

## Особенности магнетита из кимберлитовых пород

©2024 Н. Н. Зинчук✉

*Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) АН РС (Я)  
ул. Тихонова, 5/1, 678170, Мирный, Российская федерация*

### Аннотация

*Введение:* основным методом поисков алмазных месторождений является шлихо-минералогический (ШММ) с использованием индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) – алмаза, пироба, пикроильменита, хромшпинелида, хромдиопсида и некоторых других. Эффективность этого метода обуславливается на прямых признаках алмазоносности территорий – обнаружением алмаза и других ИМК, обладающих четко выраженными типоморфными особенностями. Однако при использовании ШММ в ряде случаев возникают трудности в идентификации некоторых минералов и особенно встречающихся в равной степени как в кимберлитах, так и в других породах, распространенных в алмазоносных регионах. К таким минералам относятся рудные образования (в первую очередь магнетит), которые особенно трудно диагностируются при малых размерах индивидов и главным образом при их мелкой вкрапленности в породах. Магнетит в указанных породах обычно несет следы наложенных изменений, а поэтому часто диагностика, выяснение характера и степени его преобразования возможна только с применением тонких методов физико-химических исследований.

*Объекты, методология исследований, результаты и их интерпретация:* приведены результаты комплексного изучения магнетита из кимберлитов, образование которого в одних случаях происходило в магматических условиях, в других (доминирующих в трубках) в процессе постмагматического и гипергенного изменения пород. Первичный гипогенный нестехиометрический магнетит возникает при температуре свыше 1200°C. Поскольку в процессе преобразования магнетита преобладает кинетический фактор, то в первую очередь происходит интенсивное окисление мелкозернистых выделений, по сравнению с крупнозернистыми разностями. Кристаллохимические особенности магнетита (с учетом стадийности его изменения) рекомендовано для практического использования при картировании кимберлитовых диатрем, количественном определении минерала в них различными методами исследований. Сравнительное изучение фазового состава и структурных особенностей магнетитов из кимберлитов, вмещающих диатремы долеритов и перекрывающих трубки осадочных толщ, показало связь данных параметров с типом содержащих этот минерал пород, геологическими условиями залегания и особенностями их изменения.

*Заключение:* проведенные исследования показали, что отсутствие изоморфных замещений и повсеместная нестехиометричность магнетита в кимберлитах указывают на образование преобладающей доли его при относительно низких термобарических параметрах среды в постмагматическую стадию изменения пород. Стабильность фаз определяется не только парциальным давлением кислорода и температурой среды, но и скоростью протекания при этом соответствующих реакций. В процессе преобразования магнетита превалирует кинетический фактор, что приводит к более интенсивному окислению мелкозернистого магнетита, по сравнению с крупнозернистой разностью. Сведения о наличии вакансий в структуре магнетита необходимо учитывать в случае определения количественного содержания минерала в породе химическим методом. Типоморфные особенности



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Зинчук Николай Николаевич, e-mail: nnzinchuk@rambler.ru

магнетитов можно использовать при поисках коренных месторождений алмазов и связанных с ними вторичных коллекторов.

**Ключевые слова:** кимберлиты, магнетит, железосодержащие минералы и их типоморфизм.

*Для цитирования:* Зинчук Н. Н. Особенности магнетита из кимберлитовых пород // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 4. С. 32–47. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/00-00>

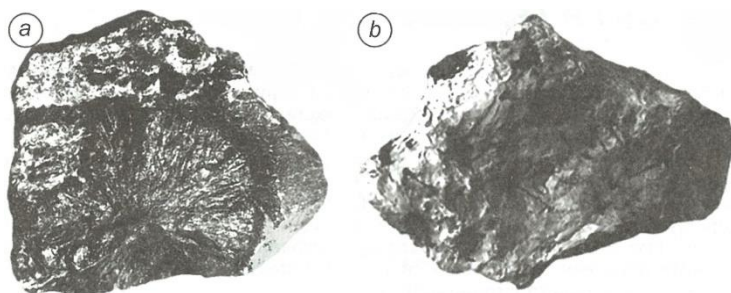
### Введение

Основным методом поисков алмазных месторождений является [1–13] шлихо-минералогический (ШММ) с использованием индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) – алмаза, пироба, пикроильменита, хромшпинелида, хромдиопсида и некоторых других [14–16]. Эффективность этого метода подчеркивается прямыми признаками алмазоносности территорий – обнаружением алмаза и других ИМК, обладающих четко выраженными типоморфными особенностями. Несмотря на то, что многие исследователи высказывали мнение о низкой эффективности ШММ на многих изученных перспективных территориях, за последние несколько десятилетий с его помощью выявлены крупные алмазоносные провинции в Австралии, России (Архангельская область), Китае и Канаде. Лампроитовая провинция в Австралии (трубка Аргайл) открыта по алмазам и хромшпинелидам при шлиховом и мелкообъемном опробовании водотоков. При открытии архангельских кимберлитов важную роль, кроме геофизических методов, сыграли относительно редкие находки в шлихах алмазов и пиробов (в том числе и высокохромистых). Особо интересна история открытия с помощью ШММ высокоалмазоносных кимберлитов Канады (трубка Лак-де-Гра и др.). Однако при использовании ШММ в ряде случаев возникают определенные трудности в идентификации некоторых минералов и особенно встречающихся в равной степени как в кимберлитах, так и в других породах, распространенных в алмазоносных регионах. К таким минералам относятся рудные образования, которые особенно трудно диагностируются при малых размерах индивидов и главным образом при их мелкой вкрапленности в породах. Результаты изучения кимберлитовых пород из диатрем Сибирской платформы (СП) показали, что в их тяжелой фракции довольно характерными являются магнетит и обогащенная магнием разновидность ильменита – пикроильменит. В последние годы появились работы [5], рассматривающие магнетит как минерал-индикатор кимберлитов. С использованием современных физико-химических методов упомянутые авторы изучили свойства магнетита из кимберлитовой трубки Бабые Лето Западно-Укукитского поля Якутской алмазоносной провинции (ЯАП). Выполненные химические и петрофизические исследования минерала позволили этим исследователям сделать вывод, что минерал содержит в переменных соотношениях изоморфные примеси и по составу отвечает титаномагнетиту, имеющему первичный (протомагматический) генезис. Прослеживание минерала в шлихах и при проверке аэромагнитных аномалий позволили авторам

окинуть несколько ореолов кимберлитовой природы. Слабая изученность структурно-морфологических особенностей магнетита не позволяет полноценно использовать его при поисках алмазных месторождений. Магнетит и некоторые (в основном менее обогащенные магнием) разновидности ильменита свойственны также породам трапповой формации (долеритам, туфам и туфогенным образованиям). Рудные минералы в указанных породах обычно несут следы наложенных изменений, а поэтому часто диагностика, а также выяснение характера и степени их преобразования возможны только с применением тонких методов физико-химических исследований.

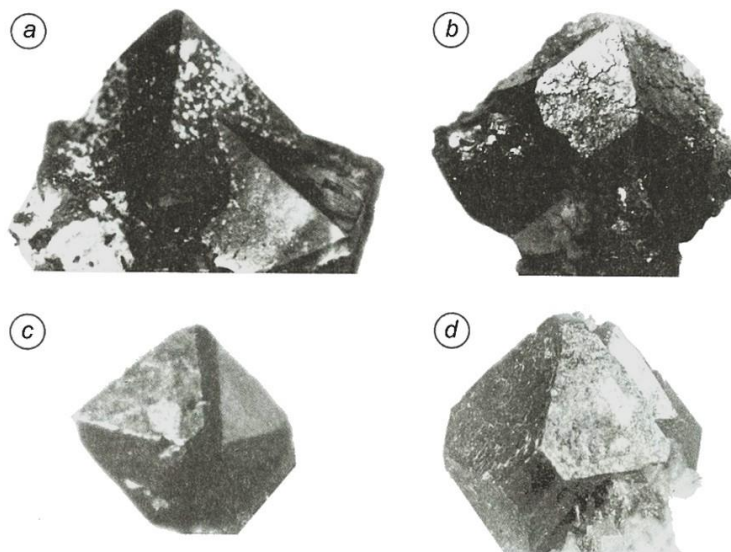
### Объекты, методология исследований, результаты и их интерпретация

Кимберлитовые породы СП обычно сильно изменены постмагматическими и гипергенными процессами [17–21], в результате некоторая их часть превращена по сути в апокимберлиты. При этом отмечена часть минералов, претерпевших различную степень изменений, но встречаются и неизменные (или слабо преобразованные) образования. К таким минералам, кроме алмаза и других ИМК относится и *магнетит*, образование которого в одних случаях происходило в магматических условиях, в других – в процессе последующих изменений кимберлитов. Магнетит широко распространен в кимберлитовых породах многих трубок [22–25], где зачастую распылен в основной массе пород; отмечается он также в виде неправильных выделений, конкреций и жезд, а также в отдельных серпентиновых псевдоморфозах (рис. 1. а, б). Минерал образует также мелкие (1.0–2.5 мм) или ветвящиеся прожилки (до 5 мм) с нечеткими очертаниями. В жездах и конкрециях октаэдрические кристаллы этого минерала (рис. 2. а–д; рис. 3. а–д) ассоциируют обычно с кальцитом, баритом и серпентином. Вокруг вкрапленников и по краям прожилков серпентина в кимберлитах часто отлагаются пелитоморфные выделения магнетита. С сульфидными железами у магнетита обычно наблюдаются взаимные переходы. В ряде диатрем (Юбилейная, Заполярная, Сытыканская, Айхал и др.) преобладают ветвящиеся прожилки магнетит-серпентинового состава мощностью до 5.0 мм. В пиробит-кальцитовых и кальцитовых прожилках встречен [26–30] ряд морфологических форм кристаллов, главными среди которых являются (рис. 4. а–г): 100, 110, 111, 112, 113 и 511. В кимберлитовых породах многих алмазоносных районах СП выделяются [31–35] две важнейшие морфологические разновидности магнетита: а) крупнозернистые агрегаты (нередко радиально-лучистого строения)



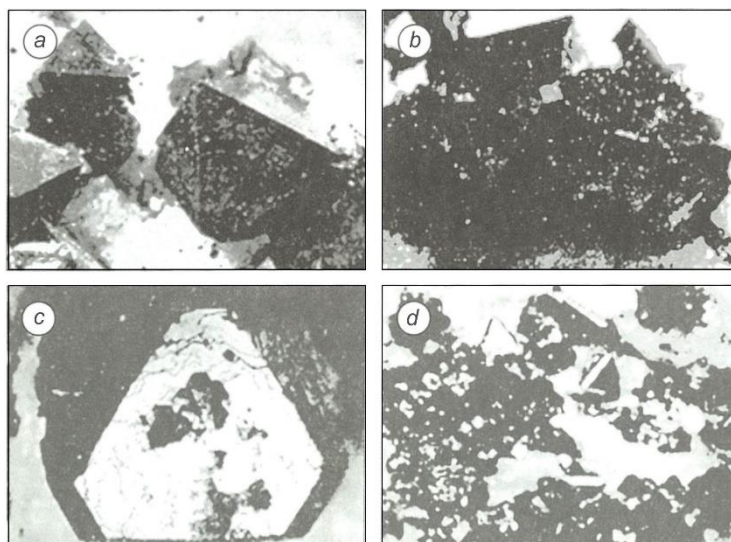
**Рис. 1.** Формы выделения магнетита в кимберлитах трубки Удачная: *a* – радиально-лучистые выделения (обр.УЗ-77-41, натуральная величина); *b* – скелетные формы роста магнетита в серпофите (обр.УЗ-77-40, натуральная величина).

[**Fig. 1.** Forms of magnetite release in kimberlites of the Udachnaya tube: (*a*) – radially radiant discharge (mod.UZ-77-41, full size); (*b*) – skeletal forms of magnetite growth in serpophyte (mod.UZ-77-40, full size).]



**Рис. 2.** Морфология кристаллов магнетита из кимберлитов СП: *a* – сростки октаэдрических кристаллов из кимберлитов трубки Заполярная (обр. 14/60, увеличение 12.5); *b* – комбинированный многогранник из кимберлитов трубки Заполярная (обр. 14/60, увеличение 35); *c* – кристалл ромбододекаэдрического габитуса из кимберлитов трубки Ленинградская (обр. 8/250, увеличение 20); *d* – кристалл октаэдрического габитуса с подчиненными гранями куба из кимберлитов трубки Юбилейная (обр. Ю-12/121, увеличение 10).

[**Fig. 2.** Morphology of magnetite crystals from kimberlites SP: (*a*) – splices of octahedral crystals from kimberlites of the Polar tube (mod.14/60, magnification 12.5); (*b*) – a combined polyhedron from kimberlites of the Polar tube (mod.14/60, magnification 35); (*c*) – a crystal of rhombododecahedral habit from kimberlites of the Leningradsкая tube (mod.8/250, magnification 20); (*d*) – is an octahedral habit crystal with subordinate faces of a cube made of kimberlites of the Jubilee tube (mod.Yu-12/121, magnification 10).]



**Рис. 3.** Выделение магнетита в кимберлитах СП: *a-b* – кристаллы октаэдрического габитуса, нарастающие на выделения кальцита в кимберлитах трубки Новинка (увеличение 42); *c* – идиоморфная вкрапленность магнетита в серпофите из кимберлитов трубки Юбилейная (увеличение 42).

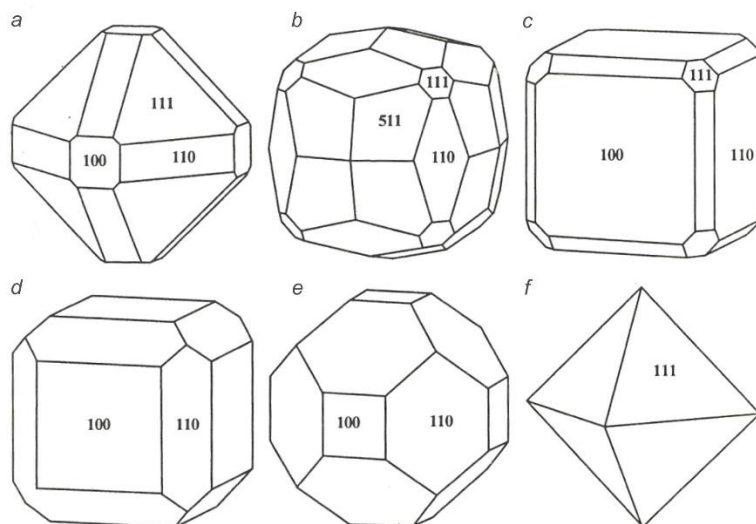
[**Fig. 3.** Magnetite isolation in kimberlites of SP: (*a-b*) – crystals of octahedral habitus, growing on calcite secretions in kimberlites of the Novinka tube (x 42); (*c*) – idiomorphic magnetite inclusions in serpoфyte from kimberlites of the Jubilee tube (x 42).

или сростки кристаллов, реже их отдельные выделения; б) скопления мелкозернистого магнетита, которые либо образуют в породе неправильные гнезда, полосы и линзы, либо равномерно распределены в её основной массе. На дифрактометрических кривых магнетит уверенно диагностируется (рис. 5. обр. I а-с, II а-с) по серии, характерных минералу рефлексов (0.253; 0.1612–0.1615 и 0.1483–0.1484 нм). Нередко по магнетиту развивается маггемит или  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (рефлексы:

0.252; 0.2087 и 0.1606 нм). Эти образования когерентно связаны друг с другом и имеют сходные структуру и состав. Маггемит в кимберлитах представляет промежуточную стадию процесса гипергенного преобразования магнетита в гематит [36–39]. У маггемита значение параметра *a* равно 0.8340 нм, в то время как у магнетита оно составляет 0.8397 нм, что отмечает начало структурных преобразований исходного минерала [40–42].

Магнетит  $\text{Fe}^{2+}\text{Fe}^{3+}_2\text{O}_4$  Magnetite  
Кубическая сингония,  
гексооктаэдрический вид симметрии.  $O_h - m\bar{3}m$  ( $3L_4 4L_3 6L_2 9PC$ )

Формы	$\varphi$	$\rho$
100	$90^\circ 00'$	$90^\circ 00'$
011	$0^\circ 00'$	$45^\circ 00'$
111	$45^\circ 00'$	$54^\circ 44'$
113	$45^\circ 00'$	$25^\circ 14'$
112	$45^\circ 00'$	$35^\circ 16'$

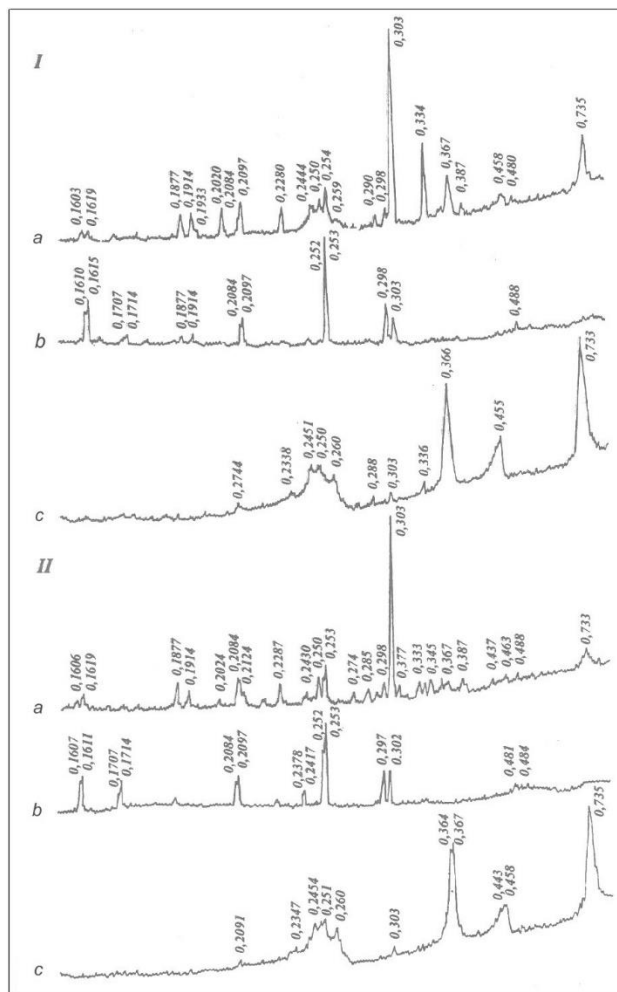


**Рис. 4.** Морфологические типы кристаллов магнетита из кимберлитовых пород Якутии. Трубки: *a* – Комсомольская-Магнитная (обр. К-9-113; *b–f* – Заполярная (обр. 3-13-403). С использованием материалов Б. П. Антонюка и Ю. М. Мельника.

[Fig. 4. Morphological types of magnetite crystals from kimberlite rocks of Yakutia. Tubes: (*a*) – Komsomolskaya-Magnetic (model K-9-113; (*b–f*) – Polar (model Z-13-403). Using materials by B. P. Antonyuk, Y. M. Melnik.]

В кимберлитовых диатремах Алакитского (АКП), Далдынского (ДКП), Верхнемунского (ВМКП), Накынского (НКП) и других полей СП магнетит по степени окисленности можно отнести к трем группам. *Первая группа* включает магнетит в виде крупных выделений, характеризующихся близкими к эталонному минералу [43–45] межплоскостными расстояниями  $d$ , соотношением интенсивностей и полуширины  $b$  рефлексов. У разновидностей этой группы не отмечено уширение и расщепление рефлексов, что свидетельствует [46] о хорошей их окристаллизованности и отсутствии признаков перехода в маггемит. Хорошая окристаллизованность магнетита из диатрем Невидимка, Молодежная и др., отнесенных нами к первой группе, отмечалась раньше и другими исследователями [47–50]. Слабое преобразование магнетита наблюдалось также у некоторых крупнокристаллических его разновидностей из ряда железорудных месторождений [51]. Указанная особенность магнетита этой группы подчеркивается [52] также характерным для него небольшим разбросом значений  $d/n$  и  $a$ . Ко *второй группе* относятся мелкокристаллические разновидности магнетита, встреченные либо в виде гнёзд и линзовидных скоплений, либо в виде зерен, распределенных в основной массе пород. Им свойственно увеличение маггемитовой составляющей, о чем свидетельствует как заметное смещение дифракционных максимумов в сторону уменьшения значений  $d/n$ , так и соответственно уменьшение вычис-

ленных по ним величин  $a$ . Магнетит этой группы отличается от рассмотренного выше увеличением полуширины и снижением интенсивностей рефлексов, что указывает на ухудшение его окристаллизованности и повышение степени окисленности. Однако у маггемитов этой группы маггемитизированный компонент на рентген-дифрактограммах в виде отдельной фазы не отмечается. *Третья группа* охватывает «пылевидные» разновидности магнетита, почти равномерно пропитывающего кимберлитовую породу. На дифрактограммах разновидностей этого типа становится различимым характерный для маггемита рефлекс со значением  $0.590$  нм и наблюдается полное расщепление рефлексов магнетита ( $d=0.2094$ ,  $0.1713$  и  $0.1612$  нм) и новообразованного маггемита ( $d=0.2087$ ;  $0.1703$  и  $1.1606$  нм). Магнетиты первой и третьей групп четко различаются при использовании прецизионной съемки [53–56]. В связи с высокой степенью окристаллизованности рефлексы образцов первой группы имеют высокую интенсивность и полное разрешение дублета  $a_1$  и  $a_2$ . Здесь фиксируется также появление рефлексов маггемитизированной фазы. Сохранение магнетита во всех изученных образцах подчеркивает начальную стадию окисления исходного минерала. Об этом свидетельствует, кроме того, весьма незначительная (на уровне следов) примесь в изученных породах гематита, возникающего обычно на более глубоких стадиях гипергенного преобразования исходного минерала.



**Рис. 5.** Дифрактометрические кривые зеленоватых (I-обр.У-6-1) и серовато-зеленых (II-обр.У-18-4) выделений серпофита из кимберлитов центральной части западного тела трубки Удачная: а – выделение серпофита в целом; б – черные участки в серпофитах, обогащенных редными минералами; в-г – зеленоватые (в) и серовато-зеленые (г) участки в серпофитах.

[Fig. 5. Diffraction curves of greenish (I-mod.U-6-1) and grayish-green (N-mod.U-18-4) serpophyte secretions from kimberlites of the central part of the western body of the Udachnaya tube: (a) – isolation of the serpophyte as a whole; (b) – black areas in serpophytes enriched with rare minerals; (c-d) – greenish (c) and grayish-green (d) areas in serpophytes.]

Для получения данных о кристаллохимических особенностях и механизме структурных превращений магнетита проведены исследования минерала методом ядерной гамма-резонансной спектроскопии (ЯГРС). Главное преимущество этого метода заключается в том, что он даёт возможность выделять и исследовать в объёме изучаемой пробы спектр атомов одного типа (и их непосредственное окружение в пределах нескольких координационных сфер), исключая спектры других элементов. С помощью этого метода можно непосредственно получать информацию о состоянии в структуре изучаемых минералов отдельных микрообластей и их кристаллохимических особенностей, которые могут быть обусловлены [57–60] как различным генезисом минералов, так и воздействием на них определен-

ных физико-химических факторов в процессе комплексного изучения их свойств. Хотя исследование руд и минералов методом ЯГРС сопровождается известными трудностями (особенно при интерпретации получаемых спектров), но он позволяет значительно расширить возможности фазового и структурного анализов, уточняя положение ионов кристаллической решетки отдельных фаз. При этом ЯГР-спектры аналогично любой спектральной кривой характеризуются определенными параметрами, к которым относятся: тонкая структура спектра, положение центра тяжести каждой линии, форма и высота её (соотношение сигнал-фон), соответствующая в последнем случае интегральной интенсивностью резонанса, а также полная ширина линий, определяемая на  $\frac{1}{2}$  и 0.1 высоты, характеризующая в последнем случае разрешающую способность системы детектирования, причем она особенно чувствительна к искажению формы пиков резонансного поглощения. Совокупность этих параметров даёт возможность уверенно идентифицировать изучаемые фазы и выявить не только их кристаллохимические особенности, но и изменения, связанными с теми или иными их преобразованиями в результате изменения параметров среды (давление, температура и химизм). Спектры ЯГР получены на установке, работающей в режиме постоянных ускорений, с использованием многоканального анализатора NTA-1024M. Воспроизводимость результатов проверялась по данным трех-четырёх независимых измерений. Источник  $^{57}\text{Co}$  в матрице хрома с поглотителем из нитропрусида натрия обеспечивал получение минимальной ширины линии в  $0.24 \pm 0.04$  мм/с. Для установления числа линий в спектре и определения точных значений их интегральной интенсивности и других параметров была использована ЭВМ ЕС-1030 [4]. При проведении исходного разложения были приняты некоторые ограничения (например, равенство полной ширины линий на половине высоты и лоренцовская форма одиночной линии). Для каждой группы линий с целью минимизации  $\chi^2$  – суммы квадратов отклонений от лучшего разложения, разделенной на дисперсию отдельных отсчетов (применялся гауссовский метод). Программа обеспечивала получение графического изображения разложенного спектра и остаточных отклонений. При разложении спектров магнетита ширина линий принималась равной инструментально измеренных их для гематита –  $0.30 \pm 0.04$  мм/с. Линии, представляющие комбинацию из двух и более лоренциан, которые не разрешаются в пределах  $\pm 0.04$  мм/с (что приводит к форме линий, слегка отличной от лоренцовской), принимались как отвечающие одной позиции иона Fe с интенсивностью, равной сумме этих же параметров составляющих компонент. Стратегия счета выбиралась из условия получения наиболее благоприятного отношения сигнал-фон.

Магнетит обладает структурой шпинели – пространственная группа  $O_h(Fd3m)$ , в которой катионы занимают 8 тетраэдрических (A) и 16 октаэдрических (B) позиций. Поэтому для идеальных кристаллов минерала –  $\text{Fe}_1^{3+}[\text{Fe}_1^{3+}\text{Fe}_1^{2+}]\cdot\text{O}_4$  – отношение интенсивнос-



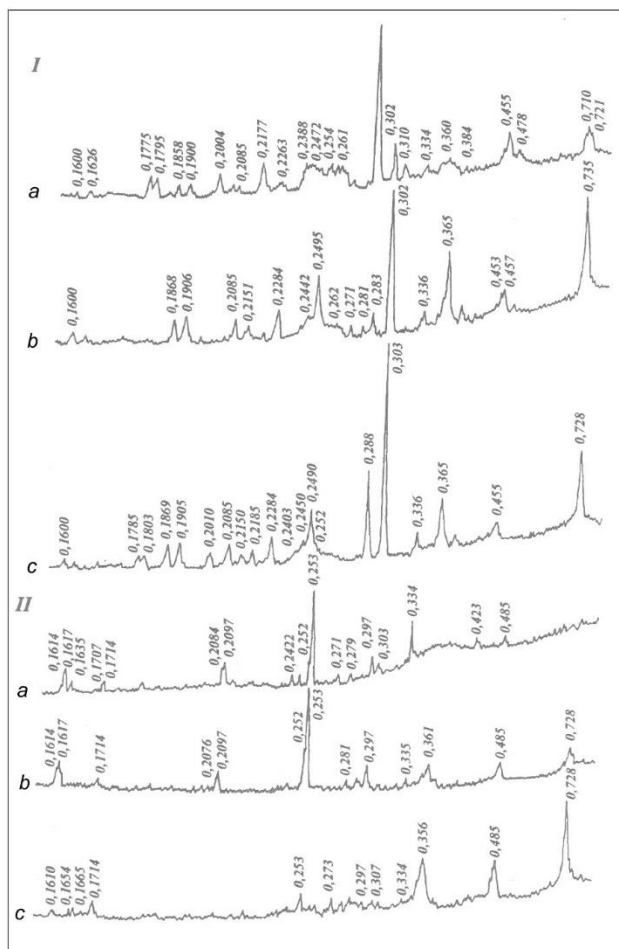
тей крайних левых линий ЯГР-спектров поглощения с учетом различия вероятностей эффекта ( $\sim 0.94$ ) для тетраэдрической и октаэдрической подрешеток должно быть  $\approx 0.5$ , что отражает соотношение ионов  $\text{Fe}^{3+}$  в *A*-позициях и ионов  $\text{Fe}^{2+}$  в *B*-позициях. Именно по этим параметрам фракция магнетита Оленегорского месторождения [4, 6, 17] была принята в качестве эталонной. В изученных нами разновидностях магнетита [27–30, 35] соотношение пиков в ЯГР-спектрах практически не проявляется, что может быть связано либо с изоморфным замещением  $\text{Fe}^{2+}$  ионами  $\text{Mg}$ ,  $\text{Ti}^{4+}$ ,  $\text{Ni}^{2+}$  и другими в *B*-позиции структуры магнетита, либо с наличием вакансий ( $\text{Fe}^{2+}$ ) в той же позиции. Появление указанных ионов  $\text{Fe}^{2+}$  в октаэдрической позиции обуславливает частичное снятие электронного обмена [ $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$ ], приводящее к изменению соотношения интенсивностей линий, отвечающих ионам  $\text{Fe}$  в *A*- и *B*-позициях с одновременным уширением не только крайней правой группы линий, но и всей совокупности резонансного спектра поглощения. Появление катионной вакансии в *B*-позиции приводит [4, 6, 36–39] не к уширению, а лишь к перераспределению интенсивностей линий, отвечающим ионам  $\text{Fe}^{3+}$  и [ $\text{Fe}^{3+}$   $\text{Fe}^{2+}$ ] в *A*- и *B*-позициях. Исследования с комплексом ЯГРС и магнетохимического анализа показали, что наблюдаемое отклонение интенсивностей крайних левых линий в ЯГР-спектре от требуемого соотношения связано с тем, что все изученные нами магнетиты представлены нестехиометрическими разностями с формулой:  $\text{Fe}_1^{3+}[\text{Fe}^{3+}_{5/3-2/3x}\text{Fe}^{2+}_{1/3-1/3x}]\cdot\text{O}_4-\delta$ , где  $\text{Fe}^{2+}_{1/3-1/3x}$  – катионная вакансия;  $\delta$  – дефицит структуры минерала по кислороду. Условие электронейтральности в структуре этой фазы выполняется за счет образования дефектов (электронных дырок). При этом, когда  $x \rightarrow 0$ , мы отмечаем существенную нестехиометричность, вплоть до чистого маггемита,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$ , а  $x = 1$  соответствует магнетиту стехиометрического состава  $\text{Fe}_1^{3+}[\text{Fe}_1^{3+}\text{Fe}_1^{2+}]\cdot\text{O}_4$ . Величина  $x$  экспериментально определяется по соотношению площадей левых пиков спектра поглощения. Для выделенных трех групп магнетита, характеризующихся специфическими условиями локализации,  $x$  изменяется в следующих пределах [4, 6]:  $1.0-0.5$ ;  $0.5-0.3$  и  $0.3-0.1$ . Природные магнетиты могут образовывать с маггемитом твердые растворы [17], что не приводит в этих случаях к образованию целочисленной суммы формульного количества катионов (у маггемита  $\text{M}_{24}\text{O}_{36}$  вместо  $\text{M}_{24}\text{O}_{32}$  у магнетита). Это позволяет утверждать, что маггемитизация магнетита из кимберлитов связана с окислением и выносом железа из его структуры, в результате чего возникает группа минералов с вакансиями типа  $\text{M}_{24}\text{O}_{36}$ . По данным эмиссионного спектрального и электронно-зондового анализов, микроэлементы в исследованных нами разновидностях крупнокристаллических магнетитов присутствуют в незначительном количестве. Некоторое возрастание содержания  $\text{Ti}$ ,  $\text{Mg}$  и  $\text{Ca}$  в мелкокристаллических и пылевидных разновидностях магнетита, согласно данным рентгеновской дифрактометрии и ЯГРС, связано с ассоциирующей с минералом примесью ильменита, кальцита, серпен-

тина и других минералов.

Очень интересными являются выделения вторичного магнетита в серпентинитах с офитовой структурой (серпофитах), отмеченные нами при изучении многих кимберлитовых диатрем СП (Мир, Юбилейная, Сытыканская, Удачная, Айхал и др.). В серпофите магнетит встречается [6–10] в виде скелетных кристаллов и лучистых агрегатов. В первом случае магнетит успел выкристаллизоваться только вдоль ребер, образуя каркас октаэдра, выполненного серпофитом. Скелет состоит из мелких кристаллов магнетита, ориентированных в одном направлении, причем две грани и ребро каждого последующего индивида являются продолжением предыдущего, образуя реберный каркас более крупного октаэдра [18–20]. Вершины скелетов представляют собой головы октаэдров мелких кристаллов магнетита. Лучистые выделения магнетита иногда сложены удлиненными индивидами, расходящимися от одного центра, но обычно плотно прилегают друг к другу. При расщеплении индивидов обнажается ступенчатая поверхность, свойственная тесно сросшимся кристаллам. Нередко в раздувах мелких жил и жеодах магнетит образует друзы, ассоциируя с кальцитом, баритом и другими новообразованиями. Иногда такие друзы и выделения магнетита покрыты тонкой пленкой гипса.

Поскольку в кимберлитовых породах магнетит ассоциирует с другими рудными минералами, нами проведено сравнительное изучение пикроильменита из ряда диатрем. Специфической особенностью изученных пикроильменитов по сравнению с магнетитами является более высокая степень окисленности в них железа. Для всех изученных зерен пикроильменита получены очень близкие ЯГР-спектры, подтверждая идентичность минерала и высокую его магнезиальность.

При выяснении типоморфных признаков Fe-содержащих минералов описываемых пород следует иметь в виду, что верхние части многих кимберлитовых диатрем СП и других регионов мира представляют собой типичную кору выветривания [3–10], причем влияние гипергенных процессов прослеживается на значительные глубины. Например, в трубке Удачная на глубинах 50–60 м от поверхности в некоторых частях кимберлиты имеют буроватую и красноватую окраску и сравнительно легко распадаются на составляющие породу компоненты. Поэтому особый интерес представляет вопрос о минеральном составе пелитовой составляющей выветрелых кимберлитов, поскольку она легко размывается и переотлагается в осадочных бассейнах вблизи денудированных диатрем. Согласно проведенным комплексным исследованиям, преобладающими минералами в пелитовой составляющей продуктов выветривания кимберлитов трубки Удачная являются преимущественно тонкодисперсные карбонаты (в основном кальцит и доломит) и серпентин, ассоциирующие с тонкодисперсным кварцем, магнетитом,  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  и пикроильменитом (рис. 6. обр. I а–с). Спектры ЯГР также указывают на присутствие в исследованных образцах магнетита, пикроильменита и серпентина,



**Рис. 6.** Дифрактометрические кривые пелитовой составляющей из измененных кимберлитов трубки Удачная (I) и верхнепалеозойских осадочных толщ, перекрывающих трубку Комсомольская (II): I – горизонт 275 м: а–в – образцы У-8-12, У-25-5 и У-33-5; II – разведочная шахта (Кш): а–б – участок, обогащенный рудными минералами (глубины, соответственно, 75.5 и 76 м), в – участок пород, макроскопически не содержащих магнитных минералов (глубина 75.5 м).

[Fig. 6. Diffractometric curves of the pelitic component from the modified kimberlites of the Udachnaya tube (I) and Upper Paleozoic sedimentary strata overlapping the Komsomolskaya tube (II): I – horizon 275 m: (a–b) – samples U-8-12, U-25-5 and U-33-5; II – exploration mine (Ksh): (a–b) is a site enriched with ore minerals (depths, respectively, 75.5 and 76 m), (d) – is a site of rocks macroscopically free of magnetic minerals (depth 75.5 m).]

близких по кристаллохимическим особенностям к исследованным однотипным минералам из неизмененных кимберлитов.

Другим важным аспектом рассматриваемой проблемы типоморфизма как магнетита, так и в целом Fe-содержащих минералов, генетически связанных с кимберлитами, является изучение их особенностей при переотложении элювиального материала в различных (преимущественно континентального типа) водоемах. С этой целью нами проведено комплексное изучение черных осадочных пород позднелавозойского возраста, перекрывающих в этом же алмазоносном районе трубку Комсомольская. Рентгенографическое изучение магнитных фракций из черных алевропесчаников

показало доминирование в них магнетита и  $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, ассоциирующих с кварцем, серпентином, а иногда и кальцитом. ЯГР-спектры образцов из обогащенных рудными минералами участков такой породы содержат линии магнетита, пикроильменита и серпентина (рис. 6. обр. II а–с). Однако отношение интенсивностей крайних левых линий магнетита в этом случае имеет еще большее значение по сравнению с аналогичным минералом из кимберлитовых пород, что свидетельствует о более значительной, чем в кимберлитах, окисленности переотложенного магнетита, происходящей [6, 17] при повышении парциального давления кислорода до  $0.2 \cdot 10^{-7}$  Па. При этом следует подчеркнуть, что переотложенный в осадочные толщи более мелкий магнетит, как и минерал из кимберлитов, не содержит примеси ни одного из способных к изоморфному замещению в его структуре элементов. В немагнитной части описываемой породы присутствуют серпентин (с примесью магнетита), ассоциирующий с пикроильменитом и кварцем. Поскольку в формировании описываемых верхнепалеозойских отложений определенную роль играл переотложенный материал широко развитых в регионе пород трапповой формации, то возникают определенные трудности при выяснении генетической природы многих Fe-содержащих минералов, отмечающихся в кимберлитах и долеритах, что практически невозможно разделить без исследований комплексом современных методов (рентгеновской дифрактометрии, съемок ЯГР-спектров, электронной микроскопии и др.). В тяжелой фракции образцов долеритов, перекрывающих трубку Комсомольская (включая непосредственно залегающие на ней верхнепалеозойские отложения) присутствует в основном ильменит, ЯГР-спектры которого характеризуются существенным увеличением значений полной ширины на 0.1 высоты (в 1.8 раза) по сравнению с аналогичными, но более магнетизальным минералом (пикроильменитом) из кимберлитов. В отдельных интервалах разреза долеритов описываемой территории присутствуют разности Fe-содержащих минералов, которые имеют не только долеритовую, но и кимберлитовую природу, на что в последнем случае указывает увеличение количества магнетита, характерного для кимберлитов.

Содержание Fe-содержащих минералов в кимберлитах, вмещающих и перекрывающих породах существенно влияют на их петрофизические свойства, что очень важно при проведении поисковых и технологических работ. Так, магнитная восприимчивость и плотность пород кимберлитовой трубки Мир Мирнинского кимберлитового поля (МКП) существенно меняется как в плане, так и на разведанную глубину [11–13]. При этом, разброс значений магнитной восприимчивости в соседних участках породы может достигать первые тысячи единиц СГС (сантиметр-грамм-секунда). По степени магнитности верхние горизонты трубки (0–200 м) разделяются на две части: северо-западную со средней магнитной восприимчивостью в пределах  $(300–400) \cdot 10^{-6}$  СГС и юго-восточную, где она снижается до  $(250–350) \cdot 10^{-6}$  СГС. Центральные участки

выделенных блоков имеют повышенное значение магнитности, тогда как приконтактные, наоборот, пониженные. В интервале глубин 200–500 м значение магнитной восприимчивости понижены –  $(70–80) \cdot 10^{-6}$ . На глубине 1–1.2 км магнитность кимберлита в среднем ниже, чем в верхней части –  $(200–250) \cdot 10^{-6}$  СГС. Остаточная намагниченность кимберлитовой трубки Мир обычно меньше индуцированной. Исключение составляет горизонт трубки в интервале глубин 200–500 м, где остаточная намагниченность в основном превышает индуцированную, а величина фактора Q (относительной величины естественной остаточной намагниченности) наибольшая, достигающая в среднем 2–3.

Несколько отличающимися магнитными свойствами отличаются кимберлиты трубки *Интернациональная*, расположенной в 16 км к юго-западу от трубки Мир на правом берегу р.Ирелях, в верхнем течении её правых притоков Маччоба-Салаа и Улаах-Юрах [18–20]. Как и большинство кимберлитовых тел МКП, она тяготеет к зоне Западного разлома, размещаясь на расстоянии 3 км от его осевой линии. До глубины 100 м размеры трубки существенно не уменьшаются, хотя её тело в целом склоняется в юго-восточном направлении. До глубины 300 м трубка сложена слабомагнитными кимберлитами. Их магнитная восприимчивость в интервалах 0–50, 50–100 и 100–300 м составляет в среднем, соответственно,  $37 \cdot 10^{-6}$ ,  $65 \cdot 10^{-6}$  и  $85 \cdot 10^{-6}$  СГС. Лишь на глубине 460–480 м отмечен участок кимберлитов с высокой магнитной восприимчивостью, достигающей  $2100 \cdot 10^{-6}$  СГС. Остаточная намагниченность кимберлитов трубки низкая и в большинстве случаев она меньше индукционной.

Еще более изменяющиеся магнитные характеристики отмечены в кимберлитовых трубках небольших размеров этого же кимберлитового поля. Так, над небольшой трубкой *Дачная* (размером 120x100 м), приуроченной к Параллельному разлому и расположенной в 10 км южнее трубки Мир (МКП), магнитная аномалия в эпицентре не превышает  $20 \cdot 10^{-6}$  СГС. Очень слабая магнитность кимберлитов трубки *Дачная* объясняется сильным гипергенным и метасоматическим изменением пород диатремы [24–26]. Средняя магнитная восприимчивость для отдельных интервалов кимберлитов трубки не превышает  $100 \cdot 10^{-6}$  СГС, а приповерхностных слоев  $60 \cdot 10^{-6}$  СГС. Относительно слаба и аномалия силы тяжести, амплитуда которой не превышает 0.1 мГал.

Существенно изменяются магнитные свойства кимберлитов и других алмазоносных районах Якутской алмазоносной провинции (ЯАП). Так, в Далдыно-Алаkitском алмазоносном районе (ДААР) кимберлитовые брекчии юго-западной части трубки *Айхал* и кимберлитовые туфы сильно магнитны. Магнитная восприимчивость этих пород обычно меньше  $(40–50) \cdot 10^{-6}$  СГС. Их остаточная намагниченность также незначительна [30–33]. Несколько более высокую магнитную восприимчивость (до  $400 \cdot 10^{-6}$  СГС) имеют голубые и зеленые брекчии, слагающие центральную часть трубки *Айхал*. Повышенной магнитной восприимчивостью, достигающей  $3000 \cdot 10^{-6}$  СГС, обладают

только брекчии зеленого, грязно-зеленого и коричневого цвета, закартированные в юго-западной части диатремы. Фактор Q в среднем по группам изученных нами проб не превышает 0.5. Кимберлиты рядом расположенных даек, а также участки окварцованных пород трубки практически немагнитны.

В кимберлитовых трубках сложного геологического строения этого же алмазоносного района магнитные свойства пород меняются в разных телах, что можно рассмотреть на примере трубки *Удачная*, состоящей из двух сопряженных тел (западного и восточного) и на поверхности в плане имеющей форму искаженной восьмерки [36–38]. Западное тело значительно больше по размеру, чем восточное. Трубка прослежена буровыми скважинами до глубины 1400 м. В верхней части (до глубины 250 м) западное и восточное тела непосредственно контактируют друг с другом, а глубже они разобщены. На глубине 600 м оба тела в плане становятся изометричными, почти округлыми. *Западное тело трубки Удачная* до глубины 450–530 м выполнено кимберлитовыми брекчиями серого и зеленовато-серого цвета (первая фаза внедрения). Кимберлитовые брекчии второй фазы внедрения выполняют основной объем глубоких горизонтов западного тела трубки. В распределении магнитной восприимчивости кимберлитов западного тела диатремы наблюдается отчетливая концентрическая зональность: наиболее магнитны кимберлиты центральных частей тела –  $(3000–4000) \cdot 10^{-6}$  СГС, менее магнитны породы приконтактных зон –  $(250–500) \cdot 10^{-6}$  СГС. Отмечена субширотная зона повышенной намагниченности пород. Максимум намагниченности кимберлитов располагается в центральной части западного тела, в целом совпадающий с положением корневой части последнего. Интересна закономерность изменения магнитной восприимчивости кимберлитов с глубиной: примерно до 200 м её значение возрастает, достигая на глубине 150–200 м  $(1800–2000) \cdot 10^{-6}$  СГС (в приповерхностной части в этом месте оно не превышало  $1500 \cdot 10^{-6}$  СГС). Затем намечается резкое понижение средней магнитной восприимчивости – на глубинах 600–1000 м она уже имеет значения  $(100–300) \cdot 10^{-6}$  СГС. Такие изменения объясняются повышенной серпентинизацией кимберлитов верхних горизонтов западного тела. Остаточное намагничение кимберлитовых брекчий тела незначительное по сравнению с индуцированным, а фактор Q варьирует от 0.4 до 0.9, не создавая никакой закономерности. При разведке глубоких горизонтов *восточного тела трубки Удачная* установлено две фазы внедрения кимберлитов. Кимберлиты первой фазы в виде относительно небольших блоков зажаты в породах второй, выполняющих основной объем тела. В восточном теле трубки кимберлиты с максимальной восприимчивостью приурочены к центральным участкам тела и его восточным флангам, тогда как в приконтактной зоне они имеют пониженные значения этой характеристики. До глубины 100 м магнитная восприимчивость кимберлитов восточного тела составляют  $(1800–1900) \cdot 10^{-6}$  СГС. Начиная с глубины 200 м значение



этого параметра заметно уменьшается и в интервале 650–800 м оно составляет всего  $10 \cdot 10^{-6}$  СГС.

Наименьшие концентрации магнетита отмечены нами в кимберлитах трубок *Нюрбинская* и *Ботуобинская* Накынского кимберлитового поля (НКП), что существенно понижает магнитные свойства этих образований, затрудняя поиски в этом районе алмазонасных диатрем магнитометрическими методами [40–43]. На основании проведенных исследований построены параметрические петрорадиоволновые физико-геологические модели этих диатрем, отчетливо иллюстрирующие контрастную дифференциацию кимберлитов и вмещающих их пород по электрическим, магнитным и радиоволновым параметрам. Юго-западная часть трубки Ботуобинская, представляет собой в верхней части дайкообразное тело северо-восточного направления, северо-восточная – имеет форму овала. На рассматриваемом месторождении развиты кимберлиты двух фаз внедрения. Ранняя фаза представлена порфировым кимберлитом (ПК), слагающим дайковую часть трубки. Вторая фаза эксплозивных кимберлитовых брекчий (ЭКБ) проявлена в верхней части дайкообразного тела и вертикальном канале диатремы. В самой верхней части трубки сохранились породы кратерных фаций, сложенные кимберлитовыми туфобрекчиями (КТБ). В кимберлитовой трубке Нюрбинская на глубине 124 м в пределах юго-западного фланга выявлено жильное тело кимберлитов. Вблизи юго-западной и восточной частей трубки вскрыты карстовые воронки, заполненные оползневыми образованиями мощностью 20–42 м, обогащенными продуктами выветривания кимберлитов. На глубинах от 296 до 332 м вскрыта мощная интрузия траппов, прорывающая кимберлитовое тело. Вдоль границ интрузии образовались зоны (5–10 м) метасоматически измененных траппов. Кимберлиты в этих зонах приобретают массивную текстуру и характеризуются пятнистой окраской и расплывчатыми очертаниями ксенолитов осадочных пород. На глубине порядка 450 м в зоне контакта с интрузией кимберлиты представлены апокимберлитовыми метасоматитами по автолитовой брекчии, отличающимися по всем петрофизическим параметрам. Интрузия сложена мелко-, среднезернистыми долеритами темно-серого до черного цвета, массивной до такситовой текстуры, офитовой до витрофировой структуры. Верхние горизонты трубки Нюрбинская сложены АКБ, которая разделяется на мелко-среднеобломочную (центральная часть диатремы) и карбонатную кимберлитовую брекчию (КБ) приконтактной зоны северо-восточного и юго-западного флангов. Эти части диатрем интенсивно изменены гипергенными процессами, представляя собой типичную кору выветривания, характеризующуюся своими петрографическими и минералогическими особенностями. Петрофизические особенности пород обоих диатрем в зависимости от степени постмагматической и гипергенной измененности изменяются как по горизонтали, так и по вертикали и во многом различаются в различных типах кимберлитов по содержанию в них Fe-содержащих минералов,

что обязательно надо учитывать при проведении на перспективных территориях алмазописковых работ с помощью геолого-петрофизических методов.

### Заключение

Таким образом, проведенные исследования показали, что отсутствие изоморфных замещений и повсеместная нестехиометричность магнетита в кимберлитах указывают на образование преобладающей доли его при относительно низких термобарических параметрах среды в постмагматическую стадию изменения пород. Первичный гипогенный нестехиометрический магнетит возникает, согласно анализа фазовой диаграммы Fe-O, при температуре свыше 1200°C. Это позволяет довольно аргументировано утверждать, что большая часть изученных нами магнетитов относится к вторичным образованиям, причем отдельные разновидности минерала отражают различные стадии его преобразования. Об этом свидетельствует и последовательное, близкое к линейному закону изменение параметра  $a$  магнетитов в первой и третьей группе. Стабильность фаз в отношении определяется не только парциальным давлением кислорода и температурой среды, но и скоростью протекания при этом соответствующих реакций. Поскольку магнетиту свойственна структура шпинели, то отмечается резко выраженная склонность к образованию вакансий в металлических подрешетках, которые играют важную роль в диффузионных процессах. Результаты ЯГР-исследований магнетитов из кимберлитов позволили на доле катионных вакансий фиксировать достижение квазиравновесного состояния. Так, в процессе преобразования магнетита превалирует кинетический фактор, что приводит к более интенсивному окислению мелкозернистого магнетита, по сравнению с крупнозернистой разновидностью. Сведения о наличии вакансий в структуре магнетита необходимо также учитывать для получения достоверных результатов в случае определения количественного содержания минерала в породе химическим методом, основанным на прямом селективном её растворении. Приведенные данные о кристаллохимических особенностях магнетитов с учетом стадийности их изменения рекомендовано для практического использования как при картировании кимберлитовых тел и приуроченных к ним коренных месторождений алмазов, так и при поисках вторичных коллекторов и связанных с ними алмазных залежей россыпного типа.

Образование магнетита в серпофитах из кимберлитовых диатрем происходило по-разному. Магнетит в виде лучистых агрегатов и скелетных форм образовался в вязкой среде, которой мог служить затвердевающий из коллоидов серпофит. Образовании лучистых агрегатов происходило в сильно пересыщенном растворе очень быстро, в отличие от медленного процесса построения скелетных форм минерала. Кристаллизационная сила магнетита была достаточно большой, способной отодвигать в процессе роста незатвердевший силикат. Образование скелетного магнетита могло происходить за счет железа, находящегося в

растворе кристаллизующегося серпфита. Серпентиновые минералы в серпфите представлены в основном хризотилом – наиболее чистой разновидностью, образующейся при сравнительно низких температурах. Отсутствие в таком магнетите изоморфных примесей других элементов также может указывать на происхождение минерала в конечную стадию пневматолитово-гидротермального процесса образования кимберлитовых пород.

Сравнительное изучение фазового состава и структурных особенностей магнетитов из кимберлитов, вмещающих диатремы долеритов и перекрывающих трубки осадочных толщ, показало связь данных параметров с типом содержащих эти минералы пород, геологическими условиями залегания последних и особенностями их изменений. Процесс изменения магнетитов сопровождается окислением ионов  $\text{Fe}^{2+}$  в октаэдрической позиции минерала и последующим переходом его в маггемит. Для всех исследованных нами магнетитов отношение  $\text{Fe}^{3+}$  в А-позиции к  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}^{2+}$  в В-позиции, составляющее в «идеальном» магнетите ~0.5, в кимберлитах увеличивается до 1.05, а в продуктах перераспределения последних и вмещающих кимберлитовые тела долеритах соответственно до ~1.1 и ~1.5. Отмеченное отсутствие изоморфного замещения  $\text{Fe}^{2+}$  на  $\text{Mg}^{2+}$  и другие ионы в октаэдрической позиции структуры магнетита показывает, что первоначальное возникновение оксимангнетитов в кимберлитах и долеритах связано с образованием их в результате вторичных процессов восстановления  $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$  (при уменьшении в среде минералообразования парциального давления  $\text{O}_2$ ). Одновременно с этим взаимодействие других магнийсодержащих минералов с  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  было невозможно вследствие относительно низких термобарических условий, свойственных среде минералообразования. При этом количество катионных вакансий в структуре магнетита непостоянно в отдельных типах изученных пород и даже в неизмененных гипергенными процессами кимберлитах. Отмеченные кристаллохимические особенности изученных магнетитов имеют не только важное генетическое, но и большое практическое значение. Установленная нестехиометричность магнетитов из кимберлитов и вмещающих диатремы пород (долеритов) должна учитываться при количественном определении минерала в них с помощью различных методов исследований (химического анализа и др.). Следует отметить, что значительно меньшие значения размеров кристаллов, идентифицируемых ЯГРС, по сравнению с необходимыми для рентгеновских исследований, позволяют изучать в этом случае более мелкокрапленные Fe-содержащие фазы, что значительно расширяет круг типоморфных признаков вторичных минералов как в кимберлитах, так и в конвергентных с ними породах.

Магнетит и продукты его изменения существенно влияют на магнитные свойства кимберлитов, что очень важно учитывать при прогнозно-поисковых работах на алмазы. В региональном магнитном поле кимберлитовые тела располагаются в обширной отрицательной

аномалии, обусловленной неоднородностью строения фундамента и количественного содержания магнитных минералов в диатремах. На фоне плавного изменяющегося магнитного поля обычно четко фиксируются аномалии, связанные с известными кимберлитовыми телами. Большинство кимберлитовых трубок, даек и жил были зафиксированы магнитной съемкой масштаба 1:5000. Вмещающие кимберлитовые трубки породы нижнего палеозоя являются слабо магнитными – их магнитная восприимчивость составляет менее  $10 \cdot 10^{-6}$  СМС, а поэтому трубки с магнетитом и продуктами его изменения создают аномалии магнитного поля. Остаточная намагниченность кимберлитов обычно меньше индуцированной, за исключением их массивных разностей, у которых первая может в несколько раз превышать вторую и иметь обратное направление вектора намагничивания. Поэтому на некоторых трубках (Поисковая, Магнитная и др.) непосредственно в их контурах фиксируются локальные отрицательные поля. Поскольку на большинстве же кимберлитовых трубок фиксируются наличием положительных аномалий, то магнитометрическая съемка до сих пор является одним из главных поисковых методов на коренные месторождения алмазов.

*Конфликт интересов:* Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И. Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных россыпей северо-востока Сибирской платформы // *Доклады Академии наук*. 1998. Т. 361. № 3. С. 366–369.
2. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логвинова А. Н. Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // *Записки Российского минералогического общества*. 2009. Т. 138. № 2. С. 1–13.
3. Афанасьев В. П., Похиленко Н. П., Логвинова А. М., Зинчук Н. Н., Ефимова Э. С., Сафьянников В. И., Красавчиков В. О., Подгорных М. М., Пругов В. П. Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // *Геология и геофизика*. 2000. Т. 41. № 12. С. 1729–1741.
4. Бардухинов Л. Д., Зинчук Н. Н. Алмазы из древних осадочных толщ и их поставщики (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // *Руды и металлы*. 2022. № 2. С. 65–86.
5. Хмельков А. М., Константинов К. М., Власова Э. А., Антонова Т. А. О магнетите как минерале-индикаторе из кимберлитов // *Руды и металлы*. 2019. № 3. С. 44–51.
6. Богатилов О. А., Кононова В. А., Голубева Ю. Ю., Зинчук Н. Н., Илупин И. П., Ротман А. Я., Левский Л. К., Овчинникова Г. В., Кондрашов И. А. Петрогеохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // *Геохимия*. 2004. № 9. С. 915–939.
7. Братусь М. Д., Зинчук Н. Н., Аргунов К. П., Сворень И. М. Состав флюидов во включениях в кристаллах алмаза Якутии // *Минералогический журнал*. 1990. Т. 12. № 4. С. 49–56.

8. Братусь М. Д., Зинчук Н. Н., Краузе Г. Р., Витык М. О. Условия кристаллизации и изотопная природа серы, углерода и кислорода сульфидно-кальцевой ассоциации в трубке Удачная (Якутия) // *Геохимия*. 1998. № 3. С. 264–270.
9. Братусь М.Д., Сворень И.М., Зинчук Н.Н., Аргунов К.П. Газовые компоненты включений в алмазах различных морфологических типов из Якутии // *Геохимия*. 1991. № 11. С. 1586–1595.
10. Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2000. № 3. (9). С. 37–55.
11. Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. Автолитовые кимберлиты как продукт вязкостной дифференциации кимберлитового расплава в диатремах // *Петрология*. 2000. Т. 8. № 3. С. 549–560.
12. Василенко В. Б., Зинчук Н. Н., Кузнецова Л. Г. О сопряженности составов глубинных включений в петрохимических разновидностях кимберлитов в диатремах Якутии // *Петрология*. 2001. Т. 9. № 1. С. 1–12.
13. Василенко В. Б., Кузнецова Л. Г., Зинчук Н. Н. Петрохимическая фактография кимберлитовой провинции Восточной Сибири. Новосибирск: Параллель, 2019. 754 с.
14. Горшков А. И., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлисов А. П., Мохов А. В., Сивцов А. В. Новый упорядоченный смешанослойный минерал лизардит-сапонит из кимберлитов Южной Африки // *Доклады РАН*. 2002. Т. 382. № 3. С. 374–378.
15. Егоров К. Н., Зинчук Н. Н., Мишенин С. Г., Серов В. П., Секерин А. П., Галенко В.П., Денисенко Е.П., Барышев А.С., Меньшагин Ю.В., Кошкарёв Д.А. Перспективы коренной и россыпной алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы. Сб.: Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Мирный: МГТ, 2003. С.50–84.
16. Зинчук Н. Н. Состав и генезис глинистых минералов в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // *Геология и геофизика*. 1981. № 8. С. 22–29.
17. Зинчук Н. Н. Об основных источниках глинистых минералов в мезозойских континентальных алмазоносных отложениях Западной Якутии // *Геология и геофизика*. 1982. № 8. С. 81–90.
18. Зинчук Н. Н. Особенности состава и распределения слюдястых образований в кимберлитовых породах Якутии // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 1991. № 7. С. 58–66.
19. Зинчук Н. Н. Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород // *Геология и геофизика*. 1998. Т. 39. № 12. С. 1704–1715.
20. Зинчук Н. Н. Особенности минералов слюд в кимберлитах // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2018. № 2. С. 29–39.
21. Зинчук Н. Н. Типоморфные свойства индикаторных минералов кимберлитов и их использование при прогнозировании месторождений алмаза на Сибирской платформе // *Отечественная геология*. 2021. № 2. С. 41–56.
22. Зинчук Н. Н. Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 3. С. 50–61.
23. Зинчук Н. Н. Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2021. № 4. С. 35–52.
24. Зинчук Н. Н. Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазоносности кимберлитов // *Отечественная геология*. 2022. № 1. С. 36–47.
25. Зинчук Н.Н. Кремнистые минералы в кимберлитах // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. № 4. С.38–52.
26. Зинчук Н. Н. Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород // *Отечественная геология*. 2022. № 4. С. 34–49.
27. Зинчук Н. Н. Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ // *Руды и металлы*. 2022. № 2. С. 100–120.
28. Зинчук Н. Н. О специфике глинистых минералов в осадочных формациях // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2022. № 1. С. 10–23.
29. Зинчук Н. Н., Афанасьев В. П. Генетические типы и основные закономерности формирования алмазоносных россыпей // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 1998. № 2. С. 66–71.
30. Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых работах (на примере Сибирской платформы) // *Руды и металлы*. 2021. № 3. С. 59–75.
31. Зинчук Н.Н., Бардухинов Л.Д. Алмазы из низкопродуктивных кимберлитов // *Руды и металлы*. 2022. № 1. С. 77–93.
32. Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. О специфике докембрийских источников алмазов в россыпях // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2022. Т. 21. № 2. С. 149–166.
33. Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д. Алмазы из полупромышленных кимберлитов // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2022. № 2. С. 32–45.
34. Зинчук Н. Н., Борис Е. И. О концентрации продуктов перераспределения кор выветривания в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // *Геология и геофизика*. 1981. № 8. С. 22–29.
35. Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Стегницкий Ю. Б. Структурно-формационное и минерогенетическое районирование территорий развития погребенных кор выветривания и продуктов их перераспределения в алмазоносных регионах (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // *Геология и геофизика*. 1998. Т. 39. № 7. С. 950–964.
36. Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлисов А. П. Структурно-кристаллохимические преобразования слоистых минералов на разных стадиях гипергенного изменения кимберлитов // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. 2002. № 1. С. 47–60.

37. Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д. Стратегия ведения и результаты алмазопонсковых работ // *Горный Вестник*. 1997. № 3. С. 53–57.
38. Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Горшков А. И. Идентификация и генезис лизардит-сапонитового смешанослойного образования в кимберлитах одной из трубок Южной Африки // *Литология и полезные ископаемые*. 2003. № 1. С. 87–96.
39. Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Соколов В. Н. Изменение минерального состава и структурных особенностей кимберлитов Якутии в процессе выветривания // *Геология и геофизика*. 1982. № 2. С. 42–53.
40. Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П. Апокимберлитовые породы // *Геология и геофизика*. 1987. № 10. С. 66–72.
41. Кедрова Т. В., Богуш И. Н., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н. Алмазы укугутской свиты россыпи Нюрбинская, Накынское кимберлитовое поле Сибирской платформы // *Руды и металлы*. 2020. № 2. С. 69–77.
42. Кедрова Т. В., Богуш И. Н., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н. Типоморфные свойства алмазов дхятярской толщи россыпи Нюрбинская // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2020. № 3. С. 45–54.
43. Кедрова Т. В., Богуш И. Н., Зинчук Н. Н., Бардухинов Л. Д., Липашова А. Н., Афанасьев В. П. Россыпи алмазов Накынского поля // *Геология и геофизика*. 2022. Т. 63. № 3. С. 291–302.
44. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдястых минералов // *Известия ВУЗов. Геология и разведка*. 1996. № 1. С. 53–61.
45. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // *Известия ВУЗов. Геология и разведка*. 1997. № 2. С. 53–63.
46. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в отложениях терригенной формации // *Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический*. 2001. Т. 76. № 1. С. 45–53.
47. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратисферу // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2003. № 2. С. 57–68.
48. Ротман А. Я., Зинчук Н. Н., Ащепков И. В., Егоров К. Н. Кимберлиты и перспективы их исследований. Геология алмазов – настоящее и будущее (геологи 50-летнему Юбилею г. Мирного и алмазодобывающей промышленности России). Воронеж: ВГУ. 2005. С. 856–892.
49. Савко А. Д., Зинчук Н. Н., Шевырëв Л. Т., Ильяш В. В., Афанасьев Н. С. Алмазность Воронежской антеклизы. Труды НИИГ Воронежского ун-та. 2003. Т. 17. 121 с.
50. Толстов А. В., Зинчук Н. Н. Вклад Алмазной лаборатории ЦНИГРИ в научную кладовую Якутии // *Руды и металлы*. 2022. № 2. С. 25–35.
51. Харьков А. Д., Зуенко В. В., Зинчук Н. Н., Крючков А. И., Уханов А. В., Богатых М. М. Петрохимия кимберлитов. М.: Недра, 1991. 304 с.
52. Хитров В. Г., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // *Доклады АН СССР*. 1987. Т. 296. № 5. С. 1228–1233.
53. Зинчук Н. Н. О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий // *Отечественная геология*. 2023. № 1. С. 42–55.
54. Зинчук Н. Н. Литолого-стратиграфические исследования при алмазопонсковых работах // *Вестник СВФУ. Науки о Земле*. 2023. № 1(29). С. 5–28.
55. Зинчук Н. Н. Особенности гидротермального и гипергенного изменения слюдястых кимберлитов // *Вестник Пермского университета. Геология*. 2023. Т. 22. № 1. С. 32–50.
56. Зинчук Н. Н. Сульфаты в кимберлитовых породах // *Отечественная геология*. 2023. № 2. С. 56–72.
57. Зинчук Н. Н. Особенности кальцита из кимберлитовых пород // *Вестник Воронежского государственного университета. Серия: Геология*. 2023. № 2. С. 28–43.
58. Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform // *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 465. No. 2. P. 1297–1301.
59. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform // *Petrology*. 2001. Vol. 9. No. 6. P. 576–588.
60. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I., Zinchuk N. N., Krasavchikov V. O. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry // *Journal of Geochemical Exploration*. 2002. Vol. 76. No. 2. P. 93–112.

## Features of magnetite from kimberlite rocks

©2024 N. N. Zinchuk✉

*West-Yakutian Scientific Centre of the SR (Yakutia) Academy of Sciences,  
Tichonova 5/1, 678170, Mirni, Russian Federation*

### Abstract

*Introduction:* the main method of prospecting for diamond deposits is schlich-mineralogical (SMM) using the indicator minerals kimberlites (KIM) of diamond, pyrope, picroilmenite, chromium spinel, chromium diopside et. The effectiveness of this method is determined by the direct Signs of the diamond content of the territories by the discovery of diamond and other kimberlite minerals that have clearly defined typomorphic features. However when using CMM in some cases there are difficulties in identifying some minerals, especially those occurring equally in both kimberlites and other rocks common in diamondiferous regions. These minerals include ore formations (primarily magnetite), which are especially difficult to diagnose when individuals are small and mainly when they are small disseminated in rocks. Magnetite in these rocks usually bears traces of superimposed changes and therefore often diagnostics, as well as fine methods of physicochemical studies.

*Objects, research methodology and discussion of the results:* results of complex research of magnetite from kimberlites are provided, formation of which in certain cases took place in magmatic conditions, and in others (prevailing in pipes) – in the process of postmagmatic and hypogene alteration of rocks. Primary hypogene nonstoichiometric magnetite originates at temperature above 1200°C. Since kinetic factor prevails in the process of magnetite transformation, then in the first turn intensive oxidation of fine-grained releases occurs, in comparison with coarse-grained differences. It is recommended to use crystal-chemical features of magnetite in practice, with consideration of staging of its alteration, when mapping kimberlite diatremes, quantitative determination of mineral in them by various methods of investigation, as well as for prospecting of secondary collectors and related with them diamond deposits of placer type. Comparative study of phase composition and structural features of magnetites from kimberlites, hosting diatremes of dolerites and sedimentary thick layers overlapping pipes, showed connection of these parameters with the type of rocks containing this mineral, geological conditions of bedding and specific features of their alteration.

*Conclusion:* the conducted studies have shown that the absence of isomorphic replacement and the ubiquitous nonstoichiometric nature of magnetite in kimberlites indicate the formation of its predominant fraction of relatively low thermobaric parameters of the media the postmagmatic stage of rock alteration. The stability of the phases is determined not only by the partial pressure of oxygen, the temperature of the medium, but also by the rate of the corresponding reactions. In the process of transformation of magnetite, compared with coarse-grained difference. Information about the presence of vacancies in the structure of magnetite must be taken into account in the case of determining the quantitative content of the mineral in the rock by the chemical method. The typomorphic features of magnetites, taking into account the stages of their change, can be used in the search for primary diamond deposits and associated secondary reservoirs.

**Keywords:** kimberlites, magnetite, ferruginous minerals and their typomorphism.



The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

✉ Nikolay N. Zinchuk, e-mail: nnzinchuk@rambler.ru

For citation: Zinchuk N. N. Features of magnetite in kimberlite rocks // *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 4, pp. 32–47. DOI: <https://doi.org/10.17308/geology/1609-0691/2023/4/00-00>

*Conflict of interests:* The author declare the absence of obvious and potential conflicts of interest related to the publication of this article.

## REFERENCES

1. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Poligenez almazov v svyazi s problemoi korennykh rossypei severo-vostoka Sibirskoi platform [Polygenesis of diamonds in connection with the problem of bedrock placers in the north-east of the Siberian platform]. *Doklady Akademii nauk – Reports of the Academy of Sciences*, 1998, vol. 361, no. 3, pp. 366–369 (In Russ.)
2. Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Logvinova A. N. Osobennosti raspredeleniya rossypnykh almazov, svyazannykh s dokembriiskimi istochnikami [Peculiarities of distribution of placer diamonds associated with Precambrian sources]. *Zapiski Rossiiskogo mineralogicheskogo obshchestva – Notes of the Russian Mineralogical Society*, 2009, vol. 138, no. 2, pp. 1–13 (In Russ.)
3. Afanas'ev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Efimova E. S., Saf'yannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornyykh M. M., Prugov V. P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadei v svyazi s problemoi «lozhnykh» indikatorov kimberlitov [Features of the morphology and composition of some chromspinel of diamond-bearing areas in connection with the problem of "false" indicators of kimberlites]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 2000, vol. 41, no. 12, pp. 1729–1741 (In Russ.)
4. Barduchinov L. D., Zinchuk N. N. Almazы iz drevnykh osadochnykh tolshh i ih postavshhiki (na primere Yakutskoy kimberlitovoy provincii) [Diamonds in old sedimentary rocks and their source (on the basis of Yakutia kimberlite province)]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2022, no. 2, pp. 65–86 (In Russ.)
5. Hmel'kov A. M., Konstantinov K. M., Vlasova Je. A., Antonova T. A. O magnetite kak minerale-indikatore iz kimberlitov [Magnetite: kimberlite indicator mineral]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2019, no. 3, pp. 44–51 (In Russ.)
6. Bogatikov O. A., Kononova V. A., Golubeva Ju. Ju., Zinchuk N. N., Ilupin I. P., Rotman A. Ja., Levskiy L. K., Ovchinnikova G. V., Kondrashov I. A. Petrogeohimicheskie i izotopnye variatsii sostava kimberlitov Yakutii i ih prichiny [Petrogeochemical and isotopic variations in the composition of Yakutia kimberlites and their Causes]. *Geohimija – Geochemistry*, 2004, no. 9, pp. 915–939 (In Russ.)
7. Bratus' M. D., Zinchuk N. N., Argunov K. P., Svoren' I. M. Sostav fluidov vo vklucheniiah v kristallakh almaza Yakutii [Fluid composition in the inclusions in Yakutia diamond crystals]. *Mineralogicheskij zhurnal – Mineralogische dzurnal*, 1990, vol. 12, no. 4, pp. 49–56 (In Russ.)
8. Bratus' M. D., Zinchuk N. N., Krauze G. R., Vityk M. O. Usloviya kristallizatsii i izotopnaya priroda sery, ugleroda i kisloroda sul'fidno-kal'cievoj associatsii v trubke Udachnaya (Yakutia) [Conditions of crystallization and isotopic nature of sulfur, carbon and oxygen of sulfide-calcic association in pipe "Udachnaya" (Yakutia)]. *Geohimija – Geochemistry*, 1998, no. 3, pp. 264–270 (In Russ.)
9. Bratus' M. D., Svoren' I. M., Zinchuk N. N., Argunov K. P. Gazovye komponenty vklucheniij v almazah razlichnykh morfologicheskikh tipov iz Yakutii [Gas components of inclusions in diamonds of various morphological types from Yakutia]. *Geohimija – Geochemistry*, 1991, vol. 11, pp. 1586–1595 (In Russ.)
10. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Geodinamicheskii kontrol' razmeshcheniya kimberlitovykh polei tsentral'noi i severnoi chastei Yakutskoi kimberli-tovoi provintsii (petrokhimicheskii aspekt) [Geodynamic control of the location of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakutsk kimberlite province (petrochemical aspect)]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2000, no. 3 (9), pp. 37–55 (In Russ.)
11. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Avtolitovye kimberlity kak produkt vjazkostnoj differentsiatsii kimberlitovogo raspava v diatremah [Autoliths kimberlites as a product of the viscous differentiation of kimberlite melt in diatremes]. *Petrologiya – Petrology*, 2000, vol. 8, no. 5, pp. 495–504 (In Russ.)
12. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. O soprazhzhennosti sostavov glubinykh vklucheniij v petrohimiicheskikh raznovidnostyah kimberlitov v diatremah Yakutii [On the conjugacy of the composition of deep inclusions in petrochemical varieties of kimberlites in the diatremes of Yakutia]. *Petrologiya – Petrology*, 2001, vol. 9, no. 1, pp. 1–12 (In Russ.)
13. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Zinchuk N. N. *Petrohimicheskaja faktografija kimberlitovoy provincii Vostochnoj Sibiri* [Petrochemical factographi of the kimberlite province of Eastern Siberia]. Novosibirsk: Parallel publ., 2019. 754 p. (In Russ.)
14. Gorshkov A. I., Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D., Shlykov V. G., Zhuhlistov A. P., Mohov A. V., Sivcov A. V. Novyy uporyadochennyy smeshanoslojnyj mineral lizardit-saponit iz kimberlitov Juzhnoj Afriki [New ordered mixed-layer mineral lizardite-saponite from kimberlites of South Africa]. *Doklady RAN – Reports of RAN*, 2002, vol. 382, no. 3, pp. 374–378 (In Russ.)
15. Egorov K. N., Zinchuk N. N., Mishenin S. G., Serov V. P., Sekerin A. P., Galenko V. P., Denisenko E. P., Baryshev A. S., Men'shagin Yu. V., Koshkarev D. A. Perspektivy korennoi i rossypnoi almazonosnosti Yugo-Zapadnoi chasti Sibirskoi platform [Prospects for the primary and alluvial diamond content of the South-western part of the Siberian Platform]. Sb.: *Geologicheskie aspekty mineral'no-syr'evoi bazy Aktsionernoi kompanii «ALROSA»: sovremennoe sostoyanie, perspektivy, resheniya*. Dopolnitel'nye materialy po itogam regional'noi nauchno-prakticheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy geologicheskoi otrasli AK «ALROSA» i nauchno-metodicheskoe obespechenie ikh reshenii», posvyashchennoi 35-letiyu YANIGP TsNIGRI AK «ALROSA» [Sat: Geological aspects of the mineral resource base of Joint Stock Company ALROSA: current state, prospects, solutions. Additional materials on the results of the regional scientific-practical conference "Actual problems of the geological industry of AK ALROSA and scientific and methodological support for their solutions", dedicated to the 35th anniversary of YANIGP TsNIGRI AK ALROSA.]. Mirnyi, MGT publ., 2003, pp. 50–84. (In Russ.)
16. Zinchuk N. N. Sostav i genezis glinistykh mineralov v verhnepaleozoijskikh osadochnykh tolshhah vostochnogo borta Tungusskoj sineklizy [Composition and genesis of clay minerals in the Upper Paleozoic sedimentary strata of the eastern side of the Tunguska syncline]. *Geologiya i geofizika – Geologia and Geophisika*, 1981, no. 8, pp. 22–29 (In Russ.)



17. Zinchuk N. N. Ob osnovnykh istochnikakh glinistyykh mineralov v mezozojskikh kontinental'nykh almazonosnykh otlozheniyakh Zapadnoy Yakutii [About main sources of argillaceous minerals in Mesozoic continental diamondiferous deposits of Western Yakutia]. *Geologiya i geofizika – Geology and Geophysics*, 1982, no. 8, pp. 81–90 (In Russ.)
18. Zinchuk N. N. Osobennosti sostava i raspredeleniya sljudistyykh obrazovaniy v kimberlitovykh porodakh Yakutii [Specific features of composition and distribution of micaceous formations in kimberlite rocks of Yakutia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka – News of HEI. Geology and exploration*, 1991, no. 7, pp. 58–66 (In Russ.)
19. Zinchuk N. N. Vliyaniye vtorichnykh mineralov na oblik i sostav kimberlitovykh porod [Influence of secondary minerals on appearance and composition of kimberlite rocks]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 1998, vol. 39, no. 12, pp. 1704–1715 (In Russ.)
20. Zinchuk N. N. Osobennosti mineralov sljud v kimberlitakh [Features of micaceous Formations in kimberlite]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2018, no. 2, pp. 29–39 (In Russ.)
21. Zinchuk N. N. Tipomorfnye svoystva indikatornykh mineralov kimberlitov i ih ispol'zovanie pri prognozirovaniy mestorozhdeniy almaza na Sibirskoy platforme [Tipomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in forecasting diamond deposits on the Siberian platform]. *Otechestvennaya geologiya – Otechestvennaya geologiya*, 2021, no. 2, pp. 41–56 (In Russ.)
22. Zinchuk N. N. Dokembrijskie istochniki almazov v rossypnykh fanerozoja [Precambrian sources of Diamonds in Phanerozoic placers]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 3, pp. 50–61 (In Russ.)
23. Zinchuk N. N. Geologicheskie issledovaniya pri poiskakh almaznykh mestorozhdeniy [Geological research in Prospecting for Diamond deposits]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2021, no. 4, pp. 35–52 (In Russ.)
24. Zinchuk N. N. Rol' petrologo-mineralogicheskikh i geohimicheskikh issledovaniy v otsenke potentsial'noy almazonosnosti kimberlitov [The role of petrological-mineralogical and mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond content of kimberlites]. *Otechestvennaya geologiya – Otechestvennaya geologiya*, 2022, no. 1, pp. 36–47 (In Russ.)
25. Zinchuk N.N. Kremnistyye mineraly v kimberlitakh [Siliceous Minerals in Kimberlite] *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 38–52 (In Russ.)
26. Zinchuk N. N. Osobennosti petrograficheskogo izucheniya kimberlitovykh porod [Specific features of petrographic study of kimberlite]. *Otechestvennaya geologiya – Otechestvennaya geology*, 2022, no. 4, pp. 34–49 (In Russ.)
27. Zinchuk N. N. Kory vyvetrivanija i ih rol' v formirovaniy postkimberlitovykh osadochnykh tolshh [Weathering crusts and their role in formation of post kimberlite sedimentary sequences]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2022, no. 2, pp. 100–120 (In Russ.)
28. Zinchuk N. N. O specifikakh glinistyykh mineralov v osadochnykh formacijakh [About specific character of argillaceous Minerals in sedimentary formations]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya – Proceedings of Perm State University. Series: Geology*, 2022, no. 1, pp. 10–23 (In Russ.)
29. Zinchuk N. N., Afanas'ev V. P. Geneticheskie tipy i osnovnye zakonomernosti formirovaniya almazonosnykh rossypej [Genetic types and basis patterns of diamondiferous placer formation]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka – News of HEI. Geology and Exploration*, 1998, no. 2, pp. 66–71 (In Russ.)
30. Zinchuk N.N., Barduhinov L.D. O specifikakh izucheniya almaza pri prognoznno-poiskovykh rabotakh (na primere Sibirskoy platformy) [Diamond study features in forecasting and prospecting (Siberian platform)]. *Rudy i metally – Ores and metals*. 2021, no. 3, p. 59–75 (In Russ.)
31. Zinchuk N.N., Barduhinov L.D. Almazы iz nizkoproduktivnykh kimberlitov [Diamonds from kimberlites with Half-industrial productivity]. *Rudy i metally – Ores and metals*. 2022, no. 1, p. 77–93 (In Russ.)
32. Zinchuk N.N., Barduhinov L.D. O specifikakh dokembrijskikh istochnikov almazov v rossypnykh [About specific of the Precambrian Sources of placer Diamonds]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Perm State University. Series: Geology*, 2022, vol. 21, no. 2, pp. 149–166 (In Russ.)
33. Zinchuk N. N., Barduhinov L. D. Almazы iz polupromyshlennykh kimberlitov [Diamonds from semi-industrial kimberlites]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2022, no. 2, pp. 32–45 (In Russ.)
34. Zinchuk N.N., Boris E.I. O koncentracii produktov pereotlozheniya kor vyvetrivanija v verhnepaleozojskikh osadochnykh tolshhah vostochnogo borta Tungusskoj sineklizy [Concentration of Weathering crust redeposition products in the Upper Paleozoic sedimentary strata of the eastern side of the Tunguska syncline]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 1981, no. 8, pp. 22–29 (In Russ.)
35. Zinchuk N. N., Boris E. I., Stegnickij Ju. B. Strukturno-formacionnoe i mineragenicheskoe rajonirovanie territorij razvitiya pogrebnennykh kor vyvetrivanija i produktov ih pereotlozheniya v almazonosnykh regionakh (na primere Yakutskoy kimberlitovoy provincii) [Structural-formational and mineragenetic zoning of the territory of buried crusts of weathering and products of their redeposition in diamondiferous regions (on the example of Yakutian kimberlite province)]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 1998, vol. 39, no. 7, pp. 950–964 (In Russ.)
36. Zinchuk N. N., Zinchuk M. N., Kotelnikov D. D., Shlykov V. G., Zhuhlistov A. P. Strukturno-kristallohimicheskie preobrazovaniya sloistyykh mineralov na raznykh stadiyakh gipergennogo izmeneniya kimberlitov [Structural and crystal-chemical transformations of layered minerals at different stages of hypergenic kimberlite changes]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka – Izvestiya Vissh. Ucheb. Zaved. Geologiya and razvedka*, 2002, no. 1, pp. 47–60 (In Russ.)
37. Zinchuk N. N., Zuev V. M., Koptil' V. I., Chjornyj S. D. Strategiya vedeniya i rezul'taty almazoposkovykh rabot [Diamond management strategy and results]. *Gornyy vestnik – Gorny vestnik*, 1997, no. 3, pp. 53–57 (In Russ.)
38. Zinchuk N. N., Kotelnikov D.D., Gorshkov A. I. Identifikatsiya i genezis lizardit-saponitovogo smeshanosloinogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoi iz trubok Yuzhnoy Afriki [Identification and genesis of lizardite-saponite mixed-layer formation in kimberlites of one of the pipes of South Africa]. *Litologiya i poleznye iskopaemye – Lithology and Minerals*, 2003, no. 1, pp. 87–96 (In Russ.)
39. Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D., Sokolov V.N. Izmenenie mineral'nogo sostava i strukturnykh osobennostey kimberlitov Yakutii v processe vyvetrivanija [Changes in the mineral composition and structural features of kimberlites of Yakutia during weathering]. *Geologiya i geofizika – Geologiya and geophysics*, 1982, no. 2, pp. 42–53 (In Russ.)
40. Zinchuk N. N., Mel'nik Yu. M., Serenko V. P. Apokimberlitovyye porody [Apokimberlite rocks]. *Geologiya i geofizika – Geology and geophysics*, 1987, no. 10, pp. 66–72 (In Russ.)

41. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Barduhinov L. D., Lipashova A. N. Almazny ukugutskoj svity rossypi Njurbinskaja, Nakynskoe kimberlitovoe pole Sibirskoj platformy [Diamonds from the ukugut suite of the Nyurbinskaya placer Nakyn kimberlite field Siberian platform]. *Rudy i metally – Ores and Metals*, 2020, no. 2, pp. 69–77 (In Russ.)
42. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Barduhinov L. D., Lipashova A. N. Tipomorfnye svojstva almazov djajtjarskoj tolshhi rossypi Njurbinskaja [Tipomorphic properties of Diamonds from the Dyakhtar strata of the Byurbinskaya placer]. *Vestnik Permskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Perm State University. Series: Geology*, 2020, no. 3, pp. 45–54 (In Russ.)
43. Kedrova T. V., Bogush I. N., Zinchuk N. N., Barduhinov L. D., Lipashova A. N., Afanas'ev V. P. Rossypi almazov Nakynskogo polja [Diamond placers of the Nakin kimberlite]. *Geologija i geofizika – Geology and Geophysics*, 2022, vol. 63, no. 3, pp. 291–302 (In Russ.)
44. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Tipomorfnye oso-bennosti i paleogeograficheskoe znachenie slyudistyx mineralov [Typomorphic features and paleogeographic significance of micaceous minerals]. *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka – Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 1996, no. 1, pp. 53–61 (In Russ.)
45. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Osobennosti glinistyx mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsii [Features of clay minerals in deposits of various sedimentary formations]. *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka – Proceedings of higher educational establishments. Geology and Exploration*, 1997, no. 2, pp. 53–63 (In Russ.)
46. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Usloviya nakopleniya i post-sedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistyx mineralov votlozheniyakh terrigennoi formatsii [Conditions of accumulation and postsedimentary transformation of clay minerals in the sediments of the terrigenous formation]. *Byulleten' Moskovskogo obshchestva ispytatelei prirody. Otdel geologichesk – Bulletin of the Moscow Society of Naturalists. Geological department*, 2001, vol. 76, no. 1, pp. 45–53 (In Russ.)
47. Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N. Ob anomalii obshhej shemy preobrazovaniya razbuhajushhih glinistyx mineralov pri pogruzhении soderzhashhih ih otlozhenij v stratisferu [On the anomaly of the general scheme of transformation of swelling clay minerals when the sediments containing them are immersed in the stratosphere]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2003, no. 2, pp. 57–68 (In Russ.)
48. Rotman A. Ja., Zinchuk N. N., Ashhepkov I. V., Egorov K. N. Kimberlity i perspektivy ih issledovanij [Kimberlites and perspectives of their investigations]. *Geologija almazov – nastojashhee i budushhee (geologi 50-letnemu Jubileju g. Mirnogo i almazodobyvashhej promyshlennosti Rossii) – Geology of diamonds – present and future (geologists to the 50<sup>th</sup> anniversary of Mirny and diamond-mining industry of Russia)*, 2005, pp. 856–892 (In Russ.)
49. Savko A. D., Zinchuk N. N., Shevyrvov L. T., Il'jash V. V., Afanas'ev N. S. Almazonosnost' Voronezhskoj anteklizy [Diamond bearing of the Voronezh antecline]. *Trudy nauchno-issledovatel'skogo instituta Geologii* [The work of the Research Institute of Geology], Voronezh, VSU publ., vol. 17, 2003, 121 p. (In Russ.)
50. Tolstov A. V., Zinchuk N. N. Vklad Almaznoj laboratoriju CNIGRI v nauchnuju kladovuju Jakutii [The Contribution of the TSNIGRI Diamond to the scientific treasury of Yakutiya]. *Rudy i metally – Ores and metals*, 2022, no. 2, pp. 25–35 (In Russ.)
51. Khar'kiv A. D., Zuenko V. V., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I., Ukhanov A. V., Bogatykh M. M. *Petrokhimiya kimberlitov* [Petrochemistry of kimberlites]. Moscow, Nedra publ., 1991, 304 p. (In Russ.)
52. Khitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D. Primenenie klaster-analiza dlya vyasneniya zakonornosti vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster analysis to clarify the weathering patterns of rocks of different composition]. *Reports of the Academy of Sciences of the USSR – Doklady AN SSSR*, 1987, vol. 296, no. 5, pp. 1228–1233 (In Russ.)
53. Zinchuk N. N. O geohimicheskikh osobennostjah raznovozrastnykh obrazovanij almazoperspektivnykh territorij [About geochemical features of formations of different ages of diamond-prospective territories]. *Otechestvennaja geologija – Otechestvennaja geology*, 2023, no. 1, pp. 42–55 (In Russ.)
54. Zinchuk N. N. Litologo-stratigraficheskie issledovaniya pri almazopiskovykh rabotah [About Lithologic and Stratigraphic features of ancient Diamondiferous thicknesses]. *Vestnik SVFU. Nauki o Zemle – Vestnik SVFU. Nauki o Zemle*, 2023, no. 1(29), pp. 5–28 (In Russ.)
55. Zinchuk N. N. Osobennosti gidrotermalnogo i gipergennogo izmeneniya sljudistyx kimberlitov [Specific features of Hydrothermal and Hypergene Alterations of Micaceous Kimberlites]. *Vestnik Permskogo universiteta. Geologija – Vestnik Permskogo universiteta. Geology*, 2023, vol. 22, no. 1, pp. 32–50 (In Russ.)
56. Zinchuk N. N. Sul'faty v kimberlitovykh porodah [Sulfates from kimberlite rocks]. *Otechestvennaja geologija – Otechestvennaja geology*, 2023, no. 2, pp. 56–72 (In Russ.)
57. Zinchuk N. N. Osobennosti kal'cita iz kimberlitovykh porod [Features of calcite from kimberlite rocks]. *Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya: Geologiya – Proceedings of Voronezh State University. Series: Geology*, 2023, no. 2, pp. 28–43 (In Russ.)
58. Grachanov S. A., Zinchuk N. N., Sobolev N. V. The age of Predictable primary diamond sources in the Northeastern Siberian platform. *Doklady Earth Sciences*, 2015, vol. 465, no. 2, pp. 1297–1301.
59. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform. *Petrology*, 2001, vol. 9, no. 6, pp. 576–588.
60. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I., Zinchuk N. N., Krasavchikov V. O. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry. *Jurnal of Geochemical Exploration*, 2002, vol. 76, no. 2, pp. 93–112.

Зинчук Николай Николаевич, д.г.-м.н., профессор, академик Академии наук РС (Якутия), председатель ЗЯНЦ АН РС (Якутия), Мирный, Республика Саха (Якутия), Российская Федерация; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru; ORCID 0000-0002-9682-3022

Автор прочитал и одобрил окончательный вариант рукописи.

Nikolay N. Zinchuk, PhD, Dr. habil. In Geol.-Min., professor, academician of the Academy of Sciences of the RS (Yakutia), chairman of West-Yakutian Scientific Centre of the SR (Yakutia) Academy of Sciences, Mirny, Republic of Sakha (Yakutia), Russian Federation; e-mail: nnzinchuk@rambler.ru; ORCID 0000-0002-9682-3022

Author have read and approved the final manuscript.