.55	17.95	3.62	0.02	99.75	89.4
<i>Оливин 10</i>												
39	54.36	0.30	3.07	2.28	3.17	0.08	14.73	18.05	3.52	0.03	99.59	89.2
<i>Оливин 11</i>												
40	54.64	0.34	3.34	1.04	4.27	0.09	14.70	18.14	3.39	0.02	99.97	89.2

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Сумма	Mg#
<i>Оливин 12</i>												
41	54.50	0.21	2.51	3.97	2.66	0.07	14.34	17.76	3.76	0.04	99.82	90.6
<i>Оливин 13</i>												
42	54.25	0.23	1.71	2.11	2.22	0.07	16.16	20.8	2.12	0.03	99.70	92.8
<b>Гранаты</b>												
<i>Оливин 1</i>												
43	41.46	0.57	19.61	3.73	10.56	0.49	18.33	5.81	0.14	0.0	100.70	75.57
44	41.50	0.56	19.90	3.51	10.30	0.47	18.52	5.61	0.13	0.0	100.50	76.22
45	41.11	0.59	19.17	4.42	10.50	0.47	18.47	5.76	0.11	0.0	100.60	75.82
46	41.42	0.56	20.08	3.75	10.00	0.57	18.18	5.68	0.16	0.0	100.40	76.42
47	41.75	0.55	20.05	3.72	9.92	0.53	18.20	5.64	0.14	0.0	100.50	76.58
48	41.28	0.55	19.88	3.71	9.96	0.52	18.16	5.75	0.15	0.0	99.96	76.47
<i>Оливин 2</i>												
49	41.10	0.02	18.44	6.67	7.83	0.42	19.49	5.84	0.03	0.0	99.84	81.61
50	41.80	0.01	18.61	7.05	7.60	0.4	19.50	5.60	0.03	0.0	100.60	82.06
51	40.42	0.02	18.43	7.14	7.70	0.47	19.76	5.76	0.06	0.0	99.76	82.06
52	41.70	0.02	18.53	7.10	7.70	0.49	19.50	5.70	0.06	0.0	100.80	81.80
53	41.35	0.01	18.44	7.20	7.73	0.44	19.40	5.90	0.03	0.0	100.50	81.73
<i>Оливин 3</i>												
54	42.30	1.03	20.30	1.40	9.78	0.29	20.86	4.64	0.1	0.0	100.70	79.17
<i>Оливин 14</i>												
55	40.72	0.44	16.54	9.14	7.71	0.47	18.87	6.16	0.05	0.0	100.10	81.35
<i>Оливин 15</i>												
56	41.06	0.17	17.39	8.43	7.92	0.46	18.84	5.99	0.04	0.0	100.30	80.92
<i>Оливин 16</i>												
57	41.22	0.73	18.09	5.50	7.32	0.34	21.10	5.39	0.07	0.0	99.76	83.71
<b>Ортопироксены</b>												
<i>Оливин 14</i>												
58	57.80	0.0	0.40	0.40	4.90	0.40	35.70	0.30	0.20	0.0	100.10	92.85
59	58.20	0.0	0.40	0.40	4.80	0.10	35.50	0.30	0.20	0.0	99.90	92.95

75.6 до 83.7 (см. табл. 1, ан. 43—57). Характерной особенностью состава всех включений пироба является переменное, вплоть до высокого, содержание примеси Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от 1.4 до 9.14 мас. % (рис. 8). Другой характерной особенностью их состава является переменное, вплоть до повышенного, содержание примеси TiO<sub>2</sub> (0.01—1.03 мас. %), а также для отдельных образцов повышенное содержание примеси Na<sub>2</sub>O (0.1—0.16 мас. %), что является независимым признаком особо высокого давления их образования [Sobolev, Lavrent'ev, 1971]. В случае присутствия множественных включений в одном вкрапленнике оливина, как например, для включений гранатов в оливине 1 и оливине 2 (см. табл. 1 соответственно ан. 43—48 и 49—53). При однородном составе отдельно взятых зерен зафиксированы колебания содержания отдельных компонентов, в частности Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> от 3.51 до 4.42 мас. % (включения в оливине 1) и от 6.67 до 7.20 мас. % (включения в оливине 2).

**Оливин** вкрапленников в его однородной зоне характеризуется составом, практически не отличающимся от опубликованных данных [Kamenetsky et al., 2008]. В табл. 2 представлены новые данные по химическому составу только тех образцов оливина, в которых зафиксированы включения пироба, клинопироксена и ортопироксена. В первую очередь обращает на себя внимание оливин (см. табл. 2, ан. 1), средний состав которого приведен по двум профилям (109 анализов). Для него характерна примесь TiO<sub>2</sub> — 340 г/т, а также повышенная примесь Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — 190 и ZnO — 90 г/т. Содержание форстерита находится в пределах, известных ранее для оливинов тр. Удачная (Fo = 88.71). Отметим, что систематические данные по содержанию TiO<sub>2</sub> в кимберлитовых оливинах начали появляться только сравнительно недавно, после разработки специальной методики его высокоточного определения [Соболев и др., 2009а; Sobolev et al., 2009; Arndt et al., 2010].

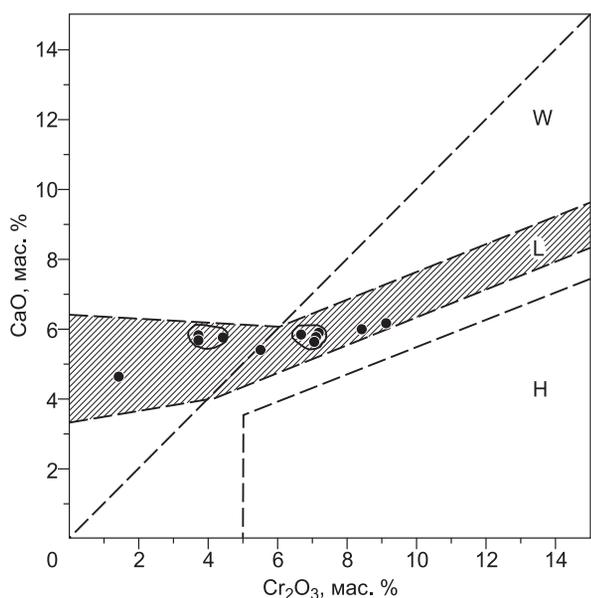
Все без исключения вкрапленники оливина, содержащие минеральные включения, характеризуются повышенной примесью TiO<sub>2</sub> от 270 до 420 г/т (в табл. 2 в мас. %, ан. 1—17). Одновременно в них зафиксирована повышенная примесь Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 70—600 г/т.



**Рис. 7. Соотношение магнезиальности (Mg#) и содержания CaO, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub> и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> включений клинопироксена во вкрапленниках оливина.**

Открытые кружки — клинопироксены, ассоциирующие с пиропом из крупного ксеноморфного вкрапленника оливина I (см. рис. 5, 6), область состава которых околнурена сплошной линией. Залитые треугольники — составы клинопироксена из включений в оливинах [Kamenetsky et al., 2009b]; открытые треугольники — включения клинопироксена в оливинах, настоящая работа (см. анализы в табл. 1, 2).

**Парагенезис вкрапленников оливина** может быть восстановлен, благодаря находкам сосуществующих клинопироксена и пироба, а также изолированных клинопироксена и ортопироксена. В наиболее наглядной форме информация по парагенезису оливина представлена на рис. 9, а. Соотношение содержания Ti и Fo оливинов из различных типов ксенолитов перидотитов тр. Удачная, а также включений оливина в алмазах различных регионов земного шара, демонстрируют четкую обособленность наиболее глубоких деформированных перидотитов от других групп. Абсолютное большинство анализов однородных реликтовых внутренних зон вкрапленников демонстрирует содержание Ti, превышающее 100 г/т.



**Рис. 8. Соотношение содержания примесей Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и CaO в пиробах из шести вкрапленников оливина.**

Сплошной линией обведены составы пиробов из двух вкрапленников оливина с неоднородным содержанием примесей. Парагенезисы пиробов: H — гарцбургит-дунитовый, L — лерцолитовый, W — верлитовый, по [Соболев и др., 1969; Соболев, 1971; Sobolev et al., 1973].

Таблица 2. Химический состав регенерированных оливинов, содержащих кристаллические включения клинопироксена, граната и ортопироксена, из кимберлитов тр. Удачная-Восточная, Якутия (мас. %)

№ п/п	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	MgO	CaO	NiO	CoO	ZnO	Сумма	Fo
<b>Оливины</b>													
<b>(1)*</b>													
1	40.43	0.034	0.011	0.019	10.88	0.137	47.97	0.023	0.287	Н.о.	0.009	99.80	88.71
1σ, %	0.68	3.71	31.38	7.21	0.19	0.90	0.37	6.91	0.67	—	14.13	—	0.05
<b>(2)</b>													
2	40.44	0.032	0.0	0.050	11.05	0.136	47.91	0.070	0.286	0.016	Н.о.	99.99	88.54
<b>(3)</b>													
3	41.07	0.034	0.0	0.007	7.45	0.103	50.25	0.009	0.41	0.017	»	99.35	92.32
<b>(4)</b>													
4	40.91	0.027	0.0	0.043	6.74	0.095	51.31	0.018	0.372	0.015	»	99.53	93.13
<b>(5)</b>													
5	40.76	0.032	0.011	0.03	8.60	0.122	50.00	0.019	0.369	0.017	»	99.96	91.21
<b>(6)</b>													
6	40.52	0.032	0.0	0.029	8.471	0.122	49.96	0.019	0.373	0.015	»	99.54	91.32
<b>(7)</b>													
7	41.02	0.034	0.0	0.031	7.65	0.103	50.74	0.017	0.339	0.017	»	99.95	92.20
<b>(8)</b>													
8	40.47	0.030	0.0	0.009	12.05	0.140	47.74	0.021	0.221	0.02	»	100.70	87.59
<b>(9)</b>													
9	40.51	0.035	0.004	0.028	9.32	0.124	49.35	0.021	0.357	0.015	»	99.76	90.42
<b>(10)</b>													
10	40.32	0.031	0.001	0.023	9.35	0.119	48.96	0.020	0.337	0.019	»	99.18	90.32
<b>(11)</b>													
11	40.32	0.033	0.0	0.013	12.08	0.134	47.64	0.022	0.241	0.017	»	100.50	87.55
<b>(12)</b>													
12	40.79	0.025	0.003	0.033	8.15	0.109	50.18	0.038	0.350	0.015	»	99.69	91.64
<b>(13)</b>													
13	41.01	0.042	0.0	0.025	7.52	0.110	51.13	0.024	0.315	0.015	»	100.19	92.38
<b>(14)</b>													
14ц	41.45	Н.о.	Н.о.	0.06	7.43	Н.о.	50.60	0.04	0.40	Н.о.	»	99.98	92.39
15к	41.58	»	»	0.0	8.56	»	48.85	0.18	0.08	»	»	99.25	91.05
<b>(15)</b>													
16	41.77	»	»	0.06	7.61	»	50.36	0.03	0.4	»	»	100.23	92.18
<b>(16)</b>													
17	41.32	»	»	0.04	8.34	»	50.42	0.07	0.35	»	»	100.54	91.51

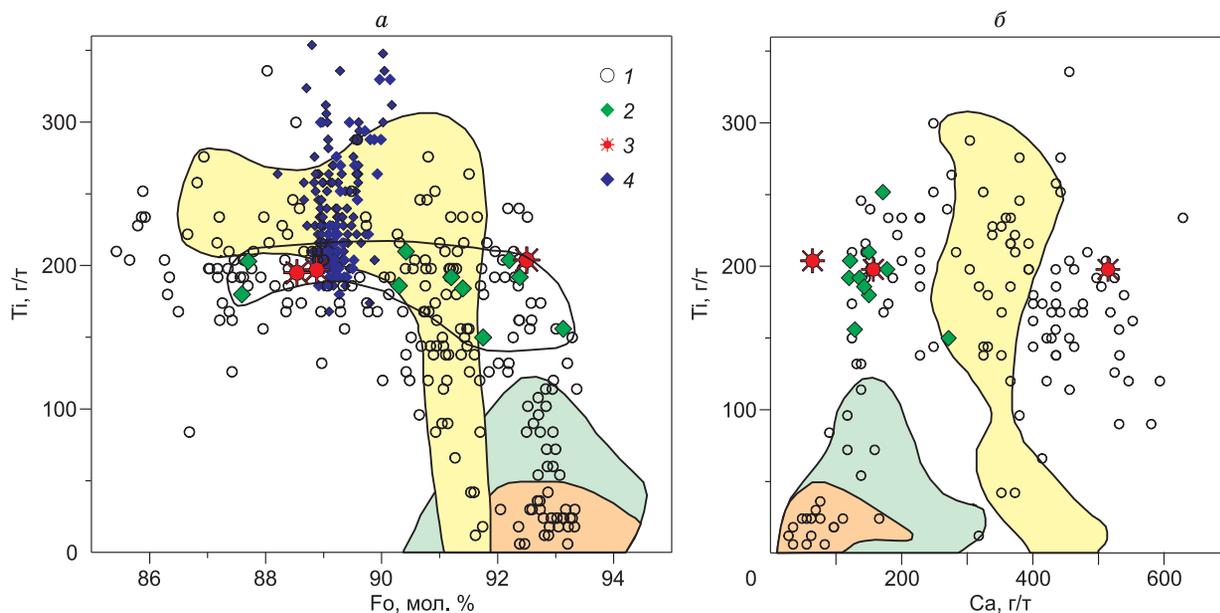
Примечание. (1)–(16) — оливины, 1σ — стандартное отклонение. Н.о. — не определено.

\* Средний состав из 109 анализов

Оконтуренная область, охватывающая широкий диапазон Fo от 87.5 до 93.0, представлена оливинами, содержащими включения пироба и клинопироксена.

Область состава оливина, содержащего включения пироба и клинопироксена, частично совпадает с соответствующей областью состава из деформированных пиробовых перидотитов тр. Удачная. Однако пироксены из вкрапленников оливина характеризуются значительно более высокими значениями Са# 43.3—46.2 по сравнению с пироксенами деформированных перидотитов, в которых Са# < 40, т.е. они являются более низкотемпературными.

Соотношение содержания примесей Ti и Ca в тех же оливинах (см. рис. 9, в) свидетельствует о более низкой примеси Ca в абсолютном большинстве оливинов с включениями, что также подтверждает их более низкотемпературный характер по сравнению с оливинами деформированных перидотитов (Brey, Kohler, 1990; Kohler, Brey, 1990).



**Рис. 9.** Соотношение магнезиальности (содержания форстерита (Fo)) и примеси Ti (а), а также примесей Ca и Ti (б) в центральных зонах вкрапленников оливина (1), в таких же зонах, содержащих включения клинопироксена (2), пироба (3), и каймах (4).

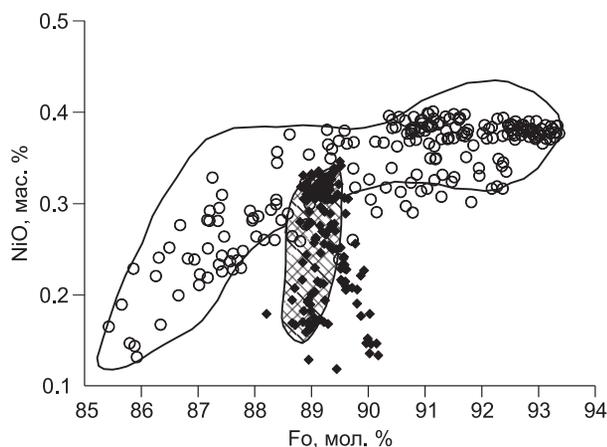
Оконтурное желтое поле отражает соответствующие особенности состава оливинов из ксенолитов деформированных перидотитов тр. Удачная, оранжевое поле — из ксенолитов зернистых перидотитов той же трубки. Зеленая область отражает особенности состава включений оливина в алмазах различных регионов земного шара. Оконтурные цветные поля, по [Sobolev et al., 2009], 1—4, по материалам настоящей работы.

Как показано на рис. 9, а внешние каймы вкрапленников оливина характеризуются почти постоянными значениями Fo, но переменной примесью Ti. Для них также характерно переменное содержание примеси NiO (рис. 10). Наши данные в основном совпадают с результатами [Kamenetsky et al., 2008], в особенности по составу внутренних зон оливинов, но различаются по составу внешних кайм, с дополнительно выявленной тенденцией к обогащению Fo и отрицательной корреляцией с NiO.

С целью изучения характера зональности вкрапленников нами были выбраны три зерна оливина, для которых выполнены аналитические профили, положение их показано на рис. 11, а также выполнены элементные карты по ряду главных и примесных элементов.

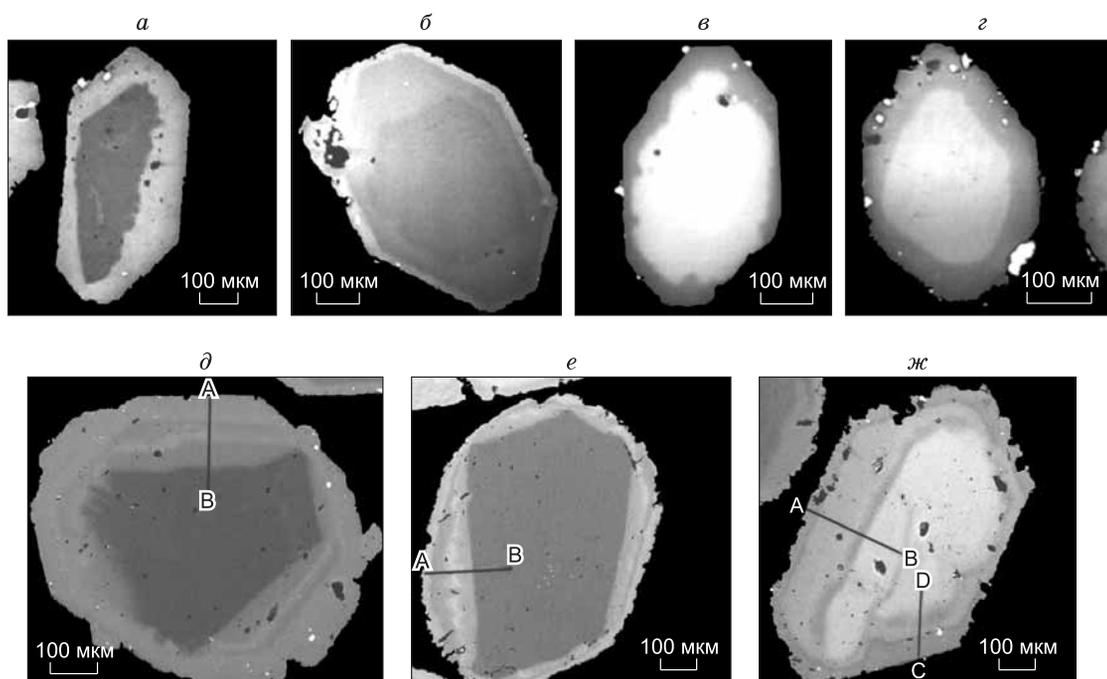
Наиболее сложный характер зональности, по предварительным данным, отмечен для зерна «d» (см. рис. 11). Для этого зерна выполнены элементные карты (общий вид), представленные на рис. 12, а также детальные карты (рис. 13) участка, оконтуренного на рис. 12. Карты высокого разрешения даны для половины исследуемого зерна, ввиду исключительной трудоемкости и затрат времени на этот вид исследования. Особо четкая зональность отмечена для Ni с выделением около 10 зон. Характерно, что наряду с зонами, имеющими четкие очертания, свойственные морфологии оливина, в данном зерне зафиксирована зона, которую можно интерпретировать как зону резорбции. Особенно четко эта зона проявлена на рис. 13. Высокое разрешение полученных элементных карт (см. рис. 12) подтверждается

фиксирована зона, которую можно интерпретировать как зону резорбции. Особенно четко эта зона проявлена на рис. 13. Высокое разрешение полученных элементных карт (см. рис. 12) подтверждается



**Рис. 10.** Соотношение содержания NiO и магнезиальности (содержание форстерита (Fo)) в центральных зонах вкрапленников оливина (кружки) и внешних каймах вкрапленников (ромбы) по результатам настоящего исследования.

Область, оконтуренная сплошной линией, и область с перекрывающейся штриховкой — аналитические данные из работы [Kamenetsky et al., 2009a].



**Рис. 11. Примеры прямой (а, б, д, е) и обратной зональности вкрапленников оливина.**

Для трех вкрапленников оливина с наиболее четкой зональностью внешней области выполнены анализы по профилям А—В (для вкрапленников д и е и А—В, С—D — для вкрапленника ж).

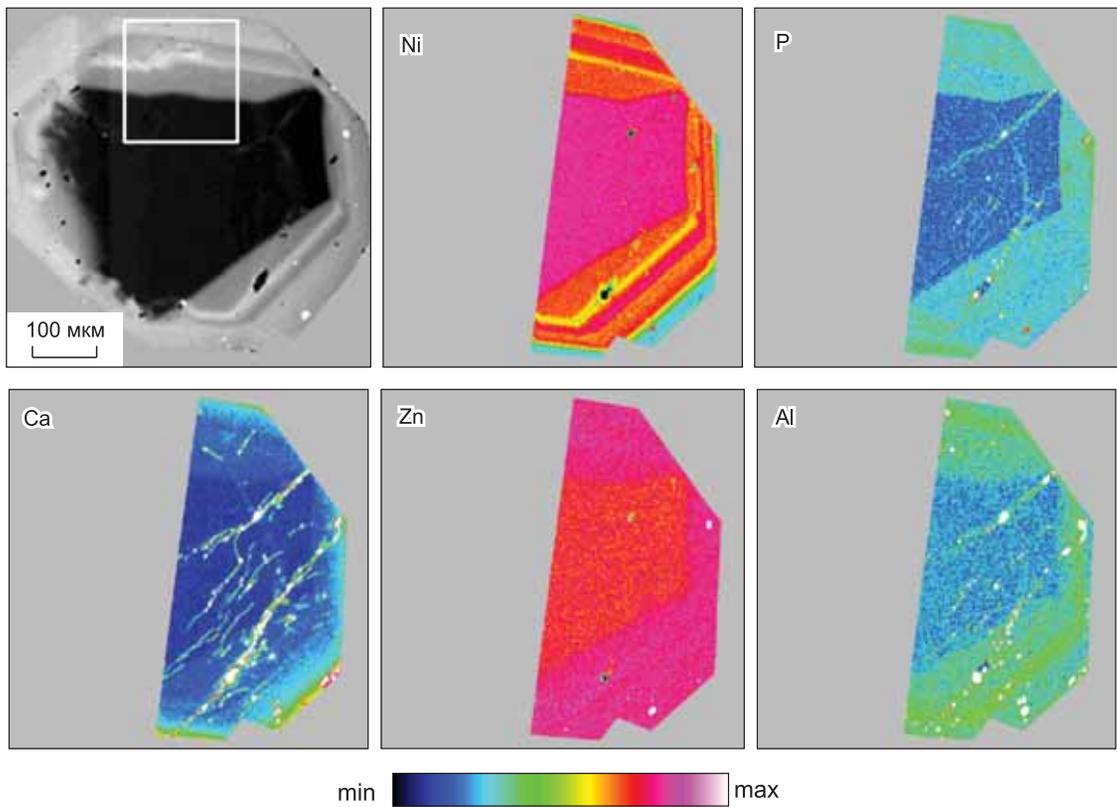
выявлением зональности распределения даже таких примесных элементов, как Р, Zn и Al, причем для Р зональность ранее была выявлена только для высокотемпературных оливинов [Milman-Barris et al., 2008]. Зональность отмечена также и для Са, причем здесь хорошо видны участки проникновения расплава/флюида в виде светлых полос

Особо обращает на себя внимание наличие очень узких зон, разделяющих однородную внутреннюю часть вкрапленника и регенерированную внешнюю. Наиболее четко это видно на элементной карте участка зерна (см. рис. 13). Если ранее [Kamenetsky et al., 2008] в таких оливинах отмечалась только одна зона, то в данных образцах зафиксированы три очень узкие зоны, особо хорошо различимые на картах Fe и Mg. Эти зоны свидетельствуют о повышенном содержании Fe по направлению к внешней части зерна.

Профиль этого же зерна по линии А—В (рис. 14) продемонстрировал четкую зональность, однако не захватывая самые узкие зоны. Минимальное содержание Fe — 88 характерно не для самой внешней зоны, а для промежуточной. Максимальное содержание Fe — 93 свойственно внутренней области. Съемка с высоким разрешением обнаружила в центральной части зерна ZnO (55—70 г/т) и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (48—59 г/т). По направлению к внешней части зерна содержание ZnO, и P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> возрастает соответственно до 110 и 150 г/т.

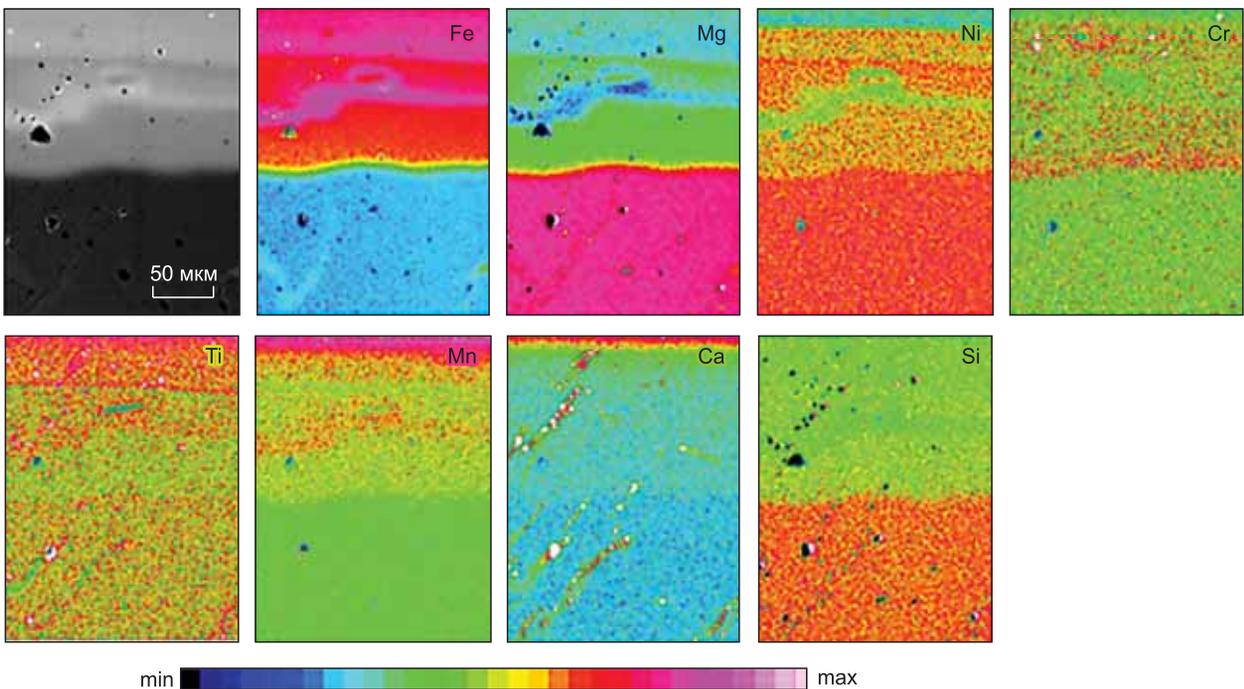
Для зерна «е» (см. рис.11), в котором также обнаружена зона растворения в обратнорассеянных электронах, выполнена серия элементных карт как для всего зерна (рис. 15), так и для оконтуренного участка (рис. 16). Зона растворения особенно четко проявляется на карте распределения Ni, а достаточно четкая зональность наблюдается также для Сг и Ti. Зоны растворения, имеющие неправильную форму, в количестве более пяти, четко зафиксированы на элементной карте участка зерна, оконтуренного на рис. 15 и представленного на рис. 16. Здесь так же, как и для предыдущего зерна, четко видны три очень узкие зоны, отделяющие центральную часть от периферийной, демонстрирующие постепенное повышение содержания примеси Fe. Особый интерес вызывают резкие колебания содержания примеси Ni в зонах растворения от постепенного повышения, затем — резкого понижения и снова повышения. Указанные особенности лишь частично фиксируются профилем по линии А—В (рис. 17).

Последнее из изученных зональных зерен «ж» оливина, имеющее наиболее сложное внутреннее строение, исследовано с помощью элементного картирования (рис. 18) и профилей по линии А—В (рис. 19) и С—D (рис. 20).



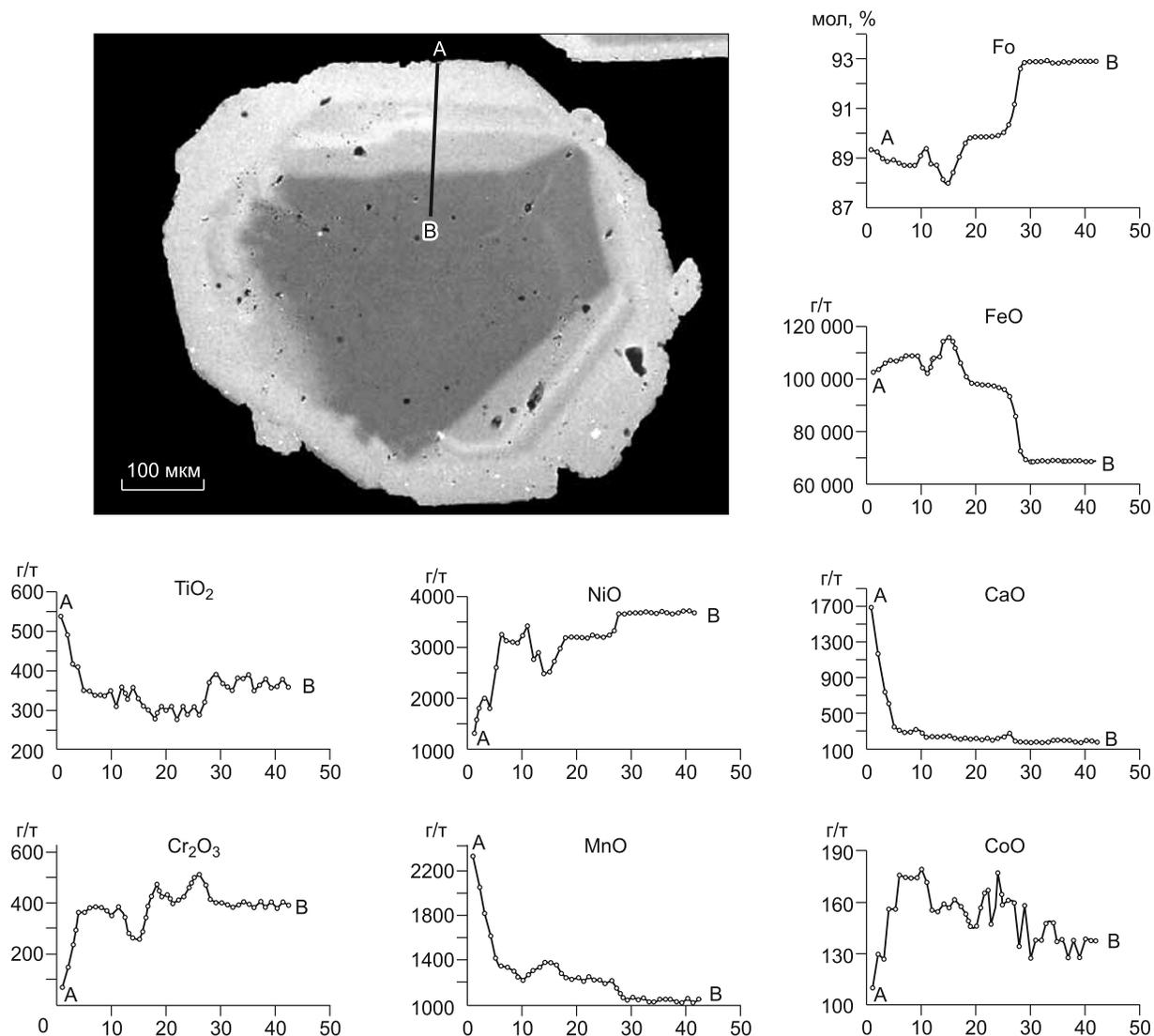
**Рис. 12.** Пример наиболее сложной зональности вкрапленника оливина (см. рис. 11, д), в одном из трех образцов, выбранных для детального исследования состава по профилям.

Идиоморфный вкрапленник представлен изображением в обратнорассеянных электронах. Элементные карты распределения Ni, P, Ca, Zn и Al представлены для половины зерна, ввиду большой длительности картирования.



**Рис. 13.** Детали элементного картирования вкрапленника оливина (см. врезку на рис. 12).

Слева сверху показан участок зерна, околнуренный белой рамкой на рис. 12. Наиболее четко зональность проявлена на картах Fe и Mg, где отчетливо видны очень узкие зоны, отделяющие внутреннюю, однородную часть вкрапленника от внешней, регенерированной части. Неровная, извилистая область внешней части вкрапленника представляет собой этап растворения, чередующегося с этапами роста.



**Рис. 14.** Профиль по линии А—В от внешней неоднородной каймы вкрапленника оливина (см. рис. 11) до внутренней однородной зоны.

Здесь и на рис. 17, 19, 20 по горизонтальной оси с шагом 5 мкм показаны сопряженные колебания содержания FeO, TiO<sub>2</sub>, CaO, MnO, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, CoO и Fo.

Сложное внутреннее строение данного зерна наилучшим образом фиксируется элементными картами примесей Ni, Fe, Ti, Mn. Общая картина зональности со следами проникновения расплава/флюида во внутреннюю область зерна, видны на карте Ca. Слабо выраженная зональность фиксируется также на картах Cr, Al и P.

Сравнение профилей по линии А—В (см. рис. 19) и С—D (см. рис. 20) подтверждает асимметричный характер зерна либо соответствующего разреза зерна, который также заметен на некоторых элементных картах (см. рис. 18), в частности, Ni, Fe и Mn.

### ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Исследование центральных зон большого количества вкрапленников оливина наряду с однородностью их состава по содержанию главных и примесных элементов продемонстрировало сходство с составами оливинов из алмазов и ксенолитов перидотитов [Sobolev et al., 2009]. В то же время значимые устойчивые отличия зафиксированы только по содержанию примеси титана [Sobolev et al., 2009]. Соотношение содержания примеси титана и магнезиальности (содержание форстерита) оливина является наилучшим отличительным признаком оливинов разных парагенезисов в кимберлитах. Поскольку наи-

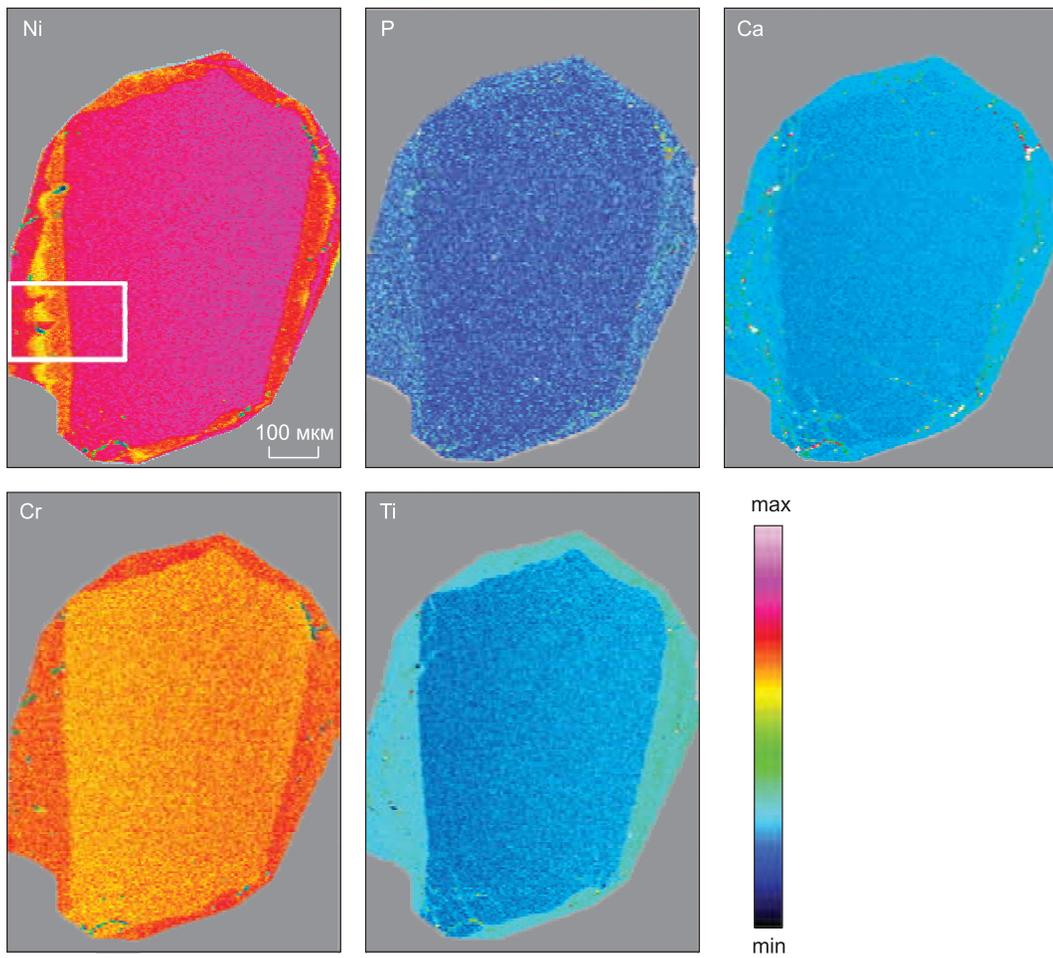


Рис. 15. Элементные карты, демонстрирующие зональность вкрапленника оливина «e» (см. рис. 11) по содержанию примесей Ni, P, Ca, Cr и Ti.

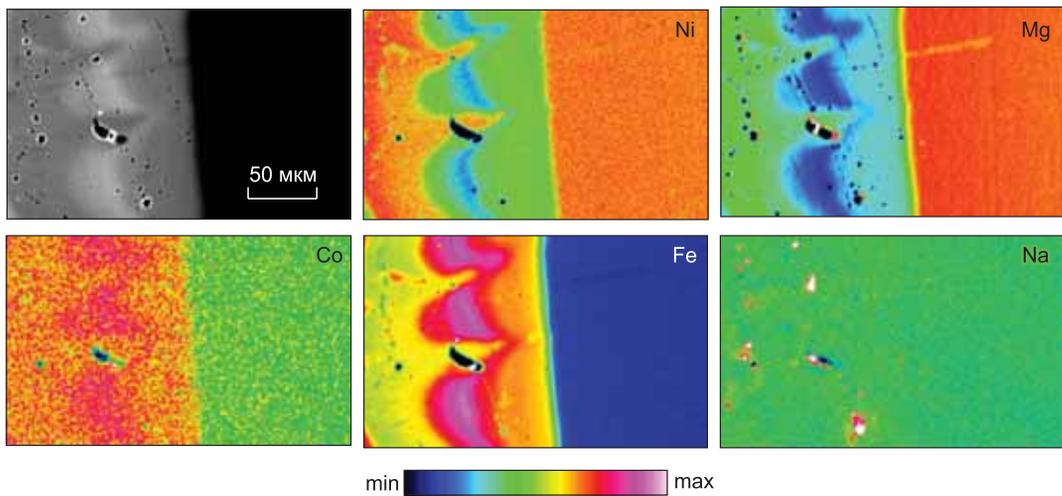
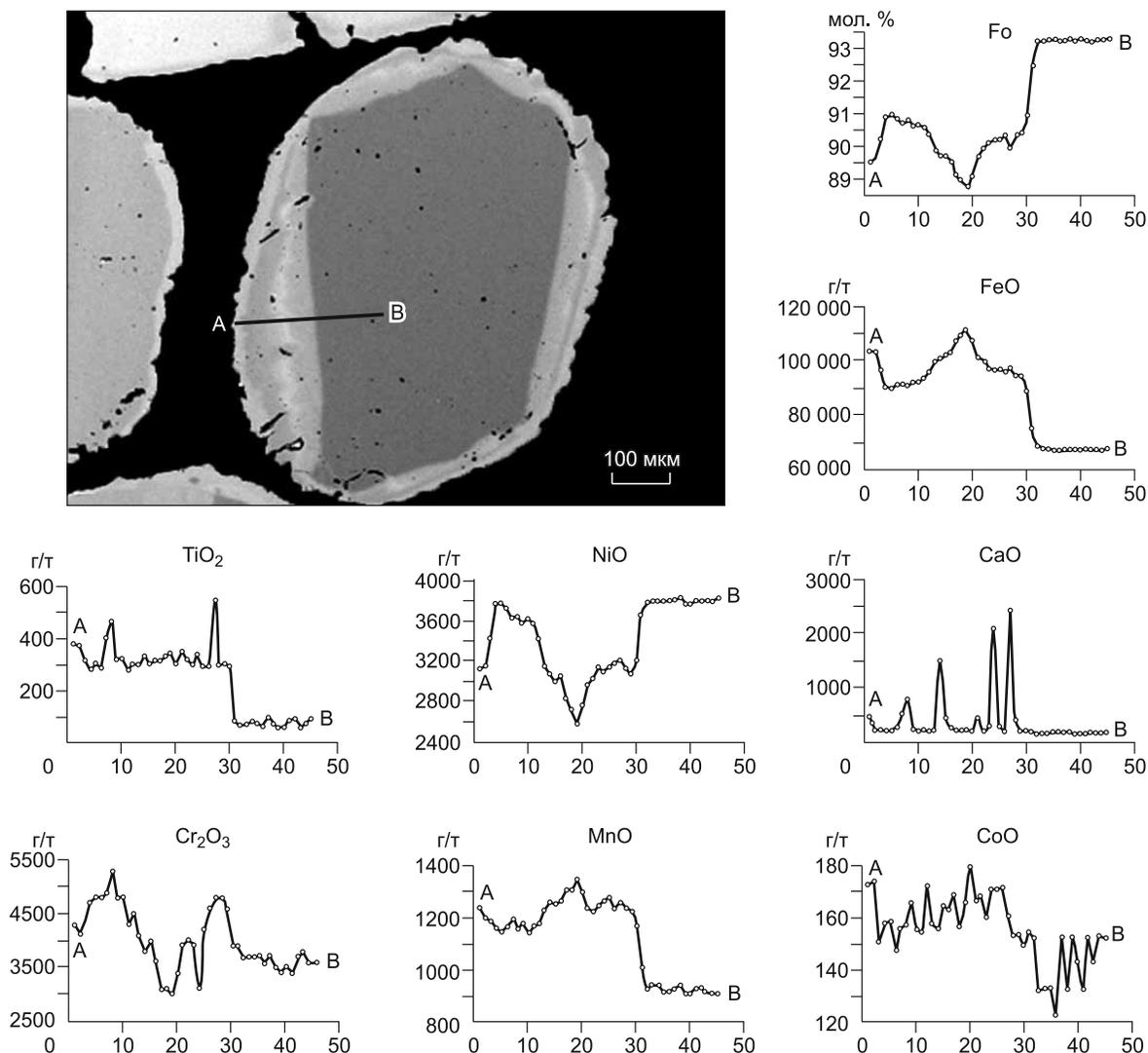


Рис. 16. Деталь (см. околнуренный прямоугольник на рис. 15) сложной зональности периферийной области вкрапленника оливина «e» (см. рис. 11) на элементных картах по содержанию Ni, Mg, Co, Fe и Na.

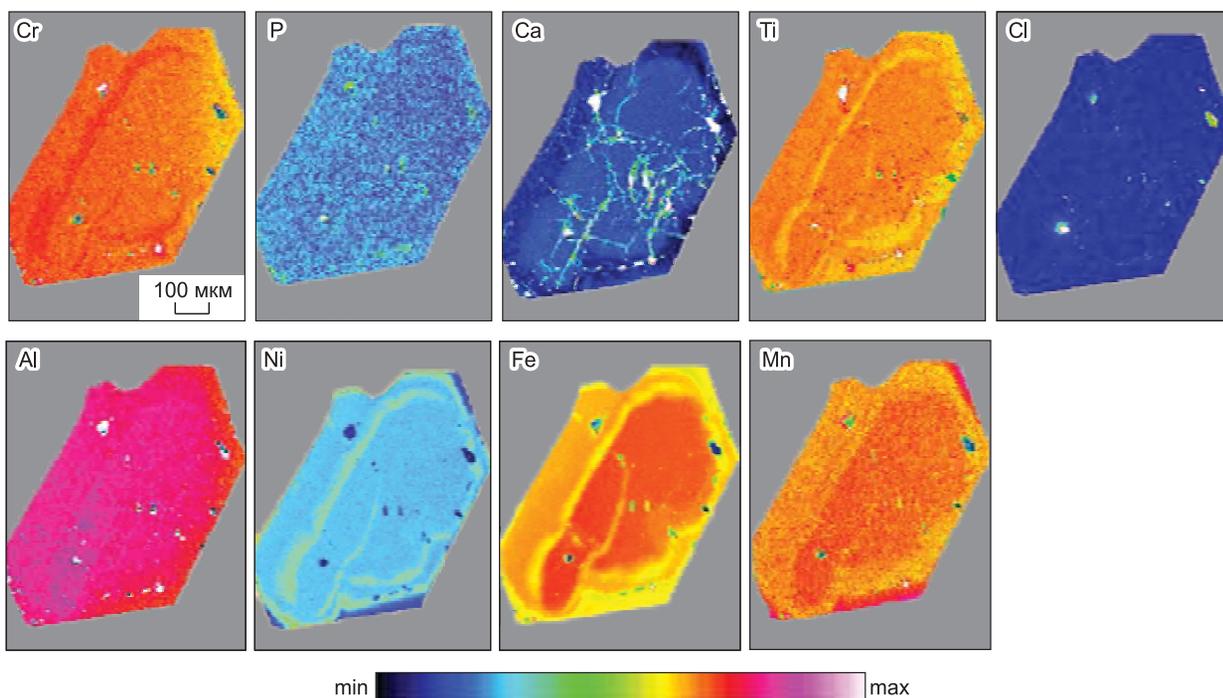
Слева вверху изображение в обратнорассеянных электронах.



**Рис. 17. Профиль по линии А—В через зональную периферийную область вкрапленника оливина «е» (см. рис. 11, 16) до однородной внутренней зоны.**

Наиболее четко зональность прослеживается по сопряженному изменению содержания FeO, Fo и примесей MnO и NiO.

более представительный материал по определению содержания примеси Ti в оливинах накоплен именно для кимберлитовой тр. Удачная [Sobolev et al., 2008, 2009], такое сопоставление может представить особый интерес для сопоставления с другими кимберлитами. На рис. 8 нанесены точки, показывающие соотношение содержания Ti и Fo для однородных внутренних зон вкрапленников оливина тр. Удачная-Восточная, а также соответствующие точки для внешних кайм этих же вкрапленников. Отдельными символами показано положение точек состава оливинов, содержащих включения клинопироксена и пирропа (см. табл. 2). Данная область, свидетельствующая о парагенезисе оливина, оконтурена. С целью сопоставления с вероятными источниками реликтов внутренних частей вкрапленников в оливине, на этом же графике помещены оконтуренные области составов оливина из зернистых (низкотемпературных) деформированных (высокотемпературных) перидотитов тр. Удачная по опубликованным данным [Sobolev et al., 2009]. Для сравнения вкрапленников со всеми возможными парагенезисами оливина на графике рис. 8 показано также поле состава оливинов, включенных в алмазах [Sobolev et al., 2009]. Сопоставление особенностей состава разных оливинов из одной и той же кимберлитовой трубки показывает, что абсолютное большинство вкрапленников содержит более 150 г/т Ti, включая и все без исключения вкрапленники, с включениями пироксена и пирропа. Именно эти включения определяют лерцолитовый парагенезис вкрапленников. Таким образом, на графике рис. 8 появляется возможность сопоставления

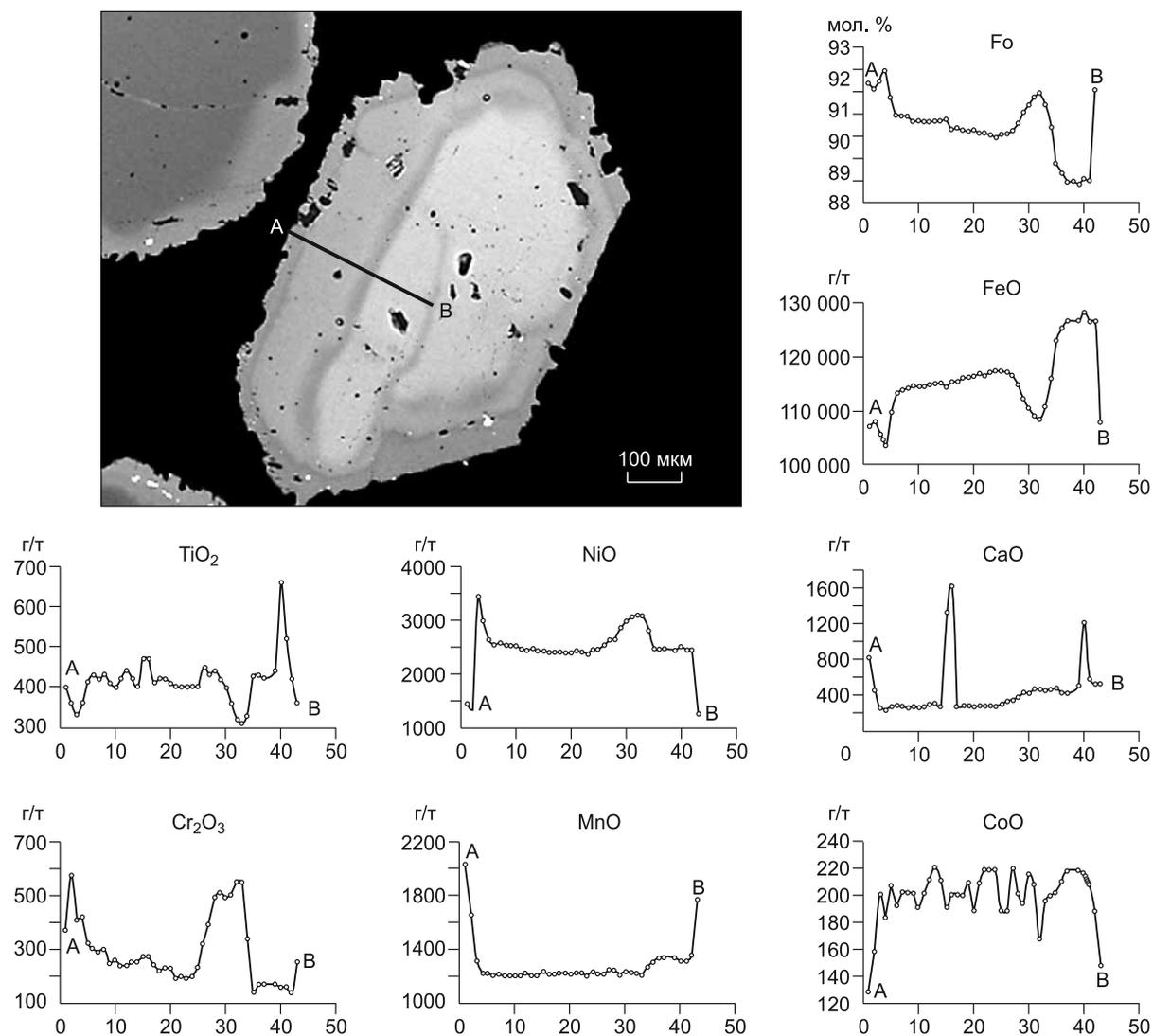


**Рис. 18.** Элементные карты вкрапленника оливина (см. рис. 11), демонстрирующие зональность по содержанию Cr, P, Ca, Ti, Al, Ni, Fe, Mn, и отсутствие примеси Cl.

состава оливинов лерцолитовых парагенезисов низко- и высокотемпературных перидотитовых ксенолитов тр. Удачная и однородных реликтов внутренних частей вкрапленников. Составы включений пиропов из вкрапленников оливина по диапазону содержания  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , превышающему 9 мас. %, практически не отличаются от пиропов из ксенолитов зернистых и деформированных перидотитов. Составы пироксенов характеризуются высокими значениями Ca# 43.3—46.2, подтверждающими их более низкотемпературный характер по сравнению с ксенолитами деформированных перидотитов, пироксены которых отличаются значениями Ca#, как правило, не превышающими 40.

Таким образом, затравками для абсолютного большинства вкрапленников оливина не могли служить оливины высокотемпературных перидотитов. Вероятно, такими затравками в большинстве случаев могли быть оливины из полностью дезинтегрированных зернистых пироповых лерцолитов с повышенным содержанием примеси Ti, для которых отсутствуют аналоги среди ксенолитов, известных в кимберлитах. В то же время неравновесный характер изолированных включений клинопироксена во вкрапленнике оливина однородного состава (см. табл. 1, 2, рис. 7) противоречит такому предположению.

Как отмечено в одном из недавних обзоров, посвященных исследованию оливинов как представителей наиболее ранних процессов мантийного проявления [Foley et al., 2013], изучение состава примесных элементов в оливинах представляет собой быстро развивающееся важное направление исследований, способствующее выявлению различий оливинов вулканических и мантийных пород. Вместе с тем нельзя согласиться с утверждением, что мантийные оливины отличаются от оливинов вулканических пород низким содержанием Ti (< 70 г/т) и часто также Cr [Foley et al., 2013]. Представленные в настоящей статье результаты противоречат такому выводу. Оливины не только особо глубинных деформированных перидотитов содержат до 300 г/т Ti [Sobolev et al., 2009], но и оливины лерцолитового (с пиропом) парагенезиса вкрапленников тр. Удачная также характеризуются повышенным содержанием Ti > 150 г/т. Характерной особенностью множественных включений клинопироксена в абсолютно однородном вкрапленнике оливина (см. среднее из 109 анализов по двум профилям оливин 1 в табл. 2) являются широкие колебания их состава, в особенности по содержанию CaO и  $\text{Na}_2\text{O}$ , вплоть до состава, соответствующего не только хромдиопсиду, но и хромомфациту с содержанием до 6 мас. %  $\text{Na}_2\text{O}$  (см. рис. 7 и табл. 1). Такой неравновесный состав пироксенов в однородном зерне оливина не позволяет рассматривать подобный парагенезис в качестве реликта особого пиропового перидотита. Здесь можно предположить проявление интенсивного метасоматоза на ранних, особо глубинных стадиях становления кимберлита с последующей регенерацией оливина в процессе его внедрения.

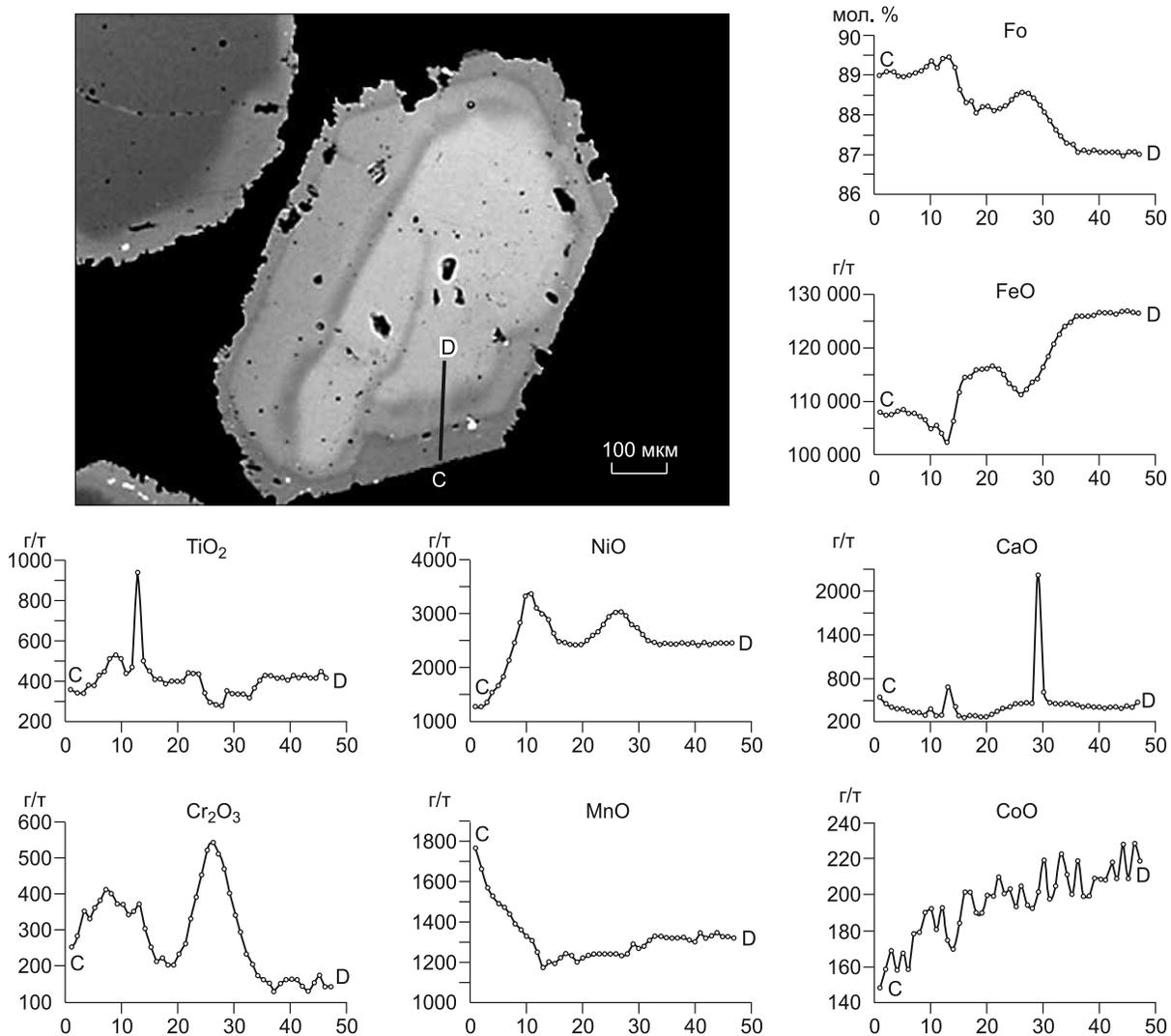


**Рис. 19.** Профиль по линии А—В через вкрапленник оливина «Ж» (см. рис. 11).

Наиболее четкие изменения концентрации зафиксированы для содержания FeO, NiO, MnO. Сложный характер зональности подтверждается элементными картами (см. рис. 18).

Особый интерес представляют проявления осцилляционной зональности внешних зон некоторых изученных вкрапленников оливина. Количество таких зон, имеющих правильную огранку, свойственную оливину, достигает как минимум десяти во внешней регенерированной области зерен и сходно с проявлениями подобной зональности в пиропе из кварцитов Дора Майра [Schertl et al., 2004] и в минералах группы пироклора [Sharygin et al., 2009] и в скарновых гранатах [Zhai et al., 2014].

В течение достаточно длительного времени продолжается дискуссия о роли воды и флюидов сложного состава в образовании алмазов, кимберлитов и глубинных эклогитов и перидотитов. При анализе ранних результатов изучения проблемы природного и экспериментального алмазообразования В.С. Соболев [1960] впервые обратил внимание на важную роль флюидов. Развитие микроаналитических возможностей позволило выявить флюиды сложного состава, содержащие Cl в алмазах [Izraeli et al., 2001; Logvinova et al., 2008; Klein-BenDavid et al., 2014]. Широкое развитие джерфишерита как в виде включений в алмазах, так и в кимберлитах различных регионов [Clarke et al., 1994; Шарыгин и др., 2011, 2012], выявление высокотемпературного силиката содалита в кимберлите [Kamenetsky et al., 2004] и алмазоносном эклогите тр. Удачная [Misra et al., 2004], установление повышенной примеси Cl (0.35—0.5 мас. %) во включениях флогопита в алмазах [Соболев и др., 2009б] и серии флюидных микровключений,



**Рис. 20. Профиль по линии С—D через вкрапленник оливина «жс» (см. рис. 11).**

Характерна отрицательная корреляция содержания FeO и NiO, а также положительная корреляция содержания примесей NiO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.

обогащенных Cl в алмазах из эклогита этой же трубки [Зедгенизов и др., 2007; Bondre, 2009] и алмазах других регионов [Izraeli et al., 2001] противоречит гипотезе о влиянии Cl приповерхностных рассолов на образование хлорсодержащих минералов в кимберлитах тр. Удачная [Корулова et al., 2013]. Результаты изотопных исследований рассолов и самих кимберлитов также противоречат указанной гипотезе [Алексеев и др., 2007].

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Впервые доказан высокobarический парагенезис однородных внутренних зон неправильной формы во вкрапленниках оливина кимберлита тр. Удачная-Восточная. Серия включений пиропы с широкими вариациями содержания Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> вплоть до 9 мас. % в парагенезисе с клинопироксеном однозначно свидетельствует о лерцолитовом парагенезисе реликтов оливина. Повышенное содержание Ti (>150 г/т), вмещающего оливина и неравновесный характер множественных включений клинопироксена противоречит предположению о присутствии реликтов гипотетических пироповых лерцолитов в виде затравок роста вкрапленников оливина. Нами предполагается, что Ti-содержащие оливины, составляющие абсолютное большинство (более 70 % изученных образцов), представляют собой часть высокobarического парагенезиса пироповых лерцолитов, сформированных на ранней стадии образования и эволюции кимберлита.

Сложный состав внешних зон изученных зерен оливина, иногда превышающих десять зон, свидетельствует о быстрой смене условий роста и растворения в процессе эволюции кимберлитов.  
Работа поддержана интеграционным проектом № 22 СО РАН.

#### ЛИТЕРАТУРА

**Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.Г., Мальковец В.Г., Соболев Н.В.** Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // ДАН, 2004, т. 399 (1), с. 95—99.

**Алексеев С.В., Алексеева Л.П., Борисов В.Н., Шоуакар-Сташ О., Фрейп Ш., Шабо Ф., Кононов А.М.** Изотопный состав (H, O, Cl, Sr) подземных рассолов Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2007, т. 48 (3), с. 291—304.

**Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харькив А.Д.** Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные уран-свинцовым методом по цирконам // Докл. АН СССР, 1980, т. 254 (1), с. 175—179.

**Ефимова Э.С., Соболев Н.В.** Распространенность кристаллических включений в алмазах Якутии // Докл. АН СССР, 1977, т. 237 (6), с. 1475—1478.

**Зедгенизов Д.А., Ефимова Э.С., Логвинова А.М., Шацкий В.С., Соболев Н.В.** Включения ферропериклаза в микроалмазе из кимберлитовой трубки Удачная // ДАН, 2001, т. 377 (3), с. 381—384.

**Зедгенизов Д.А., Рагозин А.Л., Шацкий В.С.** Хлорид-карбонатный флюид в алмазах из ксенолита эклогита // ДАН, 2007, т. 415, с. 961—964.

**Кинни П.Д., Гриффин Б.Дж., Хеамэн Л.М., Брахфогель Ф.Ф., Специус З.В.** Определение U-Pb возрастов перовскитов из якутских кимберлитов ионно-ионным масс-спектрометрическим (SHRIMP) методом // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (1), с. 91—99.

**Киселев А.И., Ярмолюк В.В., Иванов А.В., Егоров К.Н.** Пространственно-временные отношения среднепалеозойских базитов и алмазоносных кимберлитов на северо-западном плече Вилюйского рифта (Сибирский кратон) // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (2), с. 185—196.

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

**Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Хохряков А.Ф., Крук А.Н.** Условия кристаллизации алмаза в кимберлитовом расплаве по экспериментальным данным // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 254—272.

**Рагозин А.Л., Каримова А.А., Литасов К.Д., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С.** Содержание воды в минералах мантийных ксенолитов из кимберлитов трубки Удачная (Якутия) // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (4), с. 549—567.

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

**Соболев В.С.** Условия образования месторождений алмазов // Геология и геофизика, 1960 (1), с. 7—22.

**Соболев Н.В.** О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика, 1971 (3), с. 70—80.

**Соболев Н.В.** Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1974, 264 с.

**Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н., Соболев Е.В.** Хромовые пиропы из алмазов Якутии // Докл. АН СССР, 1969, т. 189 (1), с. 162—165.

**Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Реймерс Л.Ф., Захарченко О.Д., Махин А.И., Усова Л.В.** Минеральные включения в алмазах Архангельской кимберлитовой провинции // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (2), с. 358—370.

**Соболев Н.В., Логвинова А.М., Зедгенизов Д.А., Ефимова Э.С., Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В.** Аномально высокое содержание примеси никеля во включениях оливина из микроалмазов кимберлитовой трубки Юбилейная (Якутия) // ДАН, 2000, т. 375 (3), с. 393—396.

**Соболев Н.В., Логвинова А.М., Ефимова Э.С.** Сингенетические включения флогопита в алмазах кимберлитов: свидетельство роли летучих в образовании алмазов // Геология и геофизика, 2009б, т. 50 (12), с. 1588—1606.

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

- Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.** Коренные месторождения алмазов мира. М., Недра, 1998, 555 с.
- Чепуров А.И., Жимулев Е.И., Агафонов Л.В., Сонин В.М., Чепуров А.А., Томиленко А.А.** Устойчивость ромбического и моноклинного пироксенов, оливина и граната в кимберлитовой магме // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (4), с. 533—544.
- Шарыгин И.С., Головин А.В., Похиленко Н.П.** Джерфишерит в кимберлитах Куойкского поля как индикатор обогащения хлором кимберлитовых расплавов // ДАН, 2011, т. 436 (6), с. 820—826.
- Шарыгин И.С., Головин А.В., Похиленко Н.П.** Джерфишерит в ксенолитах деформированных перидотитов трубки Удачная-Восточная (Якутия): проблемы происхождения и связь с кимберлитовым магматизмом // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (3), с. 321—340.
- Шимизу Н., Соболев Н.В., Ефимова Э.С.** Химическая гетерогенность гранатовых включений и ювенильность перидотитовых алмазов из Сибири // Геология и геофизика, 1997, т. 53 (2), с. 337—352.
- Armstrong J.P., Wilson M., Barnett R.L., Nowicki T., Kjarsgaard B.A.** Mineralogy of primary carbonate-bearing hypabyssal kimberlite, Lac de Gras, Slave Province, Northwest Territories, Canada // Lithos, 2004, v. 76, p. 415—433.
- Arndt N.T., Guitreau M., Boullie A.M., le Roex A., Tommasi A., Cordier P., Sobolev A.** Olivine and the origin of kimberlite // J. Petrol., 2010, v. 51, p. 573—602.
- Bernstein S., Szilas K., Kelemen P.B.** Highly depleted cratonic mantle in West Greenland extending into diamond stability field in the Proterozoic // Lithos, 2013, v. 168—169, p. 160—172.
- Berry A.J., Walker A.M., Hermann J., O'Neill H.S.C., Foran G.J., Gale J.D.** Titanium substitution mechanism in forsterite // Chem. Geol., 2007, v. 242, p. 176—186.
- Bondre N.Y.** Salt up the pipe // Nature Geosci., 2009, v. 2, p. 604.
- Brett R.C., Russelle J.R., Moss S.** Origin of olivine in kimberlite: phenocryst or impostor? // Lithos, 2009, v. 112S, p. 201—212.
- Brey G.P., Kohler T.** Geothermobarometry in four-phase lherzolites II: new thermobarometers and practical assessment of existing thermobarometers // J. Petrol., 1990, v. 31, p. 1353—1378.
- Clarke D.B., Mitchell R.H., Chapman C.A.T., Mackay R.M.** Occurrence and origin of djerfisherite from the Elwin Bay kimberlite, Somerset island, Northwest Territories // Canad. Miner., 1994, v. 32, p. 815—823.
- De Hoog J.C.M., Gall L., Cornell D.H.** Trace-element geochemistry of mantle olivine and application to mantle petrogenesis and geothermobarometry // Chem. Geol., 2010, v. 270, p. 196—215.
- Foley S.F., Prelevic D., Rehfeldt T., Jacob D.E.** Minor and trace elements in olivines as probes into early igneous and mantle melting processes // Earth Planet. Sci. Lett., 2013, v. 363, p. 181—191.
- Hermann J., O'Neill H.S.C., Berry A.J.** Titanium solubility in olivine in system  $TiO_2$ — $MgO$ — $SiO_2$ : no evidence for an ultradeep origin of Ti-bearing olivines // Contr. Miner. Petrol., 2005, v. 148, p. 746—760.
- Hervig R.L., Steele L.M.** et al. Diamonds: minor elements in silicate inclusions: pressure-temperature implications // J. Geophys. Res., 1980, v. 85 (B12), p. 6919—6929.
- Hilchie L., Fedortchuk Y., Matveev S., Kopylova M.** The origin of high hydrogen content in kimberlitic olivine: Evidence from hydroxyl zonation in olivine from kimberlites and mantle xenoliths // Lithos, 2014, v. 202—203, p. 429—441.
- Izraeli E.S., Harris J.W., Navon O.** Brine inclusions in diamonds: a new upper mantle fluid // Earth Planet. Sci. Lett., 2001, v. 187, p. 323—332.
- Jarosevich E.J., Nelen J.A., Norberg J.A.** Reference sample for electron microprobe analysis // Geostand. Newsl., 1980, v. 4, p. 43—47.
- Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Maas R., Danyushevsky L.V., Thomas R., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V.** Kimberlite melts rich in alkali chlorides and carbonates: A potent metasomatic agent in the mantle // Geology, 2004, v. 32, № 10, p. 845—848.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.V., Demouchy S., Faure K., Sharygin V.V., Kuzmin D.V.** Olivine in the Udachnaya-East kimberlite (Yakutia, Russia): types compositions and origins // J. Petrol., 2008, v. 49, № 4, p. 823—839.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Weiss Y., Navon O., Nielsen T.F.D., Mernagh T.P.** How unique is the Udachnaya-East kimberlite? Comparison with kimberlites from the Slave Craton (Canada) and SW Greenland // Lithos, 2009a, v. 112, p. 334—346.
- Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.V., Sharygin V.V., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V.** Can pyroxenes be liquidus minerals in the kimberlite magma? // Lithos, 2009b, v. 112, Suppl., (1), p. 213—222.

**Kamenetsky V.S., Maas R., Kamenetsky M.B., Paton C., Phillips D., Golovin A.V., Gornova M.A.** Chlorine from the mantle: Magmatic halides in the Udachnaya-East kimberlite, Siberia // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2009c, v. 285, p. 96—104.

**Klein-BenDavid O., Pearson D.G., Nowell G.M., Ottley C., Mc Neill J.C.R., Logvinova A., Sobolev N.V.** The sources and time-integrated evolution of diamond-forming fluids — Trace elements and isotopic evidence // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2014, v. 125, p. 146—169.

**Köhler T.P., Brey G.P.** Calcium exchange between olivine and clinopyroxene calibrated as a geothermobarometer for natural peridotites from 2 to 60 kb with applications // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1990, v. 54, p. 2375—2388.

**Kopylova M.G., Kostrovitsky S.I., Egorov K.N.** Salts in southern Yakutian kimberlites and the problem of primary alkali kimberlite melts // *Earth Sci. Rev.*, 2013, v. 119, p. 1—16.

**Logvinova A.M., Wirth R., Fedorova E.N., Sobolev N.V.** Nanometre-sized mineral and fluid inclusions in cloudy Siberian diamonds: new insights on diamond formation // *Eur. J. Miner.*, 2008, v. 20, p. 317—331.

**Meyer H.O.A.** Inclusions in diamond / Ed. P.H. Nixon // *Mantle xenoliths*. Wiley, Chichester, 1987, p. 501—522.

**Milman-Barris M.S., Beckett J.R., Baker M.B., Hofmann A.E., Morgan Z., Crowley M.R., Vielzeuf D., Stolper E.** Zoning of phosphorous in igneous olivine // *Contr. Miner. Petrol.*, 2008, v. 155, p. 739—765.

**Misra K.C., Anand M., Taylor L.A., Sobolev N.V.** Multi-stage metasomatism of diamondiferous eclogite xenoliths from the Udachnaya kimberlite pipe, Yakutia, Siberia // *Contr. Miner. Petrol.*, 2004, v. 146, № 6, p. 696—714.

**Mitchell R.H.** Composition of olivine, silica activity and oxygen fugacity in kimberlite // *Lithos*, 1973, v. 6, p. 65—81.

**Mitchell R.H.** Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. New York, Plenum, 1986.

**Mitchell R.H.** Petrology of hypabyssal kimberlites: relevance to primary magma compositions // *J. Volcanol. Geotherm. Res.*, 2008, v. 174, p. 1—8.

**Moore A.E.** The case for a cognate, polybaric origin for kimberlitic olivines // *Lithos*, 2012, v. 131, p. 1—10.

**Moss S., Russell J.K., Scott-Smith B.H., Brett R.C.** Olivine crystal size distribution in kimberlite // *Amer. Miner.*, 2010, v. 95, p. 527—536.

**Nimis P., Zanetti A., Dencker I., Sobolev N.V.** Major and trace element composition of chromian diopsides from the Zagadochnaya kimberlite (Yakutia, Russia): Metasomatic processes, thermobarometry and diamond potential // *Lithos*, 2009, v. 112, p. 397—412.

**Schertl H.-P., Neuser R.D., Sobolev N.V., Shatsky V.S.** UHP-metamorphic rocks from Dora Maira/Western Alps and Kokchetav/Kazakhstan: New insights using cathodoluminescence petrography // *Eur. J. Miner.*, 2004, v. 16, p. 49—57.

**Sharygin V.V., Sobolev N.V., Channer D.M.DeR.** Oscillatory-zoned crystals of pyrochlore-group minerals from the Guaniamo kimberlites, Venezuela // *Lithos*, 2009, v. 112S, p. 976—985.

**Shirey S.B., Cartigny P., Frost D.J., Keshaw S., Nestola F., Nimis P., Pearson D.G., Sobolev N.V., Walter M.J.** Diamonds and the geology of mantle carbon // *Rev. Miner. Geochem.*, 2013, v. 75, p. 355—421.

**Simkin T., Smith J.V.** Minor element distribution in olivine // *J. Geol.*, 1970, v. 78, p. 304—325.

**Sobolev A.V., Sobolev N.V., Smith Ch.B., Dubessy J.** Fluid and melt compositions in lamproites and kimberlites based on the study of inclusions in olivine / Ed. J. Ross // *Kimberlites and related rocks. Their composition, occurrence, origin and emplacement*. Blackwell Scientific Publications, Sydney, 1989, v. 2, p. 220—240.

**Sobolev A.V., Hofmann A.W., Sobolev S.V., Nikogosian I.K.** An olivine-free mantle source of Hawaiian shield basalts // *Nature*, 2005, v. 434, p. 590—597.

**Sobolev A.V., Hofmann A.W., Kuzmin D.V., Yaxley G.M., Arndt N.T., Chung S.-L., Danyushevsky L.V., Elliott T., Frey F.A., Garcia M.O., Gurenko A.A., Kamenetsky V.S., Kerr A.C., Krivolutskaya N.A., Matvienkov V.V., Nikogosian I.K., Rocholl A., Sigurdsson I.A., Sushchevskaya N.M., Teklay M.** The amount of recycled crust in sources of mantle-derived melts // *Science*, 2007, v. 316 (5823), p. 412—417.

**Sobolev A.V., Batanova V.G., Krashennikov S., Borisov A., Arndt N., Kuzmin D.V., Krivolutskaya N., Sushevskaya N.** Potential temperatures of sources of MORB, OIB and LIP's based on Al partitioning between olivine and spinel // *Abstract VIIC-06, AGU Fall Meeting*, 2013.

**Sobolev N.V., Lavrent'ev Y.G.** Isomorphic sodium admixture in garnets formed at high pressures // *Contr. Miner. Petrol.*, 1971, v. 31, p. 1—12.

**Sobolev N.V., Lavrentev Y.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V.** Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // *Contr. Miner. Petrol.*, 1973, v. 40 (1), p. 39—52.

**Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Seryotkin Y.V., Yefimova E.S., Floss C., Taylor L.A.** Mineral inclusions in microdiamonds and macrodiamonds from kimberlites of Yakutia: a comparative study // *Lithos*, 2004, v. 77, № 1—4, p. 225—242.

**Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Kuzmin D.V., Sobolev A.V.** Olivine inclusions in Siberian diamonds: high-precision approach to minor elements // *Europ. J. Miner.*, 2008, v. 20, № 3, p. 305—315.

**Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., Sobolev A.V.** Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // *Lithos*, 2009, v. 112, Suppl. 2, p. 701—713.

**Sokol A.G., Kupriyanov I.N., Palyanov Y.N., Kruk A.N., Sobolev N.V.** Melting experiments on the Udachnaya kimberlite at 6.3—7.5 GPa: Implications for the role of H<sub>2</sub>O in magma generation and formation of hydrous olivine // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2013, v. 101, p. 133—155.

**Stachel T., Harris J.W.** The origin of cratonic diamonds—constraints from mineral inclusions // *Ore Geol. Rev.*, 2008, v. 34, p. 5—32.

**Stachel T., Harris J.W.** Formation of diamond in the Earth's mantle // *J. Phys. Condens. Matter*, 2009, v. 21, p.

**Zhai D.-G., Liu J.-J., Zhang H.Y., Wang J.P., Yang X.A., Wu S.H.** Origin of oscillatory zoned garnets from the Xieertala Fe-Zn skarn deposit, northern China: in situ LA-ICP-MS-evidence // *Lithos*, 2014, v. 190—191, p. 279—291.

**Zibera L., Nimis P., Zanetti A., Sobolev N.V.** Metasomatic processes in the Central Siberian cratonic mantle: Evidence from garnet-xenocrysts from the Zagadochnaya kimberlite // *J. Petrol.*, 2013, v. 54(11), p. 2379—2409.

**Wan Z., Coogan L.A., Canil D.** Experimental calibration of aluminum partitioning between olivine and spinel as a geothermometer // *Amer. Miner.*, 2008, v. 93, p. 1142—1147.

*Поступила в редакцию  
22 августа 2014 г.*