

## НАУКИ О ЗЕМЛЕ

### Геология и полезные ископаемые

УДК 552.323.6:553(576.56)

<https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-9-26>

Оригинальная статья

### Структурно-вещественные неоднородности кимберлитов как отражение особенностей их петрогенеза

В. А. Минин<sup>1,✉</sup>, А. В. Толстов<sup>2</sup>, М. В. Мальцев<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, г. Новосибирск, Российская Федерация

<sup>2</sup>Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, г. Якутск, Российская Федерация

<sup>3</sup>Вилюйская ГРЭ, АК «АЛРОСА» (ПАО), г. Мирный, Российская Федерация

✉minin@igm.nsc.ru

#### Аннотация

Приведены новые данные по геологическому строению и петрохимическим характеристикам первой кимберлитовой трубы в Сюльдюкарском кимберлитовом поле и ее позиции в Ыгыаттинском алмазоносном районе. Впервые выполнена петрографическая идентификация петрохимических разновидностей кимберлитов в данном районе. Изучены с использованием современного аппаратурного комплекса составы породообразующих и акцессорных минералов кимберлитов. Показано, что направленное изменение структурно-вещественных характеристик кимберлитов от периферических к центральным частям в протяженных вертикальных телах типа Сюльдюкарской трубы выражено в смене кальциевых кимберлитов магниевыми кимберлитами. Отмечается, что Mg-кимберлиты характеризуются наиболее крупными кристаллами алмаза, гранатов и ильменитов, повышенными содержаниями магния и ряда других компонентов. Все эти изменения в кимберлита обусловлены процессами дифференциации течения. Приведенные сведения позволяют применять полученные петрологические результаты по кимберлитам Сюльдюкарской трубы в качестве поисковых критериев прогнозирования и выявления новых кимберлитовых тел в Ыгыаттинском алмазоносном районе.

**Ключевые слова:** Якутская алмазоносная провинция, Сюльдюкарская трубка, кимберлит, петрохимия, петрология, дифференциация течения

**Финансирование.** Работа выполнена по государственному заданию ИГАБМ СО РАН и ИГМ СО РАН. Финансирующая организация: Министерство науки и высшего образования Российской Федерации.

**Для цитирования:** Минин В.А., Толстов А.В., Мальцев М.В. Структурно-вещественные неоднородности кимберлитов как отражение особенностей их петрогенеза. *Природные ресурсы Арктики и Субарктики*. 2023;28(1):9–26. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-9-26>

Original article

### Heterogeneity in kimberlite structure and composition as a reflection of its petrogenesis peculiarities

V. A. Minin<sup>1,✉</sup>, A. V. Tolstov<sup>2</sup>, M. V. Maltsev<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Sobolev Institute of Geology and Mineralogy,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Novosibirsk, Russian Federation

<sup>2</sup>Diamond and Precious Metal Geology Institute,

Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Yakutsk, Russian Federation

<sup>3</sup>Vilyuiskaya GRE, AK “ALROSA” (PJSC), Mirny, Russian Federation

✉minin@igm.nsc.ru

#### Abstract

New data on the geological structure and petrochemical characteristics of the first kimberlite pipe in the Syuldukar kimberlite field and its position in the Ygyatta diamond-bearing area are presented. The petrographic identification of

the petrochemical varieties of kimberlites in this area was performed for the first time. The compositions of the rock-forming and accessory minerals of kimberlites were studied using a modern hardware complex. The results showed that the directed change in the structural and material characteristics of kimberlites from peripheral to central parts in extended vertical bodies of the Syuldyukar tube type is expressed in the replacement of calcium kimberlites by magnesium kimberlites. Mg-kimberlites are characterized by the largest crystals of diamond, garnets, and ilmenites, high concentrations of magnesium, and a number of other components. All of these changes in kimberlites are caused by flow differentiation. This information allowed us to apply the obtained petrological results to the kimberlites of the Syuldyukar tube as search criteria for forecasting and identifying new kimberlite bodies in the Ygyatta diamond-bearing area.

**Keywords:** Yakut diamond-bearing province, Syuldyukar pipe, kimberlite, petrochemistry, petrology, flow differentiation

**Funding.** This study was carried out within the framework of the state assignment to the DPMGI SB RAS and IGM SB RAS and financially supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation. Analytical work was conducted at the “Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research SB RAS”.

**For citation:** Minin V.A., Tolstov A.V., Maltsev M.V. Heterogeneity in kimberlite structure and composition as a reflection of its petrogenesis peculiarities. *Arctic and Subarctic Natural Resources*. 2023;28(1):9–26. (In Russ.); <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2023-28-1-9-26>

## Введение

При исследовании особенностей формирования массивов интрузивных горных пород важнейшей задачей является получение представления об их внутренней структуре. Обычно использующийся для этих целей метод картирования состоит в экстраполяции границ неоднородностей вниз до разумной глубины и получении объемной модели тела. Информативными признаками неоднородности, в данном контексте, служат поверхности раздела, отделяющие один этап интрузивного процесса от другого, следы расслоенности и зональности, выражющиеся в смене минеральных парагенезисов, в изменении текстурно-структурного облика породы, составов минералов, состава породы в целом, и многие другие. Знание о распределении неоднородностей, в свою очередь, позволяет обоснованно выбирать вероятную петрологическую модель процесса, ответственного за их возникновение, а также вскрывать причины концентрирования-рассеивания рудного компонента.

При исследовании кимберлитовых диатрем эта простая методическая схема дает сбой, поскольку процессы серпентинизации, практически повсеместно фиксируемые в кимберлитовых телах, ограничивают возможности выявления минералогической зональности. Эти же процессы затрудняют фиксацию интрузивных контактов между продуктами различных фаз внедрения, если таковые имеются. Петрографические характеристики кимберлитов нередко различительно меняются, в том числе и вследствие серпентинизации, в пределах одного штуфного образца. Границы, проведенные между визуально выявленными разновидностями пород, по этим причинам не могут экстраполироваться

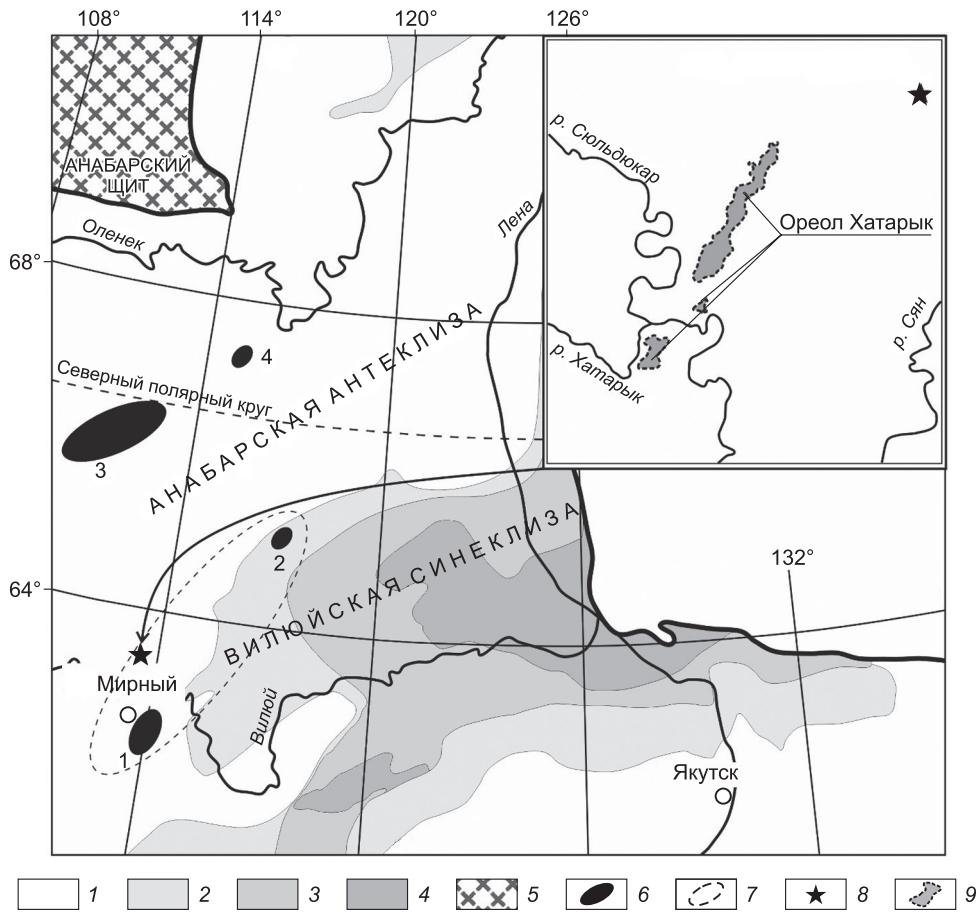
на глубину и, соответственно, не могут нести информацию о структуре кимберлитового тела. Единственным доступным способом, позволяющим количественно оценить возможные неоднородности в объеме кимберлитового тела, по мнению авторов, является системное изучение вариаций химического состава всех слагающих его пород.

Ниже представлены результаты анализа вещественного состава кимберлитов недавно открытой Сюльдюкарской трубы Якутской алмазоносной провинции [8]. Пробы для исследования отбирались по разрезам разведочных скважин через 1–5 м, включая 10-метровые интервалы, каменный материал которых использовался впоследствии для определения алмазоносности кимберлита. В результате были охарактеризованы все гипсометрические уровни трубы, что позволило расшифровать ее внутреннюю структуру и оценить возможные механизмы дифференциации кимберлитового вещества.

## Геологическое положение и строение Сюльдюкарской трубы

Сюльдюкарская трубка представляет собой первую находку кимберлитов в среднем сегменте протяженной Вилойско-Мархинской алмазоносной зоны, в южной части которой локализовано Мирнинское кимберлитовое поле, а в северной – Накынское (рис. 1). Трубка располагается в левом борту р. Сюльдюкар в верховьях ее левого притока р. Сян. Кимберлиты прорывают известняки и мергели раннего кембрия и с размывом перекрываются средне-позднекарбоновыми и пермскими полимиктовыми песчаниками и алевролитами.

Сюльдюкарская кимберлитовая диатрема состоит из двух сближенных уплощенных в ши-



**Рис. 1.** Схема расположения продуктивных кимберлитовых полей Якутской провинции относительно рельефа кристаллического фундамента восточной части Сибирской платформы (по материалам [14]):

1–4 – изогипсы фундамента 0÷–3, –3÷–6, –6÷–10 и –10÷–14 км соответственно; 5 – область выхода кристаллического фундамента на дневную поверхность; 6 – кимберлитовые поля (1 – Мирнинское, 2 – Накынское, 3 – Далдыно-Алакитское, 4 – Верхне-Мунское); 7 – Вилойско-Мархинская алмазоносная зона; 8 – Сульдюкарская трубка; 9 – Хатырыкский ореол

**Fig. 1.** The layout of productive kimberlite fields of the Yakutian province relative to the relief of the crystalline basement of the eastern part of the Siberian platform (based on materials [14]):

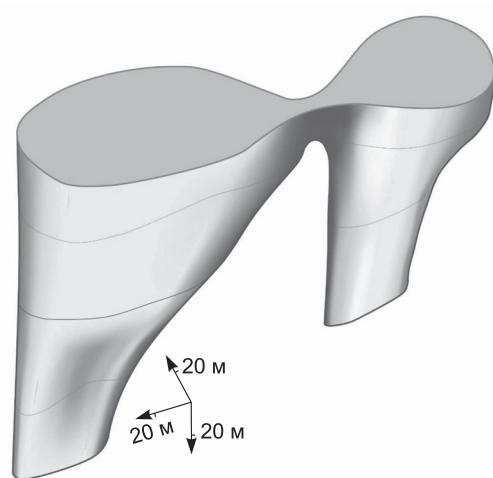
1–4 – foundation isohyps 0÷–3, –3÷–6, –6÷–10 and –10÷–14 km, respectively; 5 – the area of the crystalline basement exit to the daytime surface; 6 – kimberlite fields (1 – Mirinskoye, 2 – Nakynskoye, 3 – Daldino-Alakitskoye, 4 – Verkhne-Munskoye); 7 – Vilyuysko-Markhinsko-Alakitskaya diamond-bearing zone; 8 – Syulduykar pipe; 9 – Khatyryk aureole

ротном направлении тел (рис. 2). По аналогии с современными вулканами, можно предполагать, что она сформировалась в результате внедрения двух порций кимберлитового расплава, окончательная кристаллизация которых произошла в гипабиссальных условиях на глубинах от 300 до 500 м [1]. Тектоническая трещина, по которой внедрялись расплавы, круто ( $75\text{--}80^\circ$ ) погружается на север. В эндоконтакте кимберлитов не фиксируется изменений их структурного облика. Во вмещающих карбонатных породах (зона экзоконтакта) встречаются редкие и маломощные инъекции (апофизы) кимберлитового материала. В радиусе 10–20 м от трубы в карбонатных по-

родах фиксируются маломощные (до 3 см) и непротяженные прожилки гипс-кальцит-ангидритового состава.

### Петрохимическая характеристика кимберлитов

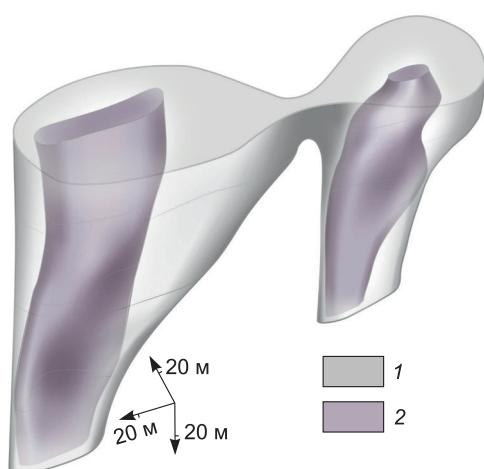
Анализ распределения содержаний главных оксидов по разрезам буровых скважин показал, что составы кимберлитов трубы подвержены весьма значительным вариациям. На расстоянии первых метров концентрации отдельных компонентов отклоняются на 20–30 % от средних значений в обе стороны. При таком разбросе значений исследование основных тенденций изменения со-



**Рис. 2.** Объемная модель Сюльдюкарской трубы, построенная по данным разведочного бурения

**Fig. 2.** 3-D model of the Syuldukar pipe, constructed according to the data of exploration drilling

ства кимберлитов в масштабе трубы возможно только методом группировки данных, в частности, выделением квазиоднородных по своему химическому составу групп пород. Используя для этого метод кластерного анализа (К-метод, программный пакет «Statistica»), установили, что в породах трубы отчетливо обособливаются две дискретные совокупности – Ca-кимберлиты и Mg-кимберлиты (табл. 1). Нанесение полученных результатов на разрезы скважин показало, что каждый кластер занимает вполне определенное место в пространстве – Mg-кимберлиты приурочены к осевым частям тел, кальциевые, обтекая магниевые, формируют их внешнюю «оболочку» (рис. 3). Сюльдюкарская трубка, таким образом, представляет собой комбинацию двух дифференцированных тел, в которых кимберлиты центральных частей обогащены магниевым компонентом,



**Рис. 3.** Внутренняя структура Сюльдюкарской трубы, построенная по петрохимическим данным:

1 – кимберлиты Ca-кластера, 2 – кимберлиты Mg-кластера

**Fig. 3.** The internal structure of the Syuldukar pipe, constructed according to petrochemical data:

1 – kimberlites of the Ca cluster, 2 – kimberlites of the Mg cluster

а периферических – кальциевым. Помимо Ca и Mg кимберлиты центральных и периферических частей тел различаются по содержаниям Ti, Al и K (табл. 2).

Описанный феномен не является уникальным для Якутской кимберлитовой провинции. Направленные (от периферии к центру) увеличение содержаний MgO и, соответственно, снижение CaO установлены в кимберлитах Ботубинской трубы [9], в кимберлитах обоих тел трубы Удачная, трубы Новинка [12].

Появление такого рода вещественной неоднородности в протяженных трубообразных телах возможно в двух случаях – либо в результате нескольких последовательных внедрений из про-

**Средние содержания главных оксидов в кластерных группах кимберлитов Сюльдюкарской трубы**

**Average contents of the main oxides in the kimberlite cluster groups of the Syuldukar pipe**

Кластер	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	LOI
1	24,58	1,08	2,36	5,07	0,07	22,54	19,07	0,02	0,39	0,56	23,29
2	16,07	1,71	3,30	5,14	0,11	12,15	30,23	0,03	0,93	0,66	28,46

*Примечание:* 1 – магниевый кластер (n = 42), 2 – кальциевый кластер (n = 56). Анализы выполнялись ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН.

*Note:* 1 – magnesium cluster kimberlites (n = 42), 2 – calcium cluster kimberlites (n = 56). The analyses were carried out by Analytical Center for Multi-Elemental and Isotope Research SB RAS.

Таблица 2

**Средние составы петрохимических разновидностей кимберлитов  
Западного и Восточного тел Сюльдюкарской трубы**

Table 2

**Average compositions of petrochemical varieties of kimberlites  
of the Western and Eastern bodies of the Syuldyukar pipe**

Оксид	Западное тело			Восточное тело		
	Са-кимб.	Mg-кимб.	Среднее по телу	Са-кимб.	Mg-кимб.	Среднее по телу
SiO <sub>2</sub>	15,11	23,18	18,09	18,69	26,45	22,92
TiO <sub>2</sub>	1,72	1,22	1,54	1,66	0,90	1,24
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3,22	2,34	2,90	3,50	2,38	2,89
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	5,19	5,22	5,20	5,00	4,88	4,94
MnO	0,11	0,08	0,10	0,09	0,06	0,07
MgO	11,03	20,45	14,51	15,22	25,33	20,74
CaO	31,87	21,26	27,95	25,73	16,14	20,50
Na <sub>2</sub> O	0,04	0,02	0,03	0,02	0,02	0,02
K <sub>2</sub> O	0,84	0,42	0,68	1,17	0,36	0,73
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,67	0,62	0,65	0,64	0,48	0,55
LOI	28,88	24,16	27,14	27,31	22,13	24,48
CaO/MgO	2,9	1,0	1,9	1,7	0,6	1,0
Количество анализов	41	24	65	15	18	33

межуточной камеры, либо в процессе дифференциации одной порции расплава в статических и/или динамических условиях [4, 10]. Отсутствие интрузивных контактов и постепенные взаимопереходы между породными разновидностями в исследуемых телах позволяют отдать предпочтение второму варианту. Реалистичность модели кристаллизационной дифференциации подтверждается и расчетными методами, согласно которым состав Mg-кимберлита может быть превращен в состав Sa-кимберлита простым удалением 30–32 % оливина (рис. 4).

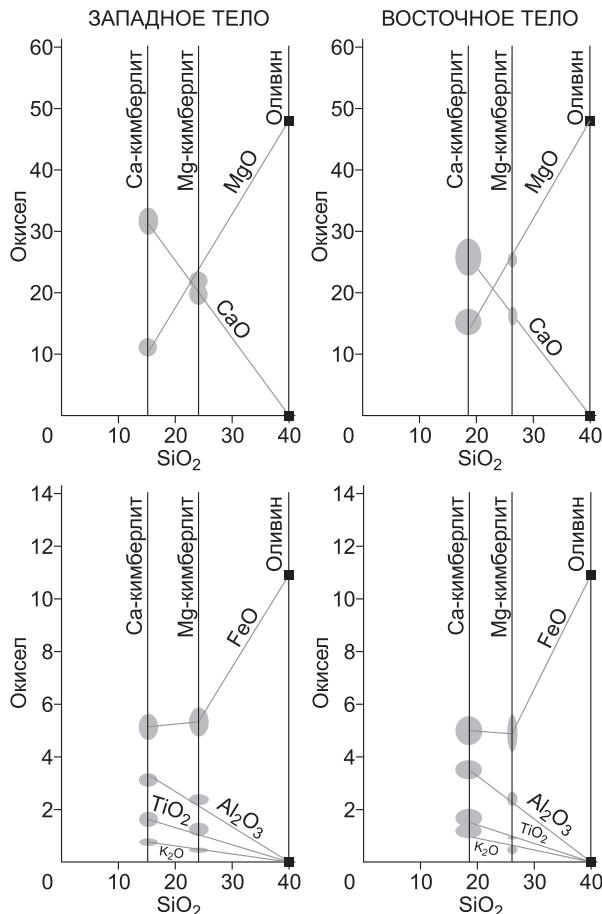
### Петрографическая идентификация петрохимических данных

Непременной составной частью кимберлитов Сюльдюкарской трубы, как, впрочем, и большинства кимберлитов Якутской провинции, являются обломки различных пород, захваченные проторасплавом в процессе его движения к поверхности и консолидации. В подавляющем большинстве случаев это фрагменты вмещающих трубку кембрийских пород, представленные известняками, доломитами, мергелями. В 10 образцах из 140 обнаружены единичные обломки долеритов. Ксенолиты ультраосновных пород в доступной для исследо-

вания коллекции отсутствуют. Размеры ксенолитов карбонатных пород по длинной оси варьируют от 2–3 мм до 5–10 см, в среднем составляя 5–15 мм. Их количество колеблется от 0,1 до 40–50 объемных %. Используя в качестве репера предложенное Клементом и Скиннером [24] значение 15%, мы разделили всю совокупность на кимберлитовые брекчии<sup>1</sup> (>15 % ксенолитов) и собственно кимберлиты (<15 % ксенолитов). Сопоставление полученных результатов с ранее описанными петрохимическими типами кимберлитов показало, что в кимберлитах Sa-клuster'a брекчии составляют 61 % от всей выборки, а в Mg-клuster'e – 9 %. Таким образом, ксенолиты вмещающих пород преимущественно концентрируются в кимберлитах периферических частей тел.

Рассмотрим структурно-текстурные особенности кимберлитов исходя из их принадлежно-

<sup>1</sup> В классификационных схемах последнего времени [23, 35] предлагается исключить из употребления термин «брекчия» применительно к кимберлитам, заменив его характеристиками, базирующимиися на определении размеров и количеств ксенолитов в породе. В контексте данного исследования для более компактного представления материала мы сочли возможным вернуться к термину «кимберлитовая брекчия».



**Рис. 4.** 95%-е доверительные эллипсы средних составов петрохимических разновидностей кимберлитов Сольдукарской трубы и средний состав оливина кимберлитов Якутской провинции. Как видно, фигуративные точки всех компонентов располагаются на прямых линиях, показывая, что образование Mg- и Ca-кимберлитов связано главным образом с кристаллизацией оливина. Состав Mg-кимберлита может быть превращен в состав Ca- удалением 30–32 % оливина

**Fig. 4.** 95 % confidence ellipses of average compositions of petrochemical varieties of kimberlites of the Syuldyukar pipe and the average composition of olivine of kimberlites of the Yakutian province. The figurative points of all components are located on straight lines, showing that the formation of Mg- and Ca-kimberlites is mainly due to the crystallization of olivine. The composition of Ca-kimberlite can be converted into a composition of Mg-kimberlite by removing 30–32 % olivine

сти к выделившимся петрохимическим кластерным группам.

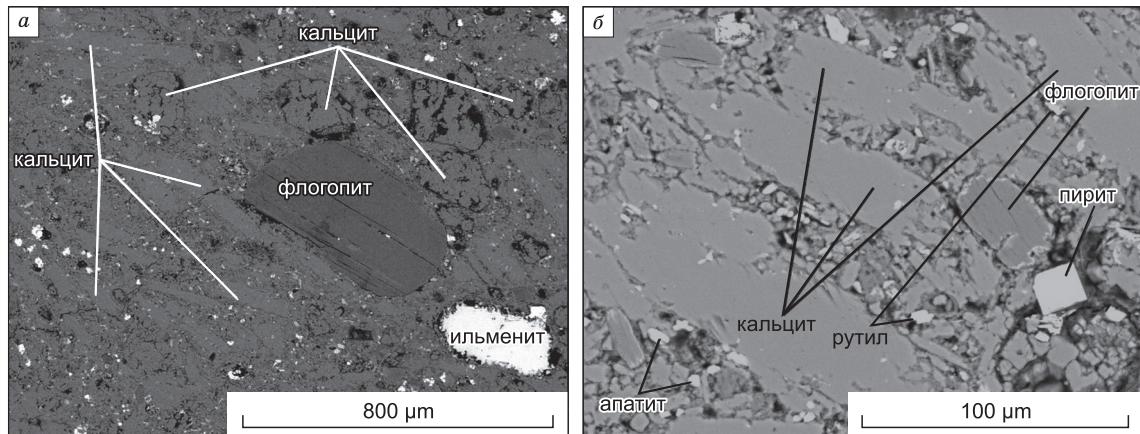
Кимберлиты кальциевого кластера, характеризуются однородным мелко-среднезернистым сложением и отчетливой порфировой структурой. Порфировые вкрапленники, количество которых составляет ~15–25 %, представлены (в порядке убывания) кальцитом, оливином, флогопи-

том, ильменитом. Оливин полностью замещен серпентиновым агрегатом. Размер вкрапленников не превышает 1,2–1,5 мм, максимальное их количество попадает в интервал 0,3–0,6 мм. В зависимости от количественных соотношений оливина и кальцита породы кластера варьируют от кальцитовых до кальцит-оливиновых (кальцит/оливин ~4/1–3/2) разностей. Кимберлиты характеризуются равномерным распределением вкрапленников, формирующих порфировую, иногда с элементами гломеропорфировой, структуру породы в целом (рис. 5, а). Основная масса состоит из ориентированных в одном направлении лейстовидных кристаллов кальцита, промежутки между которыми выполняет микрокристаллический кальцит-флогопит-рутин-апатитовый агрегат (рис. 5, б). С увеличением количества оливина трахитоидные структуры основной массы сменяются массивными, сформированными кристаллами кальцита и оливина, погруженными в серпентин-кальцит-флогопитовый базис. Во всех без исключения кимберлитах присутствуют пиропы, альмандины, шпинели, в 14 % образцов обнаружены алмазы.

Перечисленные петрографические характеристики в равной степени проявлены как в кимберлитах, лишенных ксенолитов, так и в кимберлитовых брекчиях.

**Кимберлиты магниевого кластера** – это массивного сложения порфировые породы, количество вкрапленников в которых составляет 20–35 %. Вкрапленники представлены оливином, ильменитом, флогопитом, кальцитом (рис. 6, а). Оливин полностью замещен серпентиновым или кальцит-серпентиновым минеральными агрегатами. Размер вкрапленников в среднем составляет 0,5–1,2 мм, при разбросе значений от 0,2 до 5–6 мм. Основная (связующая) масса сложена кристаллами оливина, флогопита и кальцита, погруженными в скрытоокристаллическую серпентиновую массу с апатитом, ильменитом, рутилом (рис. 6, б). В Mg-кимберлитах, так же, как и в Ca-кимберлитах, постоянно присутствуют пиропы, альмандины и шпинели, алмаз встречается чаще – в 18 % образцов.

Структурно-текстурные характеристики кимберлитов Mg-кластера, как видно, мало чем отличаются от таковых кимберлитов Ca-кластера. Различия между этими двумя типами пород касаются только количественных соотношений кальцита и оливина. В породах Ca-кластера кальцит слагает более 50 об. %, в кимберлитах Mg-кла-



**Рис. 5.** Электронное изображение (BSE) части полированной поверхности Са-кимберлита Сюльдюкарской трубыки (а). Порфировые вкрапленники представлены окружными изометрическими либо вытянутыми лейстовидными кристаллами кальцита, таблитчатыми кристаллами флогопита, эллипсовидными кристаллами ильменита. В правом верхнем углу снимка видно, что порфировые вкрапленники образуют скопления (элементы гломеропорфирой структуры). Основная масса сложена субпараллельно ориентированными лейстовидными кристаллами кальцита, промежутки между которыми заполнены скрытокристаллическим кальцит-флогопитовым агрегатом. В основной массе и во вкрапленниках флогопит хлоритизирован либо полностью замещен минералами группы хлоритов. Мелкие яркие кристаллы основной массы представлены (по мере увеличения яркости) рутилом, апатитом, пиритом. Увеличенный фрагмент основной массы кальцитового кимберлита (б)

**Fig. 5. a)** Backscattered-electron (BSE) imaging of a part of the polished surface of the Ca-kimberlite of the Syuldukar pipe. Porphyry phenocrysts are represented by rounded isometric or elongated leystoid calcite crystals, tabular phlogopite crystals, ellipsoid ilmenite crystals. In the upper right corner of the image, porphyry phenocrysts form clusters (elements of the glomeroporphyre structure). The main mass is composed of subparallel-oriented leystoid calcite crystals, the gaps between which are filled with a cryptocrystalline calcite-phlogopite aggregate. In the main mass and in the phenocrysts, phlogopite is chloritized, or completely replaced by minerals of the chlorite group. Small bright crystals of the main mass are represented (as the brightness increases) by rutile, apatite, pyrite. **б)** An enlarged fragment of the main mass of calcite kimberlite

стера оливин преобладает над кальцитом, в них, соответственно, повышены содержание оливиновых порфировых вкрапленников и их размер. Особенности минерального состава кимберлитов, а именно соотношение в них оливина и кальцита, таким образом, полностью корреспондируют их химическому составу.

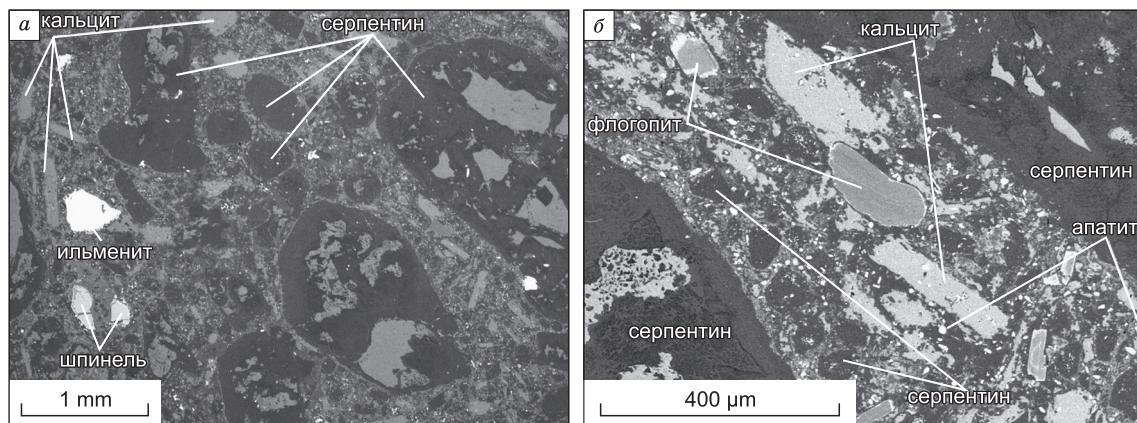
### Составы минералов

Составы минералов исследовались на рентгеноспектральном микроанализаторе «Самевах-Micro» в ЦКП многоэлементных и изотопных исследований СО РАН по методике, разработанной в Институте геологии и минералогии им. В.С. Соболева [6]. Пределы обнаружения большинства элементов при рядовом анализе составляют порядка 0,03 % [5]. Прецизионные измерения содержаний Na и Ni [7, 36] повышают пределы обнаружения этих элементов до 0,01 и 0,005 % соответственно.

**Пиропы** образуют окружной формы зерна с неровной, кавернозной, матовой поверхностью малинового с различными оттенками цвета. Их размеры колеблются от 0,15 до 5,0 мм, в боль-

шинстве случаев составляя 0,3–1,0 мм. Нередко на пиропах фиксируется келифитовая оболочка, толщина которой может достигать 1–2 мм. Содержания пиропов в породах варьируют в пределах 100–200 г/т.

Сопоставление составов пиропов из кимберлитов магниевого и кальциевого кластеров показывает, что пределы варьирования концентраций практически всех оксидов в них перекрываются (табл. 3). Исключением является только титан – повышенные концентрации этого элемента присущи преимущественно пиропам кимберлитов Са-кластера. При этом пиропы с малыми и высокими содержаниями титана не образуют единого изоморфного ряда, формируя в координатах  $TiO_2-Na_2O$  обособленные, не пересекающиеся друг с другом кристаллизационные тренды (рис. 7). Используя наметившийся разрыв в распределении содержаний  $TiO_2$ , мы разделили все проанализированные пиропы кимберлитов Са-кластера на высоко- и низкотитанистые (табл. 4). Оказалось, что обе разновидности пиропов более чем в трети случаев находятся в породе в совместной ассоциации, образуя само-



**Рис. 6.** Электронное изображение (BSE) части полированной поверхности Mg-кимберлита Сюльдюкарской трубыки (а). Вкрапленники представлены оливином, полностью замещенным серпентиновым или кальцит-серпентиновым минеральными агрегатами, ильменитом, флогопитом, кальцитом. Каркас связующей массы слагают удлиненные кристаллы кальциита, погруженные в скрытокристаллический серпентиновый, иногда с примесью хлорита и карбоната, базис, цементирующий мелкие кристаллы апатита, ильменита, шпинели, рутила. Увеличенный фрагмент основной массы Mg-кимберлита (б)

**Fig. 6. a)** Backscattered-electron (BSE) imaging of a part of the polished surface of the Mg-kimberlite of the Syuldyukar pipe. The phenocrysts are represented by olivine, completely replaced by serpentine or calcite-serpentine mineral aggregates, ilmenite, phlogopite, and calcite. The framework of the cohesive mass is composed of elongated calcite crystals immersed in latently crystalline serpentine, sometimes with an admixture of chlorite and carbonate, base, cementing small crystals of apatite, ilmenite, spinel, and rutile. **б)** Enlarged fragment of the main mass of Mg-kimberlite

стоятельный кристаллы без признаков реакционного либо эволюционного взаимодействия. Ко-ноды сосуществующих низко- и высокотитанистых пиропов образуют пучок субпараллельных линий (см.рис. 7), фиксируя родство этих двух минеральных видов в рамках единого кристаллизационного процесса.

В кимберлитах Mg-кластера пиропы с повышенными концентрациями титана встречаются гораздо реже, чем в породах Ca-кластера. Так, в выборке из 138 кристаллов в разряд высокотитанистых попал только один пироп из кимберлитов Восточного тела (см. табл. 4).

**Альмандины** встречаются в кимберлитах трубы Сюльдюкарская в примерно равных количествах с пиропом (~50–200 г/т), образуя округлые без явных следов дробления кристаллы с кавер-

нозной поверхностью и оранжевой с красновато-коричневыми оттенками окраской. Сопоставление составов альмандинов с составами кимберлитов, из которых они были извлечены, показало, что минералы магниевого петрохимического кластера содержат повышенные количества MgO и, соответственно, пониженные FeO в сравнении с таковыми кальциевого кластера (табл. 5).

Ильмениты являются наиболее распространенными минералами тяжелой фракции кимберлитов, слагая от 0,2 до 1,0 % объема породы. Они образуют округлые с первичной микропирамидальной поверхностью кристаллы размером от долей миллиметра до 1–3 мм. Их отличительной особенностью, как и пиропов, является полимодальный характер распределения концен-

Таблица 3

**Средние составы пиропов кимберлитов кальциевого ( $n = 215$ )  
и магниевого ( $n = 138$ ) кластеров Сюльдюкарской трубы**

**Average compositions of pyrope kimberlites from the calcium ( $n = 215$ )  
and magnesium ( $n = 138$ ) clusters of the Syuldyukar pipe**

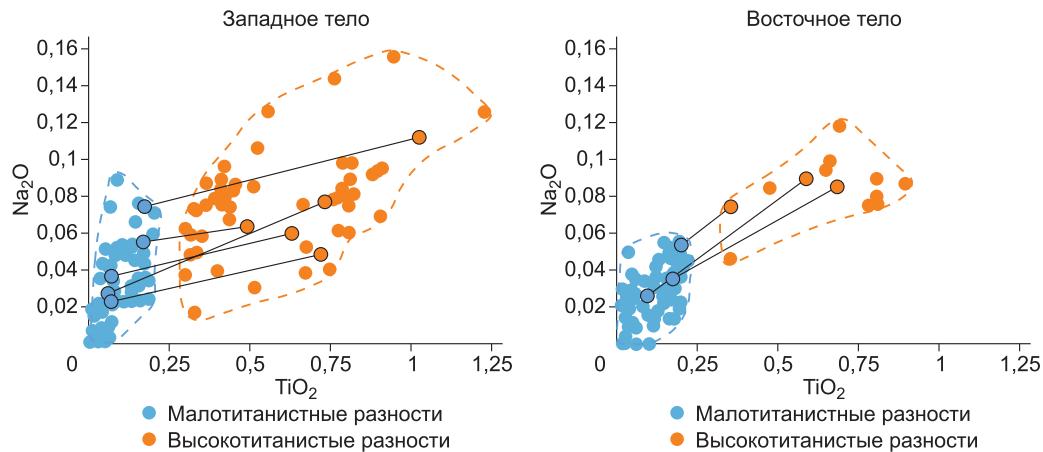
Кластер	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	MgO	CaO	Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	FeO	Total
Ca	41,61	0,25	19,40	5,03	0,42	19,45	5,35	0,04	0,00	8,24	99,80
Mg	41,56	0,09	19,77	4,84	0,50	19,07	5,55	0,03	0,00	8,13	99,54

Таблица 4

Table 4

**Средние составы низко- и высокотитанистых пиропов кимберлитов Сольдокарской трубы, находящихся в совместной ассоциации**

Average compositions of low- and high-titanium pyrope of Syuldyukar pipe kimberlites, in joint association



**Рис. 7.** Вариации содержаний  $\text{TiO}_2$  и  $\text{Na}_2\text{O}$  (мас.%) в пиропах кимберлитов Са-кластера Сюльдюкарской трубы. Отчетливо видны разрыв в распределении содержаний титана и разная направленность кристаллизационных трендов низко- и высокотитанистых разностей. В Западном теле высокотитанистые пиропы составляют 42 % от всей выброшки, в Восточном – 12 %. Коноды находящихся в совместной ассоциации низко- и высокотитанистых пиропов построены по данным табл. 4

**Fig. 7.** Variations in  $\text{TiO}_2$  and  $\text{Na}_2\text{O}$  contents (wt.%) in pyrope kimberlites of the Ca-cluster of the Syuldyukar pipe. A gap in the distribution of titanium contents and different direction of crystallization trends of low- and high-titanium varieties are clearly seen. In the western body, high-titanium pyropes account for 42 % of the entire outburst, and in the eastern body, 12 %. The conodes of low- and high- titanium pyropes in the joint association are plotted according to Table 4

траций оксида титана с отчетливым минимумом, приходящимся на значения 42 %  $\text{TiO}_2$  (рис. 8).

Такой концентрационный трог можно с большой долей вероятности интерпретировать как границу, отделяющую один минеральный вид от другого. Физические свойства ильменитов Сюльдюкарской трубы подтверждают сказанное – минералы с концентрациями  $\text{TiO}_2$  более 42 % парамагнитны, а разности с  $\text{TiO}_2$  менее 42 % ферримагнитны. В последних содержания  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , оцененные по данным стехиометрических пересчетов, не опускаются ниже 23 %, что позволяет уверенно классифицировать их как гемоильмениты. Гемоильмениты всегда находятся в совместной ассоциации с ильменитами (табл. 6). Следы реакционного взаимодействия между этими минеральными фазами не обнаружены. На

вариационных диаграммах коноды в парах гемоильменит–ильменит образуют, как и в случае с пиропами, пучок субпараллельных линий (рис. 9). Ранжирование составов минералов по породным петрохимическим кластерам показывает, что гемоильменит–ильменитовая ассоциация в Mg-кимберлитах смещается в сравнении с Ca-кимберлитами в область составов с повышенными количествами Ti, Mg и, соответственно, пониженными  $\text{Fe}^{3+}$  (см. рис. 9).

**Алмазы.** Содержания алмазов в кимберлитах Сюльдюкарской трубы определялись специалистами Ботуобинской ГРЭ в 6–15-метровых интервалах керна разведочных скважин. Вес отдельных проб кимберлита варьировал от 20 до 200 кг, суммарный вес проанализированных проб составил 21 091 кг. Сгруппировав результаты

Таблица 5

**Средние составы альмандинов кимберлитов кальциевого ( $n = 193$ ) и магниевого ( $n = 59$ ) кластеров Сюльдюкарской трубы**

**Average compositions of almandines kimberlites of the calcium ( $n = 193$ ) and magnesium ( $n = 59$ ) clusters of the Syuldyukar pipe**

Кластер	$\text{SiO}_2$	$\text{TiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Cr}_2\text{O}_3$	$\text{MnO}$	$\text{MgO}$	$\text{CaO}$	$\text{Na}_2\text{O}$	$\text{K}_2\text{O}$	$\text{FeO}$	Total
Ca	39,26	0,15	21,46	0,10	0,60	9,05	6,70	0,02	0,00	22,74	100,09
Mg	39,81	0,14	21,70	0,09	0,58	10,58	6,70	0,02	0,00	20,38	99,99

определения содержаний алмазов по петрохимическим типам кимберлитов, мы вычислили для каждого тела среднюю алмазоносность и средние содержания кристаллов алмаза в 1 т породы (табл. 7). Полученный цифровой материал показал, что:

1. Наиболее высоким продуктивным потенциалом обладают кимберлиты Mg-кластера. Средние содержания алмазов в них составляют 0,43 карат/т в Западном теле и 0,84 карат/т в Восточном. В кимберлитах Ca-кластера алмазоносность ниже – 0,14 карат/т в Западном теле и 0,06 карат/т в Восточном.

2. Для Mg-кимберлитов характерны повышенные в сравнении с Ca-кимберлитами содержания кристаллов алмаза в 1 т породы. В Западном теле величина этого параметра в кимберлитах Ca-кластера равняется 17 шт./т, а в кимберлитах Mg-кластера 28, в Восточном – 3 и 57 шт./т соответственно.

Алмазы Сюльдюкарской трубы характеризуются невысокой степенью сохранности. Около 50 % от их общего количества представляют собой обломки и осколки кристаллов. Среди целых кристаллов до 35 % приходится на ламинарные робододекаэроиды, октаэдры составляют около 15, переходные от октаэдра к ромбододекаэдру кристаллические формы составляют ~25, додекаэроиды и округлые кристаллы – 15 %. Кристаллы кубического габитуса редки, их количество не превышает 0,1–0,2 % от всей выборки<sup>2</sup>.

Сопоставление морфологических характеристик алмазов Западного и Восточного тел Сюльдюкарской трубы показало наличие существенных различий между ними. В Западном теле максимально представлены ромбододекаэроиды, в Восточном превалируют кристаллы переходных от октаэдра к ромбододекаэдру форм (рис. 10). Различия между телами, как мы помним, фиксируются и на уровне химических составов слагающих их пород – кимберлиты Западного тела обогащены  $\text{TiO}_2$  и  $\text{CaO}$ , Восточного –  $\text{MgO}$  и  $\text{K}_2\text{O}$  (см. табл. 3).

Можно, следовательно, утверждать, что морфологические особенности алмазов и их содержания так же, как и вещественные характеристики гранатов, ильменитов, варьируют в достаточно строгом соответствии с колебаниями химического состава вмещающих их кимберлитов.

<sup>2</sup> Кристалломорфология алмазов (283 шт.) Сюльдюкарской трубы исследовалась специалистами Вилойской ГРЭ и НИГП АК «АЛРОСА» (ПАО).

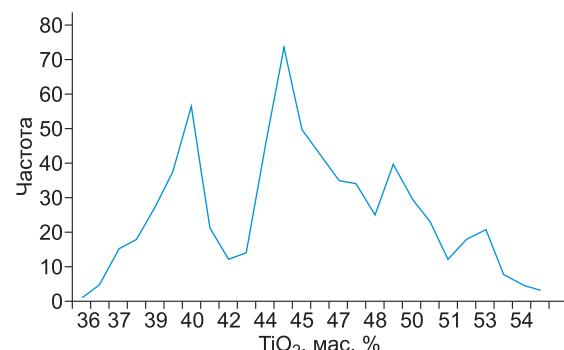


Рис. 8. Распределение частот содержаний  $\text{TiO}_2$  в ильменитах кимберлитов Сюльдюкарской трубы ( $n = 443$ )

Fig. 8. Distribution of frequencies of  $\text{TiO}_2$  content in ilmenite kimberlites of the Syuldyukar pipe ( $n = 443$ )

## Обсуждение результатов

Итак, Сюльдюкарская трубка представляет собой комбинацию двух дифференцированных субвертикальных тел, в которых породы центральных частей обогащены магниевым компонентом, а периферических – кальциевым. Петрографически это выражается в постепенной (не интрузивной) смене кальцитовых кимберлитов оливиновыми. Возникновение такой зональности весьма удивительно объясняется фракционированием оливина, удаление которого приводит к накоплению кальциевого и большинства других компонентов в остаточном расплаве (см. рис. 4), но какова причина концентрации оливина в осевой части протяженного вертикального тела?

Сегрегация кристаллов с накоплением кумулятов в сторону от стенок магматического канала может происходить в движущейся магме, содержащей и кристаллические фазы. Возможность такого процесса (дифференциация течения) была теоретически и экспериментально обоснована Бхаттаджри, Смитом, Неру и Комаром [19–21, 29].

Основными положениями модели дифференциации течения являются:

- твердые частицы в ламинарном потоке мигрируют от стенок в направлении центральной оси канала в случае как вертикального, так и горизонтального его расположения;
- скорость миграции возрастает с увеличением размера и плотности частицы.

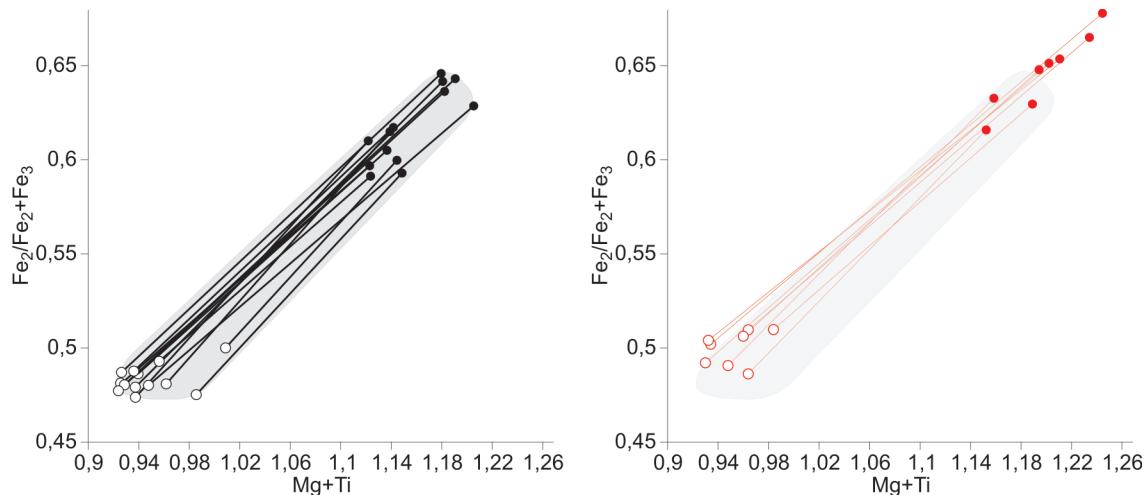
Из этих положений вытекает два важных следствия, позволяющих оценивать правомерность применения модели к конкретному геологическому объекту. Первое – в породах, являющихся

Таблица 6

Средние составы гемоильменитов (Гем) и ильменитов (Илм) кимберлитов Сюльдюкарской трубы, находящихся в совместной ассоциации

Table 6  
Average compositions of haemolmenites (Gem) and ilmenites (Ilm) from kimberlites of the Syuldyukar pipe in joint association

Оксид	Образец															
	Западное тело				Восточное тело				Западное тело				Восточное тело			
	Сахкастэр		Сахкастэр		Илм.		Гем.		Илм.		Гем.		Илм.		Гем.	
	12/26-180,1	12/26-204,1		28/20-112		28/20-80		12/22-80,2		12/24-11,5		28/22-15,5		28/22-13,3		
Гем.	Илм.	Гем.	Илм.	Гем.	Илм.	Гем.	Илм.	Гем.	Илм.	Гем.	Илм.	Гем.	Илм.	Гем.	Илм.	
TiO <sub>2</sub>	40,11	45,94	39,51	46,25	39,31	45,74	39,60	47,80	40,42	49,45	39,52	48,67	39,04	47,60	37,68	44,91
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,69	0,66	0,68	0,68	0,71	0,58	0,70	0,52	0,70	0,54	0,71	0,63	0,74	0,62	0,71	0,75
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,29	0,34	0,24	0,36	0,35	0,78	0,42	0,73	0,27	1,63	0,18	0,65	0,53	1,12	0,42	0,20
FeO	50,04	42,87	50,78	42,35	50,88	42,14	50,68	39,18	49,39	36,14	50,57	38,54	50,32	38,42	52,04	42,91
MnO	0,17	0,23	0,17	0,24	0,17	0,24	0,16	0,27	0,16	0,32	0,12	0,27	0,14	0,23	0,13	0,18
MgO	6,26	8,75	5,97	8,58	6,14	8,47	6,02	9,76	6,12	10,94	5,58	10,18	5,67	9,82	5,26	8,36
NiO	0,06	0,10	0,04	0,07	0,09	0,06	0,06	0,08	0,06	0,14	0,04	0,12	0,05	0,12	0,04	0,08
V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,40	0,43	0,43	0,47	0,45	0,43	0,44	0,40	0,45	0,41	0,46	0,45	0,45	0,38	0,45	0,44
Nb <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,20	0,13	0,17	0,12	0,14	0,17	0,19	0,14	0,17	0,14	0,19	0,12	0,18	0,14	0,16	0,12
Total	98,22	99,43	98,00	99,12	98,23	98,62	98,27	98,87	97,73	99,71	97,35	99,62	97,13	98,46	96,89	97,96
n	10	13	9	9	1	7	11	10	12	3	1	5	11	7	4	11



**Рис. 9.** Вариации  $\text{Ti}+\text{Mg}$  и  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$  (ат. %) в сосуществующих гемоильменитах (открытые кружки) и ильменитах (заливные кружки) кимберлитов Са-кластера (черный цвет) и Mg-кластера (красный цвет) Сюльдюкарской трубы. Серым цветом зашита область составов минералов из пород Са-кластера

**Fig. 9.** Variations of  $\text{Ti}+\text{Mg}$  and  $\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{2+}+\text{Fe}^{3+}$  (at. %) in coexisting hemoilmenites (open circles) and ilmenites (filled circles) of Ca-cluster kimberlites (black color) and Mg-cluster (red color) of the Suldyukar pipe. The area of mineral composition from the Ca-cluster rocks is shown in gray

ся «продуктами» дифференциации течения, вкрапленники центральных частей тела должны быть более высокотемпературными, нежели вкрапленники периферии. Второе – размер вкрапленников должен коррелировать с химическим составом породы.

В кимберлитах Сюльдюкарской трубы, как мы уже отмечали, оливины полностью замещены минералами группы серпентина (полные псевдоморфозы) и поэтому проверить наличие-отсутствие минералогической зональности по составу этого минерала не представляется возможным. Помимо оливина, стабильной ликвидусной фазой кимберлитового расплава, по экспериментальным

данным, является гранат [11, 13, 16, 27, 32]. Сопоставление пиропов из пород различных частей трубы показало, что в слагающих периферические части тел Са-кимберлиташироко распространены разности, обогащенные Ti, а в Mg-кимберлитацентральных частей тел титанистые пиропы отсутствуют (см. выше). Поскольку вхождение титана в структуру пиропа становится менее энергетически выгодным с повышением температуры [2], можно сделать вывод, что пиропы Mg-кимберлитов центральных частей трубы являются более высокотемпературными в сравнении с пиропами периферийных частей. Альмандины кимберлитов центральных частей

Средние параметры алмазоносности в петрохимических разновидностях кимберлитов Западного и Восточного тел Сюльдюкарской трубы

Average parameters of diamondiferousness in petrochemical varieties of kimberlites of the Western and Eastern bodies of the Syuldyukar pipe

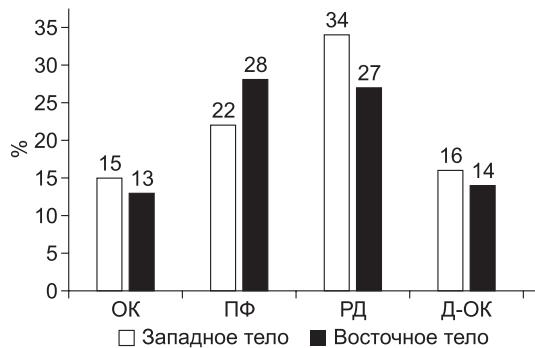
Параметр	Западное тело			Восточное тело		
	Са-кластер	Mg-кластер	Все тело	Са-кластер	Mg-кластер	Все тело
Содержание алмазов, карат/т	0,14	0,43	0,26	0,06	0,84	0,51
Количество кристаллов в 1 т породы	17	28	18	3	57	38

*Примечание.* Количество проб – 192 шт., общий вес проб – 21091 кг.

*Note.* Number of samples – 192 pcs., total weight of samples – 21091 kg.

Таблица 7

Table 7

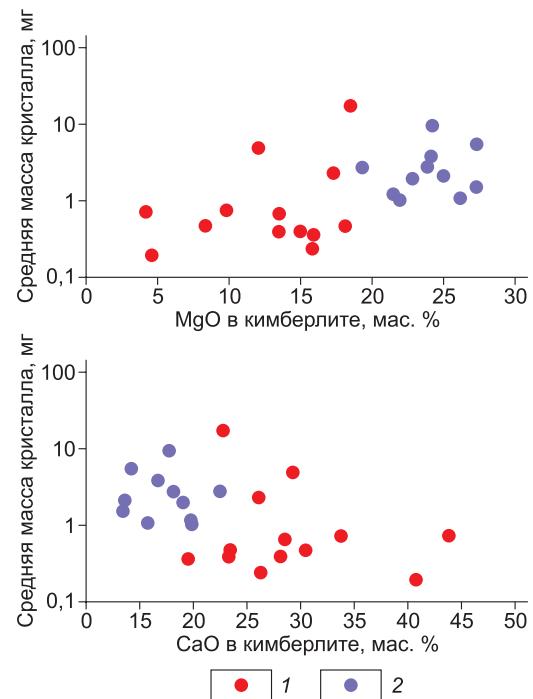


**Рис. 10.** Габитус кристаллов алмаза, извлеченных из кимберлитов Сиульдюкарской трубы: ОК – октаэдры, ПФ – переходные формы кристаллов от октаэдра к ромбододекаэдру, РД – ромбододекаэдроиды, Д-ОК – додекаэдроиды и округлые алмазы

**Fig. 10.** Habitus of diamond crystals extracted from kimberlites of the Syuldyukar pipe: OK – octahedrons, ПФ – transitional crystal forms from octahedron to rhombododecahedron, РД – rhombododecahedrons, Д-ОК – dodecahedrons and rounded diamonds

Западного и Восточного тел обнаруживают повышенные концентрации магния в сравнении с альмандинами периферических частей тел (см. табл. 5), являясь, соответственно, более высокотемпературными образованиями. Для ильменитов устанавливается аналогичная картина (см. рис. 9) – минералы из кимберлитов центральных частей тел более магнезиальны в сравнении с ильменитами пород краевых частей.

Для проверки второго положения рассматриваемой гипотезы мы попытались оценить степень сопряженности между составом породы и размерами кристаллов алмаза. Сгруппировав результаты определения алмазоносности в кернах разведочных скважин по 50-метровым интервалам, мы вычислили для каждого из них средний вес кристалла алмаза. По этим же интервалам были сгруппированы химические составы кимберлитов. Сопоставление поинтервальных оценок тех и других показало существование между ними устойчивых корреляционных связей. Кристаллы, обладающие повышенным весом, а следовательно, и большим размером, тяготеют к области составов магнезиальных кимберлитов, мелкие кристаллы, напротив, расположились в поле кальциевого кимберлита (рис. 11). Перенеся полученные данные на объемную модель трубы, мы можем констатировать, что более крупные кристаллы алмаза располагаются в осевых частях тел, а более мелкие – в периферийных.



**Рис. 11.** Зависимость средних весов кристаллов алмаза от концентраций MgO и CaO в кимберлитах Ca-кластера (1) и Mg-кластера (2) Сиульдюкарской трубы

**Fig. 11.** Dependence of the average diamond crystal weights on the concentrations of MgO and CaO in the Ca-cluster kimberlites (1) and the Mg-cluster (2) of the Syuldyukar pipe

Таким образом, направленное от центра к периферии изменение химического состава кимберлитов, составов минералов-вкрапленников, акцессорных минералов, содержаний и морфологии кристаллов алмаза полностью соответствует модели дифференциации течения в ламинарном потоке. Как известно, дифференциация течения является весьма распространенным и, соответственно, детально исследованным механизмом эволюции базит-ультрабазитовых расплавов, формирующих дайковые и пластовые тела [3, 17, 18, 22, 26, 28, 31, 33, 34]. Обнаружение геологических свидетельств проявления данного механизма в кимберлитах позволяет говорить об отсутствии принципиальных различий в реологических свойствах протокимберлитовых и базит-ультрабазитовых расплавов.

Обратимся еще раз к рис. 4. Отчетливо видно, что в парадигму преимущественного удаления из расплава оливина по схеме дифференциации течения не укладывается железо – концентрации этого оксида остаются примерно на одном уровне во всех разновидностях пород. Единст-

венно возможной причиной такого аномального поведения железа относительно остальных компонентов может быть только постмагматическая серпентинизация оливина, в результате которой железо переходит в раствор и получает возможность к перераспределению в пределах остывающего тела [15]. Повсеместно присутствующие в кимберлитах Сюльдюкарской трубы зоны ожелезнения (рис. 12), пленки оксидов железа на минеральных зернах и ксенолитах вмещающих пород подтверждают реалистичность такого сценария. Не обсуждая детали, отметим, что серпентинизация накладывается на первичную магматическую зональность, подчеркивая, наряду с распределением ксенолитов вмещающих пород, отсутствие свидетельств катастрофического освобождения летучих из расплава, переводящего процесс внедрения в эксплозивную фазу [30].

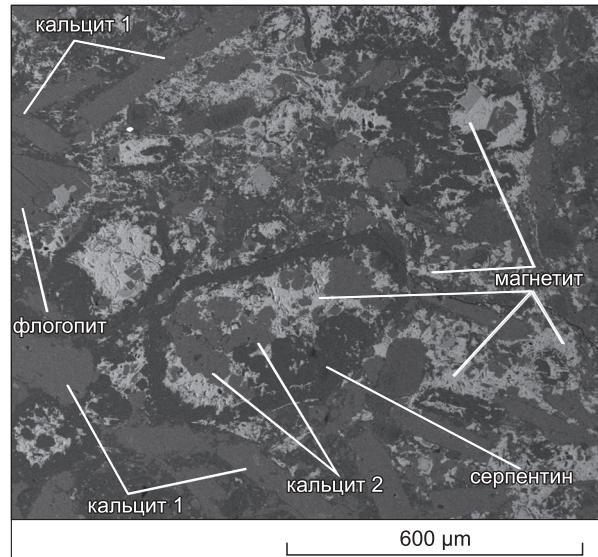
## Выводы

1. Зональная внутренняя структура обоих тел Сюльдюкарской трубы, выражаясь в постепенной (не интрузивной) смене от периферии к центральным частям Са-кимберлитов Mg-кимберлитами удовлетворительно объясняется фракционированием оливина. Состав Mg-кимберлита может быть превращен в состав Са-кимберлита удалением 30–32 % оливина.

2. Вкрапленники гранатов и ильменитов из Mg-кимберлитов осевых частей тел обнаруживают сдвиг в более высокотемпературную область составов относительно вкрапленников из Са-кимберлитов краевых частей. Наиболее крупные кристаллы алмазов и их (алмазов) основные концентрации приурочены к Mg-кимберлитам осевых частей тел.

3. Сегрегация вкрапленников оливина, а также наиболее высокотемпературных гранатов и ильменитов, в осевых частях тел происходила по механизму дифференциации течения в процессе движения кимберлитового расплава по протяженному трубообразному каналу.

4. Комбинация двух тел в Сюльдюкарской трубке предполагает, как минимум, наличие промежуточной камеры на пути следования кимберлитового расплава в верхние этажи литосферы. Как правило, такие двойные системы (камера—подводящий канал) не возникают в единичном количестве, но входят в состав крупных магматических структур. Следовательно, можно прогнозировать существование нового кимберлитового поля на сопредельных с трубкой территориях.



**Рис. 12.** Электронное изображение (BSE) части полированной поверхности Mg-кимберлита Сюльдюкарской трубы (обр. 12/24-125). Замещение основной массы породы магнетитом, а вкрапленников оливина – агрегатом магнетита и кальцита: кальцит 1 – лейстовидные кристаллы первичного кальцита, слагающие каркас породы; кальцит 2 – новообразованный кальцит, замещающий совместно с магнетитом вкрапленники оливина, о форме кристалла оливина позволяет судить тонкая кайма серпентина

**Fig. 12.** Backscattered-electron (BSE) imaging of a part of the polished surface of the Mg-kimberlite of the Syuldyukar pipe (sample No. 12/24-125). Replacement of the main mass of the rock by magnetite, and olivine phenocrysts by an aggregate of magnetite and calcite: calcite 1 – leist-like crystals of primary calcite, composing the rock framework; calcite 2 – newly formed calcite, replacing together with magnetite olivine phenocrysts, the shape of olivine crystal allows to judge the thin border of serpentine

## Список литературы /References

1. Горев Н.И., Герасимчук А.В., Проценко Е.В., Толстов А.В. Тектонические аспекты строения Вилюйско-Мархинской зоны, их использование при прогнозировании кимберлитовых полей. *Наука и образование*. 2011;(3):5–10.

[Gorev N.I., Gerasimchuk A.V., Protsenko E.V., Tolstov A.V. The tectonic aspects of the structure of the Vilyui-Markha zone, their use in forecasting kimberlite fields. *Nauka i obrasovanie*. 2011;(3):5–10. (In Russ.)]

2. Еремин Н.Н., Гостищева Н.Д., Бобров А.В., Бенделiani А.А., Бурова А.И. Оценка вхождения ионов Ti<sup>4+</sup> в состав мантийных гранатов: результаты атомистического моделирования. *Кристаллография*. 2021;66(1):48–51.

[Eremin N.N., Gostishheva N.D., Bobrov A.V., Bendeliani A.A., Burova A.I. The evaluation of the occurrence of Ti<sup>4+</sup> ions in the mantle garnets: results of at-

- omistic modeling. *Kristallografiya*. 2021;66(1):48–51 (In Russ.)]
3. Изох А.Э., Вишневский А.В., Калугин В.М., Оюунчимэг Т. Петрология и геодинамическая позиция Урэгнурской пикритовой вулканоплутонической ассоциации (Западная Монголия). Геодинамическая эволюция литосферы Центрально-Азиатского подвижного пояса (от океана к континенту), Материалы Всероссийского научного совещания по Интеграционным программам Отделения наук о Земле Сибирского отделения РАН, Иркутск, 9–14 окт., 2007. Иркутск;2007:89-91.89–91
- [Izox A.E., Vishnevskij A.V., Kalugin V.M., Oyuunchimeg T. Petrology and geodynamic position of the Ureg Nur Picrite Volcano Plutonic Association (Western Mongolia). *Geodynamic evolution of the lithosphere of the Central Asian mobile Belt (from the ocean to the continent)*, Irkutsk, IZK SB RAS, Materials of the All-Russian Scientific Meeting on Integration Programs of the Department of Earth Sciences of the Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Irkutsk, 9-14 October, 2007. Irkutsk; 2007:89-91. (In Russ.)]
4. Кокс К.Г., Белл Дж.Д., Панкхерст Р.Дж. Интерпретация изверженных горных пород. М.: Недра; 1982. 414 с.
- [Koks K.G., Bell Dzh.D., Pankherst R.Dzh. *Interpretation of igneous rocks*. M.: Nedra; 1982. (In Russ.)]
5. 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;49(3): 221–225.
- [Korolyuk V.N., Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Nigmatulina E.N. The accuracy of electron probe analysis of rock-forming minerals on the JXA-8100 microanalyzer. *Geol. i geofiz.* 2008;49(3):221–225. (In Russ.)]
6. Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Кузнецова А.И., Летов С.В. Рентгеноспектральный квантотометрический микронализ важнейших минералов кимберлитов. *Геология и геофизика*. 1987;28(5):75–81.
- [Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Kuznecova A.I., Letov S.V. X-ray spectral quantum-metric microanalysis of the most important minerals of kimberlites. *Geol. i geofiz.* 1987;28(5):75–81. (In Russ.)]
7. Лаврентьев Ю.Г., Усова Л.В., Королюк В.Н., Логвинова А.М. Электронно-зондовое определение примесей цинка и никеля в хромшпинелидах для целей геотермометрии перидотитов. *Геология и геофизика*. 2005;46(7):741–745.
- [Lavrent'ev Yu.G., Usova L.V., Korolyuk V.N., Logvinova A.M. Electron probe determination of zinc and nickel impurities in chrome spinelides for the purposes of peridotite geothermometry. *Geol. i geofiz.* 2005;46(7):741–745. (In Russ.)]
8. Мальцев М.В., Толстов А.В., Фомин В.М., Старкова Т.С. Новое кимберлитовое поле в Якутии и типоморфные особенности его минералов-индикаторов. *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2016;(3):86–94.
- [Mal'tsev M.V., Tolstov A.V., Fomin V.M., Starkova T.S. A new kimberlite field in Yakutia and typomorphic features of its indicator minerals. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya*. 2016;(3):86–94. (In Russ.)]
9. Минин В.А., Василенко В.Б., Кузнецова Л.Г., Толстов А.В., Зинчук Н.Н. Особенности распределения кальция в кимберлитах Якутской провинции. Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России: материалы всероссийской научно-практической конференции, 2–4 апреля 2013 г. 2013;II:21–24.
- [Minin V.A., Vasilenko V.B., Kuznecova L.G., Tolstov A.V., Zinchuk N.N. Features of calcium distribution in kimberlites of the Yakut province. *Geology and mineral resources of the North-East of Russia: materials of the All-Russian scientific and practical conference, April 2-4, 2013. 2013;II:21–24. (In Russ.)]*
10. Мюллер Р., Саксена С. Химическая петрология. М.: Мир;1980. 517 с.
- [Myuller R., Saksena S. *Chemical Petrology*. M.: Mir;1980. (In Russ.)]
11. 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;56(1-2):254–272.
- [Pal'yanov Yu.N., Sokol A.G., Xohryakov A.F., Kruk A.N. Conditions of diamond crystallization in kimberlite melt according to experimental data. *Geologiya i geofizika*. 2015;56(1-2):254–272. (In Russ.)]
12. Петрохимия кимберлитов. М.: Недра;1991. 304 с.
- [Petrochemistry of kimberlites. M.: Nedra;1991. (In Russ.)]
13. Сокол А.Г., Крук А.Н. Условия генерации кимберлитовых магм: обзор экспериментальных данных. *Геология и геофизика*. 2015;56(1-2):316–336.
- [Sokol A.G., Kruk A.N. Conditions of generation of kimberlite magmas: review of experimental data. *Geologiya i geofizika*. 2015;56(1-2):316–336. (In Russ.)]
14. Тектоника, геодинамика и металлогенез территории Республики Саха (Якутия). Ред. Парfenов Л.М., Кузьмин М.И. М.: Наука/Интерпериодика; 2001. 571 с.
- [Tectonics, Geodynamics and Metallogeny of the Sakha Republic (Yakutia). (Ed. Parfenov L.N., Kuzmin M.I.). Moscow: Nauka/Interperiodika; 2001. (In Russ.)]
15. Чантуря В.А., Двойченкова Г.П., Стегницкий и др. Экспериментальное обоснование кинетики формирования ионного состава оборотных водных систем и методики оценки эффективности способов их обессоливания для условий переработки алмазосодержащего сырья. Збагачення корисних копалин: Наук.-техн. зб. 2012;48(89):150–159.
- [Chanturiya V.A., Dvojchenkova G.P., Experimental substantiation of the kinetics formation of the ionic composition of recycled water systems and methods for evaluat-

- ing the effectiveness of their desalination methods for the conditions of processing of diamond-containing raw materials. *Zbagachennya korisnix kopal'nykh Nauk.-texn. zh.* 2012; 48(89):150–159. (In Russ.)]
16. Шарыгин И.С., Литасов К.Д., Шацкий А.Ф., Головин А.В., Отани Е., Покиленко Н.П. Экспериментальное исследование плавления кимберлита трубки Удачная-Восточная при 3–6,5 ГПа и 900–1500 °C. *Dokl. RAN*. 2013;448(4):452–457.
- [Sharygin I.S., Litasov K.D., Shaczkij A.F., Golovin A.V., Otani E., Poxilenko N.P. Experimental study of the melting of kimberlite tube Udachnaya-Vostochnaya at 3–6.5 hPa and 900–1500 °C. *Dokl. RAN*. 2013;448(4):452–457. (In Russ.)]
17. Asquith G.B. Flow differentiation in tertiary lamprophyres (camptonites) Sacramento Mountains, Otero County, New Mexico. *J. Geol.* 1973; 81:643–647.
18. Bebien J., Gagny Cl., Importance of flow differentiation in magmatic evolution: an example from an ophiolitic sheeted complex. *J. Geol.* 1979;87:579–582.
19. Bhattacharji S. Mechanics of flow differentiation in ultramafic and mafic sills. *J. Geol.* 1967;75:101–112.
20. Bhattacharji S., Nehru C.E. Igneous differentiation models for the origin of Mount Johnson, a zoned monteregion intrusion, Quebec, Canada. *24<sup>th</sup> Intern. Geol. Cong.* 1972;(14):3–17.
21. Bhattacharji S., Smith C.S. Flowage differentiation. *Science*. 1964;45:150–153.
22. Brouxel M. Geochemical consequences of flow differentiation in a multiple injection dike (Trinity ophiolite, California). *Lithos*. 1991;26:245–252.
23. Cas R.A.F., Porritt L., Pittari A., Hayman P. A practical guide to terminology for kimberlite facies: a systematic progression from descriptive to genetic, including a pocket guide. *Lithos*. 2009;112 (Suppl 1): 183–190.
24. Clement C.R., Skinner E.M.W. A textural-genetic classification of kimberlites. 1985;88:403–409.
25. Coe N., Le Roex A.P., Gurney J.J., Pearson D.G., Nowell G.M. Petrogenesis of the Swartruggens and Star Group II kimberlite dyke swarms, South Africa: Constraints from whole rock geochemistry. *Contrib Mineral Petrol*. 2008;156:627–652
26. Coetzee M.S., Bate M.D., Elsenbroek J.H. Flow differentiation: - An explanation for the origin and distribution of plagioclase glomerocrysts in the Annas Rust dolerite sill, Vredefort Dome. *S. Afr. J. Geol.* 1995;98(3): 276–286.
27. Edgar A.D., Charbonneau H.E. Melting experiments on a SiO<sub>2</sub>-poor, CaO-rich aphanitic kimberlite from 5–10 GPa and their bearing on sources of kimberlite magmas. *Amer. Miner.* 1993;78:132–142.
28. Gibb F.G.F. Flow differentiation in the xenolithic ultrabasic dykes of the Cuilins and Strathaird peninsula, Isle of Skye, Scotland. *J. Petrol.* 1968;9(3):411–443.
29. Komar P.D. Mechanical interactions of phenocrysts and flow differentiation of igneous dikes and sills. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1972;83:973–988.
30. Kjarsgaard B.A. Kimberlite Pipe Models: Significance for Exploration. *Proceedings of Exploration 07: Fifth Decennial International Conference on Mineral Exploration*. B. Milkereit. 2007:667–677.
31. Mangan M.T., Marsh B.D., Froelich A.J., Gottfried D. Emplacement and differentiation of the York Haven diabase sheet, Pennsylvania. *J. Petrol.* 1993;34(6):102.
32. Mitchell R.H. Experimental studies at 5–12 GPa of the Ondermatjie hypabyssal kimberlite. *Lithos*. 2004; 76:551–564.
33. Richardson S.H. Chemical variation induced by flow differentiation in an extensive Karroo dolerite sheet, southern Namibia. *Geochim. Cosmochim. Acta*. 1979;43: 1433–1441.
34. Ross M.E. Flow differentiation, phenocryst alignment, and compositional trends within a dolerite dike at Rockport, Massachusetts. *Geol. Soc. Am. Bull.* 1986;97: 232–240.
35. Scott Smith B.H., Nowicki T.E., Russell J.K., Webb K.J., Mitchell R.H., Hetman C.M., Harder M., Skinner E.M.W., Robey J.V.A. Kimberlite Terminology and Classification. *Proceedings of 10th International Kimberlite Conference, Volume 2, Special Issue of the Journal of the Geological Society of India*. 2013:1–17.
36. Sobolev N.V., Tomilenko A.A., Kuz'min D.V., Logvinova A.M., Bul'buk T.A., Fedorova E.N., Nikolenko E.I., Reutskij V.N., Sobolev A.V., Batanova V.G., Grakhannov S.A., Kostrovitskij S.I., Yakovlev D.A., Anastasenko G.F., Tolstov A.V. Prospects of search for diamondiferous Kimberlites in the Northeastern Siberian Platform. *Russian Geology and Geophysics*. 2018;(10):1365–1379.

### Об авторах

МИНИН Владимир Алексеевич, кандидат геолого-минералогических наук, научный сотрудник, Researcher ID: M-2810-2018, <https://orcid.org/0000-0002-0438-2144>, e-mail: minin@igm.nsc.ru

ТОЛСТОВ Александр Васильевич, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Researcher ID: O-2643-2013, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, e-mail: tols61@mail.ru

МАЛЬЦЕВ Михаил Викторович, кандидат геолого-минералогических наук, заместитель главного геолога, e-mail: MaltsevMV@alrosa.ru

*About the authors*

MININ, Vladimir Alekseevich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Researcher, Researcher ID: M-2810-2018, <https://orcid.org/0000-0002-0438-2144>, e-mail: minin@igm.nsc.ru

TOLSTOV, Aleksandr Vasilevich, Dr. Sci (Geology and Mineralogy), Chief Researcher, Researcher ID: O-2643-2013, <https://orcid.org/0000-0002-6057-5987>, e-mail: tols61@mail.ru

MALTSEV, Mikhail Viktorovich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), Deputy Chief Geologist, e-mail: MaltsevMV@alrosa.ru

*Поступила в редакцию / Submitted 21.12.2022*

*Поступила после рецензирования / Revised 03.02.2023*

*Принята к публикации / Accepted 20.02.2023*