

Особенности состава основной массы кимберлитов

Аннотация. Проведённые исследования показали, что для кимберлитовых диатрем характерны индивидуальные особенности состава основной массы слагающих их пород. Иногда эти особенности свойственны не только конкретным трубкам, но и отдельным телам и блокам. Процессы серпентинизации, карбонатизации, хлоритизации и бруситизации также имеют свои специфические особенности в каждой диатреме. Индивидуальные свойства носят и характерные для основной массы кимберлитов ассоциации вторичных образований, состоящие из двух и более минералов. Облик кимберлитовых пород в диатремах в значительной мере определяется развитием комплекса вторичных минералов, возникших после консолидации пород в результате их эндо- и экзогенных преобразований. Анализ распределения в кимберлитах Сибирской платформы серпентина, флогопита, хлорита, талька, кальцита, доломита, пироаурита, брусита и их ассоциаций, позволили рассмотреть условия формирования отдельных новообразований и оценить их роль в образовании индивидуального облика этих алмазосодержащих пород. Отличия последних обусловлены интенсивностью развития и неравномерностью распределения основных вторичных минералов и их разновидностей: кальцита, доломита, пироаурита, флогопита, хлорита, лизардита, хризотила и Al-серпентина с различной степенью развития дефектов структуры. Установлено, что кимберлиты в процессе становления претерпели неоднократные изменения, интенсивность которых на разных стадиях формирования диатрем имеет индивидуальный характер и зависит от конкретных условий минералообразования. Предложены различные варианты использования вторичных минералов кимберлитов для решения научных и прикладных задач.

Ключевые слова: кимберлиты, трубки, вторичные минералы, серпентинизация, карбонатизация, хлоритизация, бруситизация, постмагматические и гипергенные изменения.

ЗИНЧУК НИКОЛАЙ НИКОЛАЕВИЧ, доктор геолого-минералогических наук, nnzinchuk@rambler.ru

Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) Академии наук Республики Саха (Якутия), г. Мирный

Specific features of basic kimberlite mass composition

N. N. ZINCHUK

West-Yakutian Scientific Centre of the RAS (Y) AS, Mirny

Annotation. The conducted studies have shown that kimberlite diatremes are characterized by individual mineral features of the rocks that compose them. Sometimes these differences are inherent not only to specific pipes, but also to individual bodies and blocks. The processes of serpentinization, carbonatization, chloritization and brucitization also have their own specific features in each diatreme. Individual properties are also characteristic of the main mass of kimberlites of secondary formations, consisting of two or more minerals. The appearance of kimberlite rocks in diatremes is largely determined by the development of a complex of secondary minerals that arose after the consolidation of rocks as a result of their endo- and exogenous transformations. Analysis of the distribution of serpentine, phlogopite, chlorite, talc, calcite, dolomite, pyroaurite, brucite and their associations in kimberlites of the Siberian platform made it possible to consider the conditions of formation of individual new mineral associations and to assess their role in the formation of the individual appearance of these diamond-bearing rocks. The differences of the latter are due to the intensity of development and uneven distribution of the main secondary minerals and their varieties: calcite, dolomite, pyroaurite, phlogopite, chlorite, lizardite, chrysotile and Al-serpentine with varying degrees of development of structural defects. It has been established that kimberlites have undergone repeated changes during their formation, the intensity of which at different stages of diatreme formation has an individual character and depends on the specific conditions of minerogenesis. Various options for using secondary minerals of kimberlites to solve scientific and applied problems are proposed.

Key words: kimberlites, pipes, secondary minerals, serpentinization, carbonatization, chloritization, brucitization, postmagmatic and hypergene changes.

Кимберлитовые диатремы очень разнообразны по геологическому строению (составу вмещающих и перекрывающих пород, размеру и морфологии тел, количеству фаз внедрения кимберлитов) и вещественному составу заполняющих пород (текстурно-структурным особенностям, содержанию и составу глубинных минералов и основной массы кимберлитов, степени и характеру переработки пород постмагматическими растворами, содержанию, морфологии и физическим свойствам алмазов и другим признакам). Каждая из диатрем представляет собой индивидуальный объект, практически не повторяющийся в природе, и распределения разновидностей пород также существенно различаются (рис. 1). Такие особенности распределения различных разновидностей кимберлитов отмечались нами при изучении крупных многофазных диатрем на Сибирской (СП), Восточно-Европейской (ВЕП) и Африканской (АП) платформах мира (Удачная, Юбилейная, Айхал, Сытыканская, Зарница, Краснопресненская, Премьер, Катока, Орапа, Финш, Кимберли, Мвадуи, Камафука-Камазамбо, Ломоносовская, Поморская, Карпинская-1, Карпинская-2, Архангельская и др.). Кимберлитовые трубки, дайки, жилы и силлы в большинстве случаев сложены [1–4, 14, 16, 23] породами, в различной степени изменёнными постмагматическими и гипергенными (верхние части) процессами. Образовавшиеся при этом новообразования относятся к вторичным минералам, которые являются главными породообразующими компонентами, слагающими основную массу пород. Реальный облик кимберлитов в диатремах в значительной мере определяется развитием комплекса вторичных минералов, возникших после консолидации породы в результате эндо- и экзогенных преобразований [7, 20, 27, 28, 30]. Несмотря на разрозненный характер предшествующих исследований, обнаружено многообразие процессов вторичной минерализации и возникающих при этом новообразований. К основным результатам этих исследований следует отнести определение: а) диагностических признаков всех диагностируемых минералов-новообразований; б) наиболее распространённых их ассоциаций; в) факторов, влияющих на постмагматические преобразования кимберлитов; г) роли вторичных минералов в решении прикладных задач (совершенствования прогнозно-поисковых критериев при поисках алмазов и влияние их на технологические процессы переработки пород).

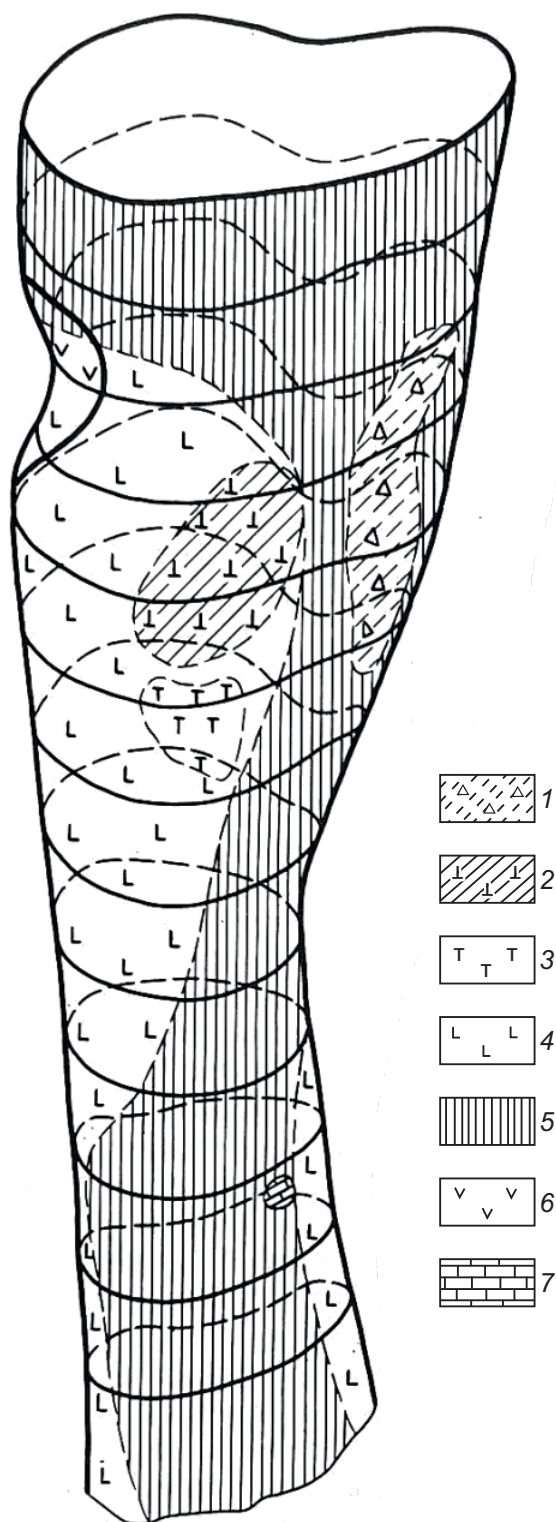


Рис. 1. Схема распределения разновидностей кимберлитов на глубоких горизонтах трубки Мир:

кимберлитовые брекчии: 1 – порфировая, 2 – крупнопорфировая, 3 – атакситовая, 4 – с массивной текстурой цемента, 5 – автолитовая; другие породы – 6 – траппы, 7 – ксенолиты осадочных пород нижнего палеозоя

Новые сведения о процессах вторичного минералообразования получены нами в результате изучения разрабатываемых коренных месторождений алмазов: трубки Мир, Интернациональная, Дачная, имени XXIII съезда КПСС – в Малоботубинском (МБАР); Удачная, Айхал, Сытыканская, Юбилейная – в Далдыно-Алакитском (ДААР); Нюрбинская и Ботубинская – в Средне-Мархинском (СМАР) алмазоносных районах. По отдельным опорным горизонтам основных диатрем этих алмазоносных районов проведено минералогическое картирование с использованием керн эксплорационных скважин, пройденных по сетке 40×40 м. Особенности распределения этих же новообразований на разведанную глубину месторождений изучались по керновому материалу из колонковых скважин, вскрывших нижние горизонты диатрем. Для сравнения изучались также кимберлитовые породы из других (в том числе и неалмазоносных) трубок СП, ВЕП и Южно-Африканской (ЮАП) платформ [19, 29, 31]. В результате были получены сведения о том, что исследованные кимберлиты претерпели в процессе становления диатрем неоднократные изменения. Их интенсивность на разных стадиях формирования трубок носит индивидуальный характер и зависит от конкретных условий минералообразования. К настоящему времени в кимберлитовых породах древних платформ Мира идентифицированы и комплексно изучены с помощью современных методов исследований более шестидесяти минералов-новообразований, входящих в классы оксидов и гидроксидов, сульфидов, силикатов и алюмосиликатов, боратов, фосфатов, карбонатов и хлоридов [32, 33, 35].

Недостаточно изученным направлением в познании закономерностей преобразования кимберлитовых пород оставалось установление роли конкретных вторичных минералов, реконструкции последовательности их образования и устойчивости в различных условиях. В целях решения этих вопросов были выполнены детальные комплексные исследования вещественного состава и процессов вторичного минералообразования на каменном материале из кимберлитовых диатрем Мирнинского (МКП), Далдынского (ДКП), Алакит-Мархинского (АМКП), Верхнемунского (ВМКП) и Накынского (НКП) кимберлитовых полей СП. Это позволило получить новые данные о типоморфных особенностях всех идентифицированных вторичных минералов кимберлитов и, в пер-

вую очередь, входящих в основную массу этих образований. Важной при этом была задача разработки и адаптации рационального комплекса методов и приёмов изучения вещественного состава кимберлитов, позволяющая получить количественную характеристику по содержанию вторичных минералов в основной массе пород. Выполненные исследования позволили в определённой степени восполнить недостаточность сведений по изучению кимберлитовых пород в целом, так как практически все минералогическо-петрографические построения обычно проводятся для первичных минералов и магматических образований, не затронутых (или слабозатронутых) процессами вторичного преобразования. При этом следует отметить, что нашими исследованиями показана значительная степень постмагматического и гипергенного преобразования кимберлитовых пород, которые из-за обилия вторичных минералов (до 95 %) по сути, являются апокимберлитами [34, 36, 37]. Наибольшим изменениям в последних подвержена основная масса пород, в которой доминируют серпентин, кальцит и слюдистые образования. Геолого-минералогическое значение таких исследований обусловлено особенностями слоистой структуры, которая отражает физико-химические условия их образования. Эти минералы являются главными компонентами серпентинизации, хлоритизации и карбонатизации – основных процессов постмагматических преобразований кимберлитовых пород, которые развиваются в каждой диатреме индивидуально, что вызвано различиями процессов привноса-выноса основных породообразующих оксидов [38–40]. Отмеченная неравномерность распределения вторичных минералов в диатремах объясняется спецификой псевдоморфного замещения минералов. Закономерные изменения обычно связаны с выветриванием или влиянием на состав кимберлитов вмещающих диатрему пород. При *серпентинизации* кимберлитов наблюдается псевдоморфное и непсевдоморфное замещение слагающих их минералов [4, 8, 13, 18, 26]. В связи с малыми размерами большинства индивидов минералов группы серпентинов для массовых определений последних в смесях наиболее эффективным и производительным является рентген-дифрактометрический анализ, которым мы пользовались для диагностических целей. На дифрактограммах воздушно-сухих образцов новообразований, содержащих серпентин, диагностическими являются

рефлексы с межплоскостными расстояниями 0,730–0,731 и 0,365–0,366 нм (рис. 2). Эти диагностические рефлексы на дифрактограммах серпентина из прожилковых мономинеральных выделений узкие и симметричные, что указывает на лучшую окристаллизованность минерала. Положение отмеченных диагностических рефлексов серпентина при насыщении образцов глицерином (см. рис. 2, обр. Iв и Iв) практически не меняется. После двухчасового прокаливания препаратов при 600 °С (см. рис. 2, обр. Iг и IIг) интенсивность этих отражений существенно ослабевает с одновременным уменьшением значений их межплоскостных расстояний. Серпентин обычно ассоциирует с кальцитом, реже с оливином, моноклинными пироксенами и другими минералами. ИК-спектры новообразований, обогащённых серпентином (рис. 3, А–И), характеризуются основной интенсивной полосой поглощения с частотой около 990 и 980 см⁻¹ с двумя полосами с частотами 615–570 и 450 см⁻¹ соответственно в области валентных и деформационных колебаний Si–O-связи. Валентные колебания ОН-группы проявляются в виде узкой интенсивной полосы с максимумом 3700 см⁻¹, что обычно свойственно антигориту, но отмечается и у лизардита, то есть в целом характерно для пластинчатых разновидностей серпентина. Иногда последняя полоса осложняется слабой ступенькой в области частоты 3670 см⁻¹, что отражает примесь волокнистой разновидности серпентина – хризотила. Отдельные полосы поглощения в области 500 см⁻¹ с двумя ступенями (с частотами 550 и 485 см⁻¹), а также при 615 см⁻¹ подчёркивают присутствие в образце примеси оливина. Рентгенодифрактометрические и ИК-спектроскопические исследования являются наиболее надёжными методами изучения минералов серпентиновой группы, особенно в случае их нахождения в ассоциации с другими новообразованиями.

Минералы группы серпентина образуются: а) по основной массе пород; б) в результате метасоматических преобразований оливина I и II генераций, пироксенов и ксенолитов терригенно-карбонатных пород; в) за счёт гидротермально-метасоматических процессов. В отличие от этого, серпентин основной массы кимберлитов отмечается в двух модификациях: интерсертальной (заполняющей промежутки между зёрнами кальцита и других минералов) и псевдоморфной (замещающей карбонаты и другие минералы основной

массы). Наблюдаемые карбонат-серпентиновые псевдоморфозы по оливину формируются при замещении сначала серпентином, по которому затем развивается карбонат. Непсевдоморфный серпентин может возникать при повторной переработке кимберлитовых пород. В результате неоднократно проявляющихся процессов преобразования кимберлитов (на что указывают, например, многочисленные морфологические типы скаленоэдров кальцита) происходит полная смена

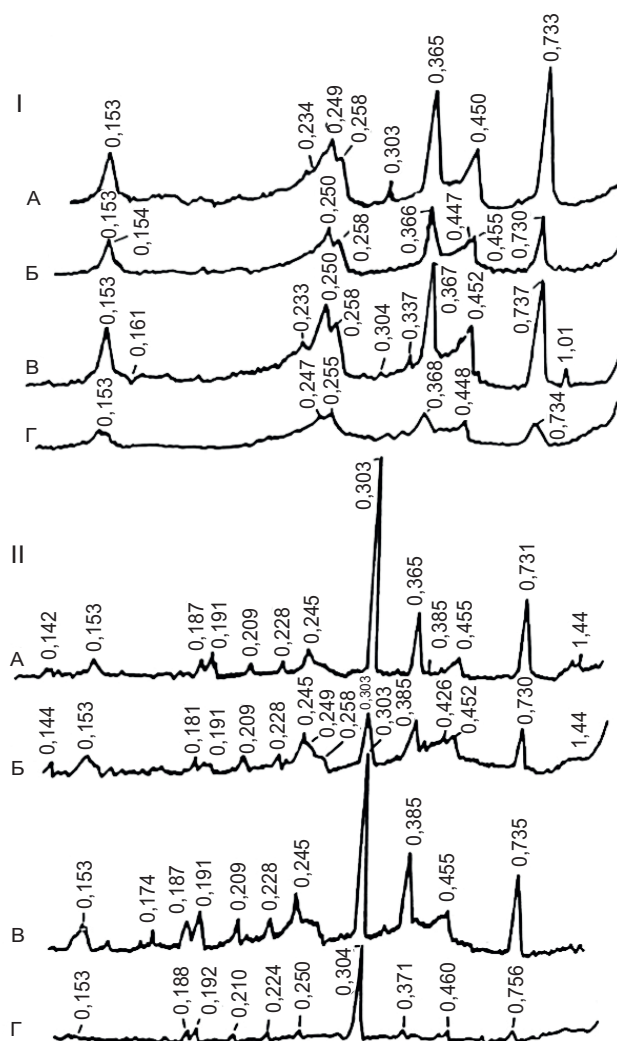


Рис. 2. Дифрактограммы фракции мельче 0,001 мм из линзовидных участков серпентина в кимберлитах трубки Удачная (I) и Мир (II):

препарат: А – исходный, частично ориентированный, Б – исходный неориентированный, В – образец, насыщенный глицерином, Г – образец, прокалённый в течение двух часов при 600 °С

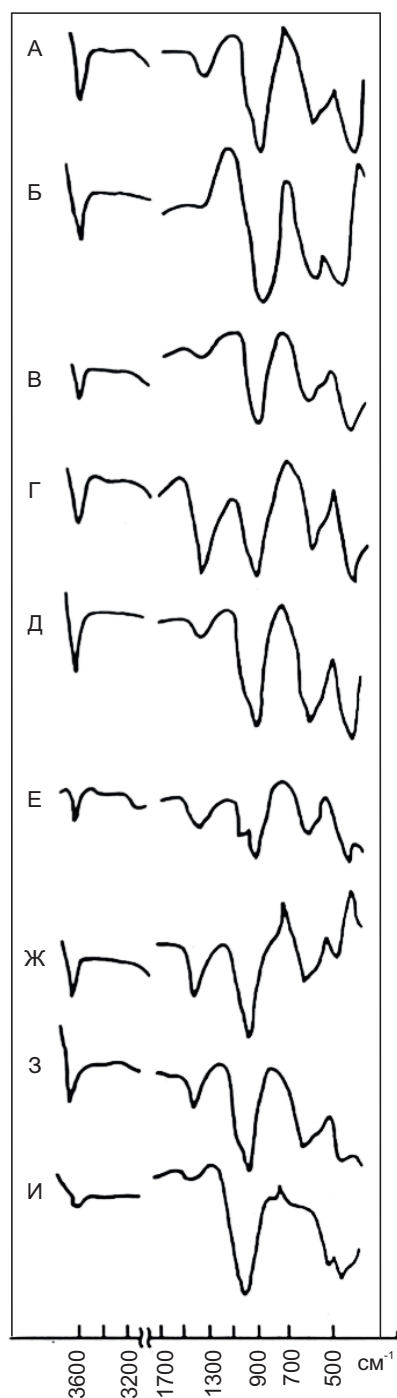


Рис. 3. ИК-спектры поглощения серпентинов из кимберлитов и ассоциирующих с ними пород:

А–Г – серпентинизированные включения ультраосновных пород из кимберлитов трубок Мир (А–В) и Интернациональная (Г); желтовато-серый (Д) и тёмно-серый (Е) серпентин в ксенолите известняка трубки Сытыканская; Ж – желвак серпентина из кимберлитовой трубки Айхал; З – линзовидный участок серпентина в кимберлите трубки Мир; И – глинистая фракция, обогащённая серпентином (алмазоносная россыпь Водораздельные галечники)

первичных ассоциаций вторичными с образованием нового комплекса минералов. В кимберлитах установлены такие разновидности серпентина, как лизардит и хризотил, кристаллизующиеся в разных физико-химических условиях. Некоторые разновидности относятся к шестислойному унститу [5, 8, 26, 27]. В кимберлитах зафиксирована также такая разновидность серпентиновых минералов, как Al-серпентин (септохлорит), характер распределения которого требует дополнительных комплексных структурных исследований. Неравномерность распределения серпентинов связана со многими факторами (см. рисунки 2 и 3): неоднородностью псевдоморфных замещений серпентина и состава кимберлитовых тел; трещиноватостью пород; характером вторичных процессов; количеством ксенолитов мантийных ультраосновных образований, которые одинаково серпентинизируются вместе с кимберлитами. Серпентинизация зёрен и кристаллов оливина (там, где реликты последнего сохранились) свидетельствует о том, что она происходила с краёв зерна или по трещинам с возникновением агрегатов из чешуй лизардита. Главными условиями подобного роста должны быть появление огромного количества зародышей и одностороннее питание растущих кристаллических фаз. Возникновение субизотропных агрегатов на заключительной стадии серпентинизации этого минерала маловероятно, поскольку подобные явления не наблюдаются при изучении зёрен, где реликты оливина сохранились. Наименьшей степенью встречаемости серпентина характеризуются диатремы НКП (Ботубинская и Нюрбинская). Трубки ВМКП отличаются равномерным распределением серпентина и высокими (30–57 %) средними его концентрациями. Одновременность статистических характеристик серпентина в трубках ДКП несколько нарушается в породах трубок Удачная и Зарница, в которых развитие минералов этой группы выражено менее интенсивно по сравнению с другими диатремами этой территории. Это позволяет утверждать, что в целом процессы серпентинизации основной массы кимберлитов СП, ВЕП, ЮАП имеют схожий характер, за редким исключением (трубки Зарница, Удачная, Айхал и др.), когда встречаются блоки слабоизменённых пород.

В результате *карбонатизации* кимберлитов возникают такие распространённые минералы, как кальцит, доломит, арагонит и пироаурит.

Кристаллизация широко распространённого в кимберлитах *кальцита* связана с различными этапами формирования диатрем [26–28]. По способу образования минерал разделяется на: а) кальцит, слагающий вместе с серпентином и другими новообразованиями, основную массу пород; б) метасоматический кальцит как продукт карбонатизации некоторых минералов кимберлитов; в) поздний гидротермальный кальцит, выполняющий пустотно-трещинные образования. Процессы развития кальцита в основной массе кимберлитов СП по распространённости и интенсивности сопоставимы с серпентинизацией, но отличаются большими вариациями их средних содержаний [5, 8]. На распределение и интенсивность развития кальцита существенно влияет количество ксенолитов в кимберлитах, влияние вмещающих пород и интенсивность поступления в диатремы глубинных растворов, обогащённых Са и CO_2 . Наиболее интенсивно и стабильно развитие кальцита отмечено в основной массе кимберлитов ДКП, где минерал идентифицирован в 95 % изученных проб, достигая в отдельных образцах до 90 %. В основной массе кимберлитов АМКП кальцит распределён также равномерно, но при значительно меньших концентрациях. Наименьшее количество минерала зафиксировано в кимберлитах трубки Интернациональная (в среднем до 8 %) и встречен он в 55 % изученных проб. В находящихся в этом же МБАР кимберлитах трубки Мир, где встречаемость минерала составляет 95 % проб, среднее содержание его не превышает 35 %. Однородная картина развития кальцита, не имеющая резких отличительных свойств по отношению к большинству коренных месторождений алмазов СП, отмечена в кимберлитовых породах ВМКП. В целом кальцит относится к полигенным минералам кимберлитов, всестороннее исследование которых на разных этапах становления породы позволяет получить сведения о генезисе этих пород. В числе открытых или дискуссионных остаются вопросы об устойчивости и равновесности минерального состава ассоциаций, содержащих кальцит (рис. 4). Особый интерес представляют кальцитсодержащие ассоциации из «плавающих рифов» – крупных метаксенолитов вмещающих карбонатных пород в кимберлитах. Степень перекристаллизации разных их блоков и участков была различной, поэтому такого рода метаксенолиты благодаря своему объёму как бы «растянули» во времени и «со-

хранили в памяти» все особенности процесса взаимодействия «кимберлитовых» расплавов с вмещающими породами. Один из таких мегаксенолитов, являющийся уникальным модельным объектом для всестороннего изучения этого процесса, известен у контакта западного тела трубки Удачная и позволяет построить обобщённую схему последовательности кристаллизации минералов кальцитсодержащих ассоциаций в пустотно-трещиноватых образованиях в кимберлитовых породах (см. рис. 4). По минеральному составу (так же как и по форме выделений) приведённые на схеме ассоциации существенно отличаются от таковых в кимберлитах. Встречаются ассоциации, в объёме которых преобладает кальцит, но чаще всего минералы группы кварца, нарастающие на «ониксоподобные» сферы коричневого кальцита ранней генерации.

Люминесценция большинства генетических разновидностей кальцита связана обычно с двумя следующими регулярными центрами: Mn^{2+} (полоса излучения с $\lambda_m = 630 \text{ нм}$), имеющими примесной

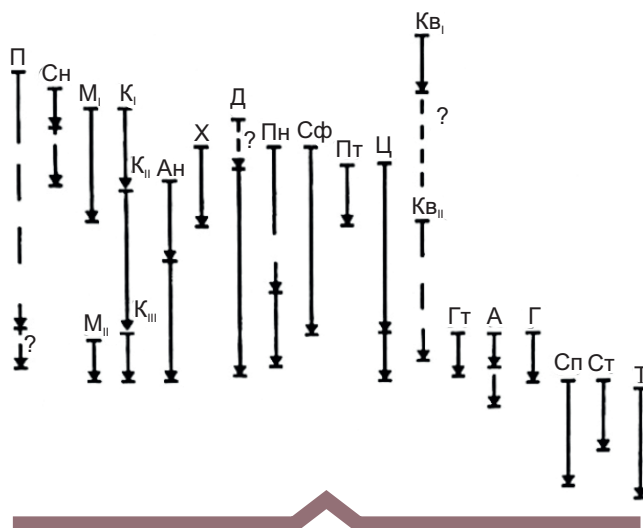


Рис. 4. Обобщённая схема последовательности кристаллизации минералов кальцитсодержащих ассоциаций в пустотно-трещинных образованиях из кимберлитов Якутии [7]:

П – пирит, Сн – серпентин, M_I и M_{II} – ранний и поздний магнетит соответственно, Ан – ангидрит, X – халькопирит, Д – доломит, Пн – пирротин, Сф – сфалерит, Пт – пирроаурит, Ц – целестин, K_V, K_{VI} – ранний и поздний кварц соответственно, Гт – гётит, А – арагонит, Г – гётит, Сп – сепиолит, Ст – сидерит, Т – талк

характер ($Mn^{2+} \leftrightarrow Ca$), и решёточными O^{\times} ($\lambda = 430$ нм), обусловленными дефектами заряда на кислороде анионного комплекса CO_3^{2-} [12, 21]. Полоса излучения центров O^{\times} выражена обычно на два-три порядка слабее, чем таковая центров Mn^{2+} . Помимо кальцитов с отмеченными центрами излучения среди природных кальцитсодержащих парагенезисов установлены разновидности этого минерала, содержащие незначительные количества и «редкоземельных» центров излучения: Ce^{3+} , Sm^{3+} , Dy^{3+} , Tb^{3+} . Большим разнообразием люминесцентных свойств характеризуются изученные кальциты из пустотно-жильных образований в кимберлитах СП (рис. 5). Требуется дополнительных исследований и уточнений вопрос о том, являются ли они закономерным продуктом кристаллизации той или иной стадии кимберлитобразования или представляют собой случайные неравновесные ассоциации нескольких постмагматических стадий этого процесса. *Доломит* в кимберлитовых породах СП образует мелкозернистые агрегаты и ассоциирует с кальцитом и серпентином. Катализатором генезиса минерала в кимберлитах является присутствие различных солей и сульфатов. Образование доломита связывают с избытком магния, не израсходованного при образовании серпентина и других магниезальных минералов. Повышенные концентрации минерала обычно наблюдаются в приконтактных с вмещающими породами участках (рис. 6). Встречаемость минерала в основной массе кимберлитов и средние содержания в кимберлитовых породах СП, ВЕП и ЮАП отличаются более значительными колебаниями по сравнению с кальцитом. Наиболее интенсивно доломит развит в основной массе кимберлитов трубок Ботубинская и Нюрбинская (НКП), а также Айхал (АМКП). В диатремах ВМКП доломит развит слабее по сравнению с остальными кимберлитовыми полями СП. Пока не встречены кимберлитовые трубки, не содержащие доломит, хотя во многих случаях он зафиксирован в виде переменной примеси. Анализ взаимоотношений распространения доломита и серпентина в основной массе кимберлитов показал наличие между ними обратной связи, что объясняется различным влиянием на состав пород материала вмещающих диатремы терригенно-карбонатных образований [9, 28]. *Арагонит* встречается в виде различных выделений в жилах и прожилках, почковидных агрегатов радиально-лучистого и сноповидного

строения, друз игольчатых кристаллов; в основной массе он отмечен в качестве незначительной примеси. В отдельных случаях (трубки Юбилейная, Мир, Заполярная, Поисковая, Новинка и др.) мелкие прожилки в основной массе сложены

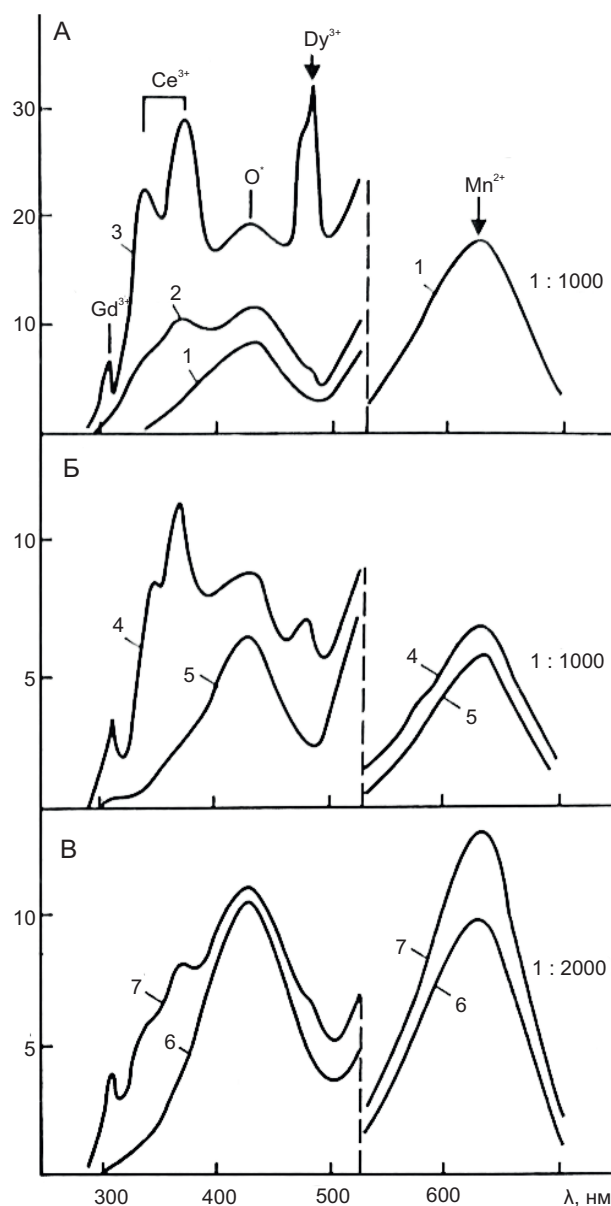


Рис. 5. Спектры рентгенолюминесценции кальцита из кимберлитов:

А – основные типы спектров (1 – «нормальный», 2 – «цериевый», 3 – «диспрозиевый»); Б – спектры внутренней (4) и внешней (5) зон кристалла; В – спектры кальцита ранней (6) и поздней (7) генераций из «рифа» трубки Удачная

агрегатами арагонита, близкими к сферическим. Бугорчатая поверхность таких микропрожилков напоминает натёчные агрегаты. Минерал обычно бесцветный, а в агрегатах белый с шелковистым блеском. Между отдельными сферами установлены агрегаты серпентина, кальцита и других новообразований. *Пироаурит* развивается в основной массе кимберлитов, в псевдоморфозах по оли-

вину, в ксенолитах различных пород, а также в прожилковых выделениях [21, 28]. Нередко (особенно в диатремах МБАР и ДААР) пироаурит является характерным минералом основной массы кимберлитовых пород, образуя с другими породообразующими компонентами (серпентином, кальцитом и др.) отдельные блоки голубоватой окраски. Пироаурит хотя и является характерным минералом основной массы кимберлитов, но отмечено неравномерное его развитие в диатремах с интенсивным распространением в отдельных участках (см. рис. 6). Наибольшее его распространение и относительно высокие концентрации отмечены в основной массе кимберлитов ВМКП и ДААР, в отличие от МКП и НКП, для которых он менее характерен. На глубоких горизонтах месторождений, в зонах влияния высокоминерализованных растворов (трубки Мир, Интернациональная, Юбилейная и др.), пироаурит довольно характерный минерал, отмеченный в виде тонких волосовидных прожилков, а также агрегатов различной формы и размеров. Нередко он вместе с серпентином слагает крупные (до 6 см) зеленовато-серые жеоды. Иногда отмечается зональное строение таких псевдоморфоз серпентина. Обычно центральная часть таких выделений имеет тёмно-зелёную густую окраску, а периферическая – более светлую или серовато-зелёную. Часто минерал отмечается в парагенетической ассоциации с кальцитом и серпентином, встречаясь в виде отдельных голубовато-зелёных ромбических кристаллов, а также сферических и волокнистых агрегатов. На дифрактограммах новообразований, содержащих пироаурит (рис. 7), минерал идентифицируется по серии отражений, равных 0,776–0,783, 0,386–0,391, 0,262–0,263, 0,2332–0,2334 и 0,1979–0,1984 нм. Параметры элементарной ячейки таких пироауритов: $a_0 = 0,3103$ нм, $c_0 = 2,3400$ нм. *Стронцианит* встречается в кимберлитовых породах многих диатрем СП, ВЕП и ЮАП. Наиболее часто минерал образует веерообразные друзы или сплошные скопления игольчатых кристаллов, часто ассоциируя с целестином, обычно нарастая на поверхности первого. По рентгенодифрактометрическим данным (серия рефлексов с межплоскостными расстояниями, равными 0,427, 0,413, 0,349, 0,340, 0,3078, 0,2978, 0,2563, 0,2528, 0,2448, 0,2429, 0,2238, 0,2160, 0,2066, 0,2027, 0,1960, 0,1888, 0,1807, 0,1615, 0,1597 и 0,1548 нм), минерал относится к кальциостронцианиту. *Магнетит* установлен в верхних

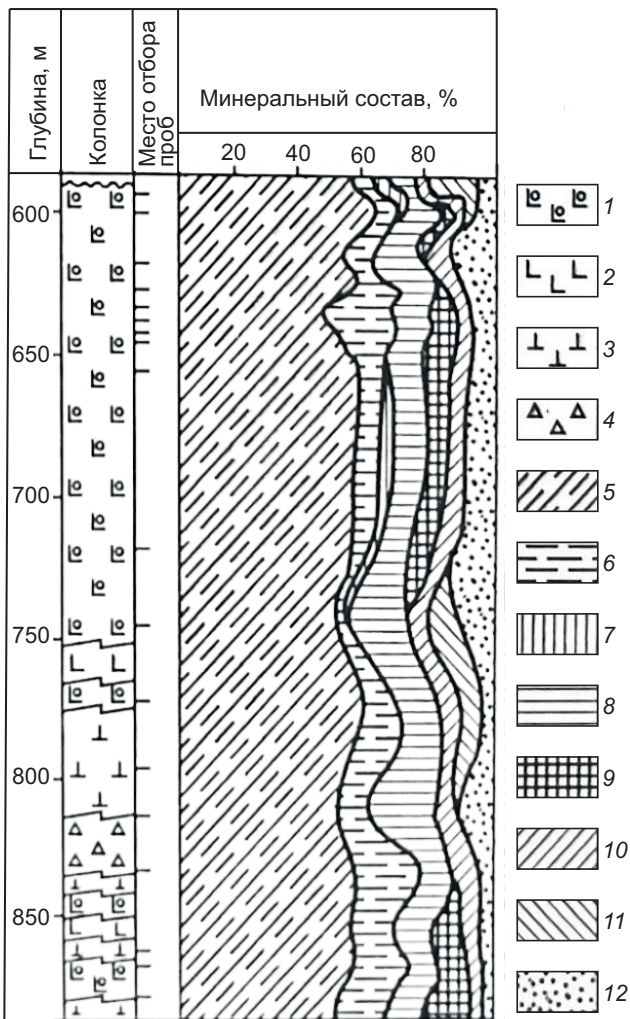


Рис. 6. Схема распределения преобладающих минералов в основной массе кимберлитов глубоких горизонтов трубки Мир (по разрезу скв. 55):

1–4 – кимберлитовые брекчии: 1 – автолитовая, 2 – с массивной структурой цемента, 3 – крупнопорфировая, 4 – кластопорфировая; минералы: 5 – серпентин, 6 – кальцит, 7 – доломит, 8 – флогопит + хлорит, 9 – пироаурит, 10 – магнетит + гидроксиды железа, 11 – галит, 12 – прочие минералы

горизонтах многих кимберлитовых диатрем северной части СП в смеси с другими новообразованиями. Нередко он ассоциирует с хантитом, где слагает тонкие прожилки в основной массе пород, или встречается в бруситизированных кимберлитах. Минерал уверенно диагностируется на дифрактограммах по рефлексам с межплоскостными расстояниями, равными 0,2741, 0,2104 и 0,1930 нм. *Гидромагнетит* встречается в виде белых натёчных рыхлых агрегатов на различных

минералах и новообразованиях диатрем северной части СП, ассоциируя с артинитом [7]. Кроме рассеянных выделений минерала в основной массе пород, отмечены водяно-прозрачные жёлоды гидромагнетита размером до нескольких миллиметров, имеющие удлинённо-таблитчатый лейстовидный облик. На дифрактограммах гидромагнетиту соответствуют отражения с межплоскостными расстояниями, равными 0,904, 0,575, 0,380, 0,313, 0,288, 0,2682, 0,2146, 0,1988, 0,1895 и 0,1858 нм. *Хантит* обнаружен в ряде кимберлитовых диатрем (Сытыканская, Заполярная, Новинка, Молодость, Комсомольская-Магнитная, Поисковая и др.), где в верхних горизонтах выполняет мелкие трещинки в основной массе и многочисленные трещины. В отдельных трубках (Заполярная, Новинка и др.) прожилки хантита встречаются в большом количестве до глубины около 100 м от поверхности. Минерал рассеян в основной массе, где уверенно диагностируется рентгенодифрактометрическими исследованиями ($d = 0,361, 0,282, 0,2592, 0,2423, 0,2387, 0,2180, 0,1964, 0,1758$ и $0,1580$ нм), а в прожилках представлен тонкодисперсным белым порошкообразным агрегатом, макроскопически напоминающим мел. В приповерхностных участках диатрем он окрашен гидроксидами железа в буроватые и кремовые тона. Нередко хантит встречается в смеси с магнетитом, где его диагностика возможна только с помощью точных физических методов исследований [7, 20, 21].

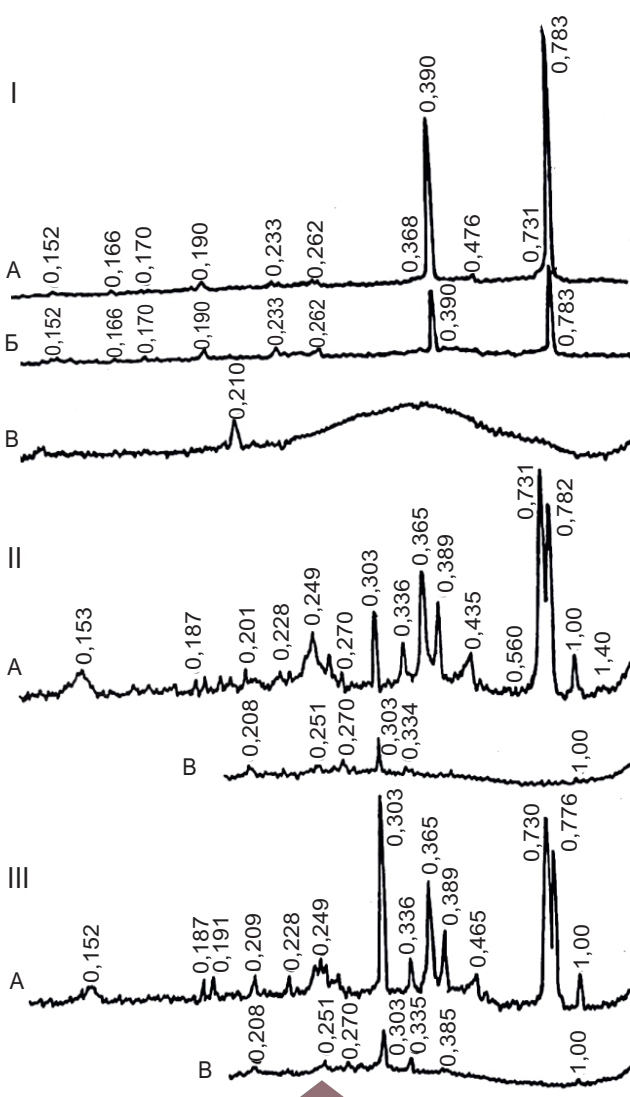


Рис. 7. Дифрактограммы фракции мельче 0,005 мм вторичных образований кимберлитов, обогащённых пирроауритом:

трубки: I – Сытыканская и II и III – Юбилейная; препарат: А – исходный, Б – насыщенный глицерином, В – прокаленный в течение двух часов при 500 °С

Слюдистые образования, представленные флогопитом и хлоритом, относятся к наиболее часто встречаемым в кимберлитовых породах как СП, так и ВЕП, ЮАП, но распределены они в основной массе не столь равномерно, как серпентин и кальцит. В кимберлитовых породах СП *флогопит* относится к одному из наиболее распространённых минералов, где он представлен в основном позднемагматической и постмагматической генерациями [4, 16, 17, 20, 27, 35, 39, 40]. В целом в кимберлитовых породах выделяются не менее трёх генераций флогопита [5, 16]. Первая представлена вкрапленниками таблитчатой и овальной формы размером от нескольких миллиметров до 5 см. Флогопит второй генерации образует в основной массе пород мелкие (до 2 мм) пластинчатые и чешуйчатые кристаллы. Выделяются изометричные идиоморфные псевдогексагональные таблички и удлинённые пластинки слюд. Третья генерация представлена чешуйчатым

флогопитом с размером чешуек не более нескольких миллиметров. Контуры таких чешуек неровные, концы как бы рваные. Наиболее богаты таким флогопитом отдельные кимберлитовые трубки ВМКП (Комсомольская, Зимняя, Новинка и др.). Первые две генерации флогопита окрашены в бурый, коричневый или зеленовато-коричневый цвет; третья имеет бурую, желтовато-бурю, золотистую или белёсую окраску. Наиболее чётко флогопит диагностируется рентгенометрическими методами по серии диагностических рефлексов, кратных 1,0 нм (рис. 8). Степень структурной упорядоченности минерала наиболее чётко и уверенно определяется методами электронографии, применением которой установили следующие параметры элементарной ячейки крупных частиц флогопита: $a = 0,534$ нм, $b = 0,924$ нм, $c = 1,01$ нм, $\beta = 100^{\circ}20'$. Применение указанных методов при изучении флогопитов из кимберлитов показало, что большинство из них представлено типичной для триоктаэдрических слюд модификацией 1 М. Наименьшей степенью упорядоченности характеризуются магматогенные флогопиты. Метасоматические флогопиты отличаются более крупными кристаллами и более высокой степенью структурного совершенства. Однако и здесь в зависимости от дисперсности и степени совершенства структуры выделяется целый ряд слюдястых минералов [14, 20, 27]. Вермикулит рентгеновски диагностирован (рис. 9, обр. I и II) в отдельных кимберлитовых трубках и жилах СП, где он характеризуется низкой степенью упорядоченности структуры. При этом несколько лучшей окристаллизованностью обладает вермикулит из кимберлитовых жил. В то же время на дифрактограммах вермикулита из кимберлитовых трубок после насыщения образца этиленгликолем (см. рис. 9, обр. Пв) появляется рефлекс со значением 1,53–1,55 нм, что указывает на присутствие в структуре минерала не только высокозарядных – вермикулитовых, но и низкозарядных – монтмориллонитовых слоёв. Прокаливание таких образцов уже при 600 °С (см. рис. 9, обр. Пг) сопровождается сокращением части слоёв до 1,0 нм. Всё это даёт основание считать, что рассматриваемый вермикулит может быть отнесён к начальной стадии перехода его в монтмориллонит. Однако большая часть флогопита в основной массе кимберлитов изучаемых древних платформ хлоритизирована, что происходило в условиях слабого водообмена и восстановительной среды с избытком

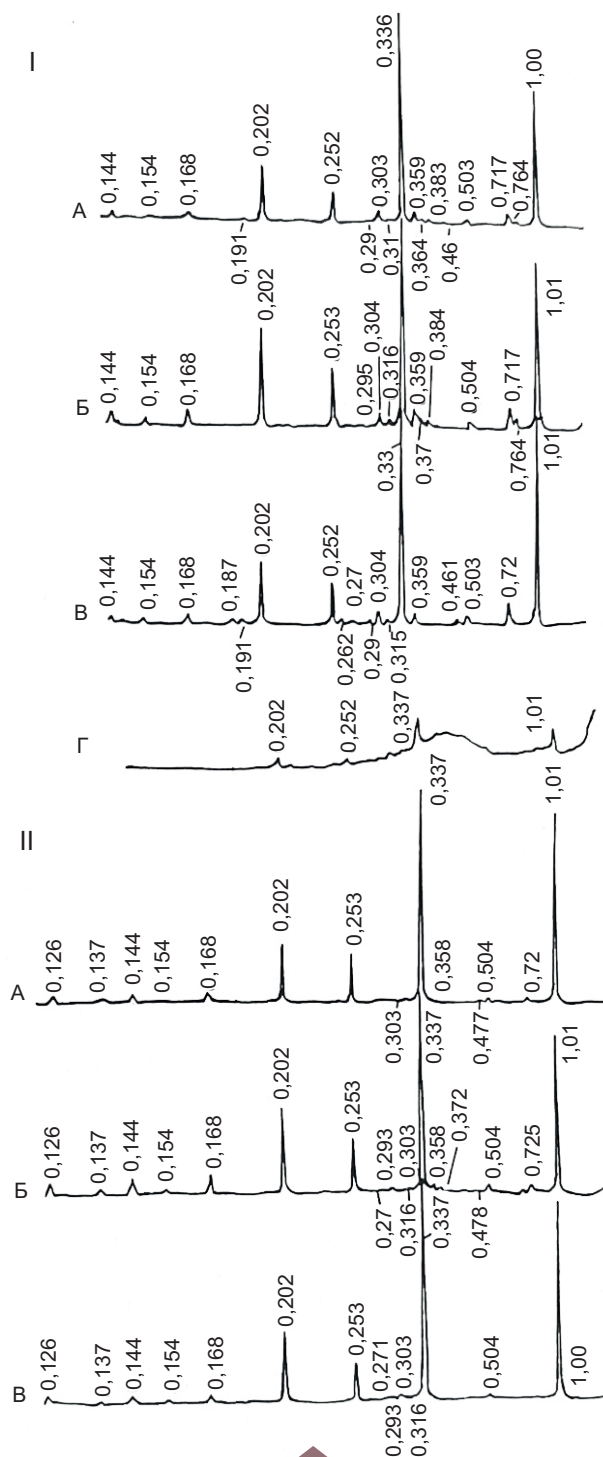
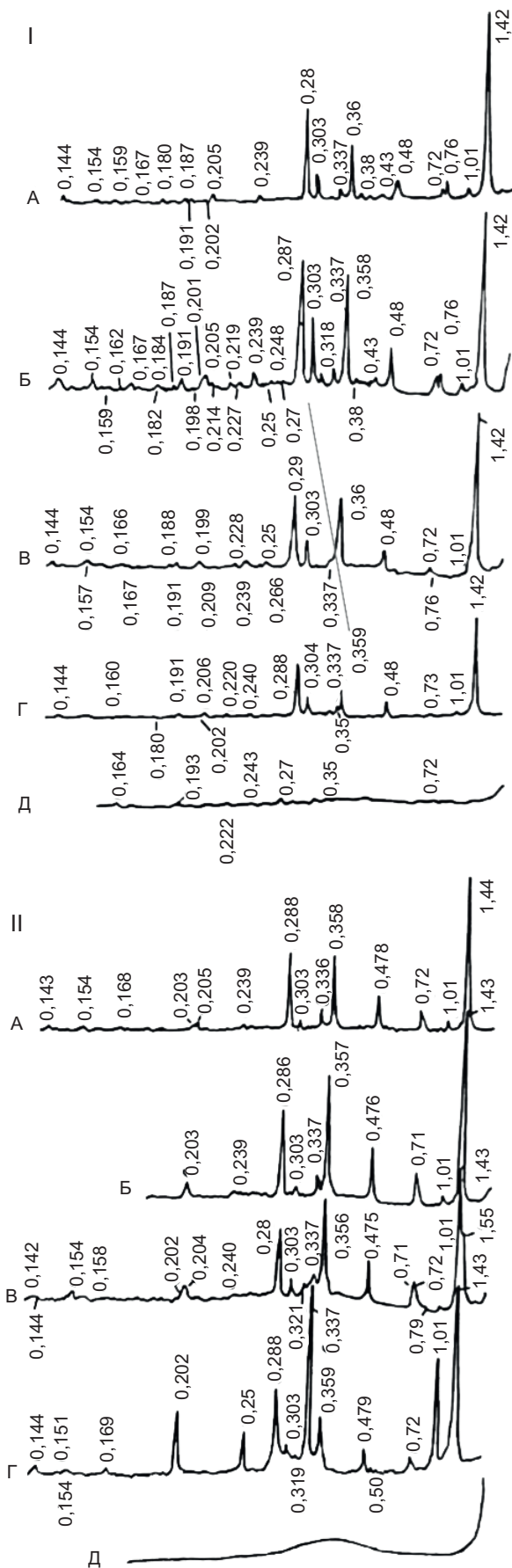


Рис. 8. Дифрактограммы флогопитов (фракция мельче 0,005 мм) из слюдита трубки Новинка (I – образец Н-1) и слюдяного серпентинита трубки Удачная (II – образец У-3):

препарат: А – исходный, Б – насыщенный глицерином, В – прокалённый в течение двух часов при 600 °С, Г – обработанный в течение двух часов 10 %-ным раствором тёплой (80 °С) HCl – ксенолиты осадочных пород нижнего палеозоя



Mg²⁺ [20, 26]. Хлорит, по данным рентгенодифрактометрических исследований (рис. 10) дериватографии, электронографии и результатам химических анализов, относится к магнезиальному типу (MgO до 30 %) с небольшим (3–4 %) количеством FeO, характеризуясь различной степенью упорядоченности. При этом в структуре отдельных изученных образцов беспорядок отмечается лишь в наложении слоёв со смещением их на $\pm b/3$. У других разновидностей минерала наблюдаются не только беспорядок в наложении слоёв, но и элементы пространственного беспорядка. Это подтверждается как электронографическими исследованиями, так и по результатам анализа ИК-спектров. Отмечены случаи обогащения железистой слюдой на контактах с карбонатными ксенолитами, что позволило высказать предположение о развитии постмагматического флогопита не повсеместно, а лишь в породах, обогащённых алюминием и калием, которые чаще распространены в периферийных зонах кимберлитовых провинций. Средние содержания флогопита изменяются от 0 (трубки Деймос и Долгожданная) до 20 % (Нюрбинская), а у хлоритов – от 1 (Интернациональная) до 10 % (Фестивальная). Однако наиболее равномерно флогопит распределён в основной массе трубок МКП (Мир и Интернациональная), НКП (Ботубинская и Нюрбинская), АМКП (Айхал и Юбилейная) и ДКП (Удачная) полей. Неоднородность распределения флогопита и хлорита свойственна большинству кимберлитовых тел ВМКП и ДКП, из которых трубки Зарница и Долгожданная выделяются слабым развитием как флогопита, так и хлорита. Наиболее хлоритизированы кимберлитовые породы трубок Ботубинская, Нюрбинская, Фестивальная, Сытыканская, Деймос и др. Исходя из числа сформировавшихся в основной массе слюдистых образований и их средних содержаний, можно утверждать,

Рис. 9. Дифрактограммы вермикулитов (фракция мельче 0,005 мм) из кимберлитовой жилы Малоботубинского района (I – обр. 947) и одной из трубок Среднеоленёкского района (II – обр. 948):

препараты: А – исходный, Б – насыщенный глицерином, В – насыщенный этиленгликолем, Г – прокалённый в течение двух часов при 600 °С, Д – обработанный в течение восьми часов 10 %-ным раствором тёплой (80 °С) HCl

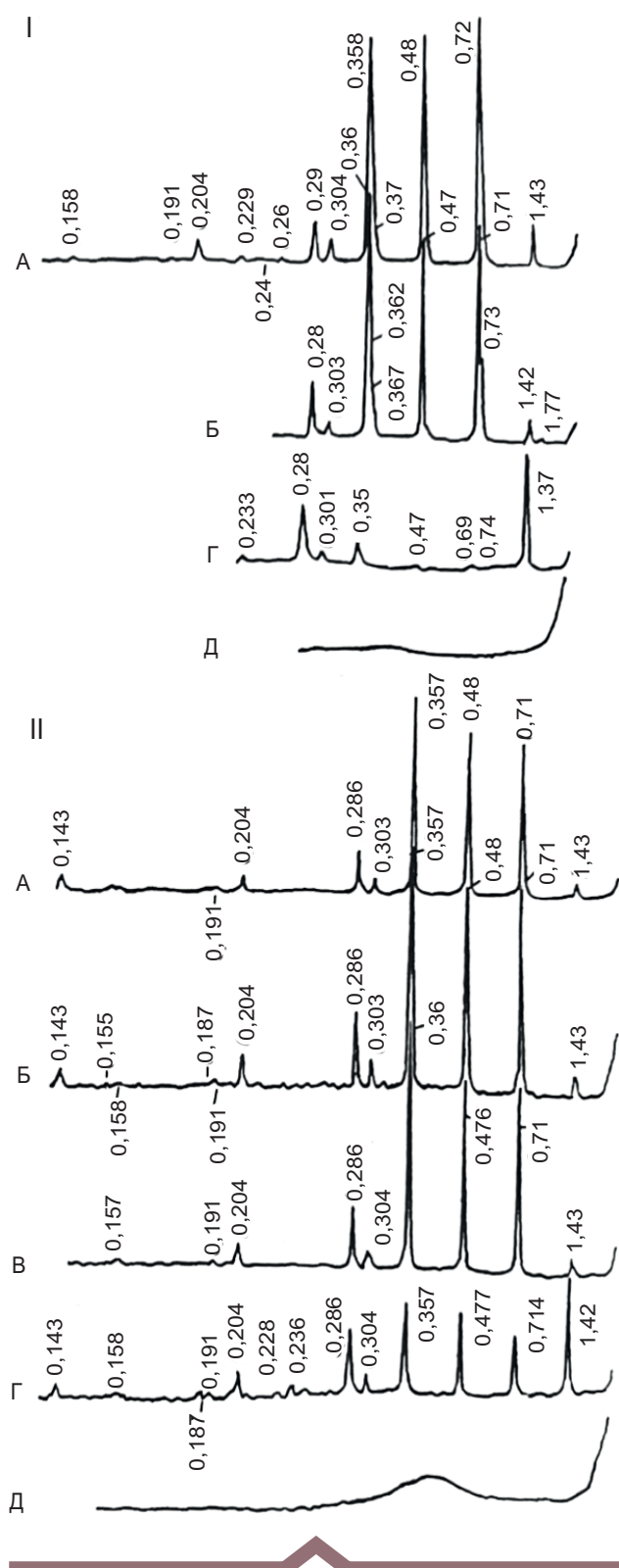


Рис. 10. Дифрактограммы хлоритов (фракция мельче 0,005 мм) из кимберлитов трубки Мир (обр. М-521, II – обр. М-100):

см. услов. обозн. к рис. 9

что не менее половины флогопитов, входящих в состав основной массы кимберлитов НКП (трубки Нюрбинская, Ботубинская и тело Майское), хлоритизированы. Для большинства трубок АМКП, ДКП и ВМКП свойственна обильная хлоритизация слюд, которая наиболее интенсивно протекала в диатремах Удачная, Сытыканская, Фестивальная и Деймос, в результате чего произошла полная трансформация слюд в хлорит. К минералам, довольно часто встречающимся в небольшом количестве в кимберлитах, следует отнести *талък*, возникающий при сравнительно небольшом парциальном давлении CO_2 во флюиде при определённых значениях $\text{MgO} : \text{CaO} : \text{SiO}_2$. Наиболее интенсивные процессы формирования талъка отмечены нами [7, 26] в трубке Нюрбинская. Часто минерал наблюдается в сильно изменённых приконтактных участках диатрем. В отдельных случаях минерал встречен в составе серовато-белых новообразованных прожилков (трубки Мир, Интернациональная и др.), где его концентрация превышает 5%.

В переменных и в целом незначительных количествах в основной массе кимберлитовых пород идентифицированы [7, 9, 26, 17] *оксиды* (магнетит, гематит, кварц, халцедон) и *гидроксиды* (амакинит, брусит, гётит, каолинит), не имеющие устойчивых тенденций к распространению в различных трубках и полях. Исключением является брусит, наиболее интенсивное проявление которого отмечено в диатремах ДКП (Удачная) и ВМКП (Новинка и Поисковая). В кимберлитовых трубках брусит возникает [10, 21] как при серпентинизации породы, так и в результате воздействия гидротермально-метасоматических растворов на заключительных этапах постмагматической переработки кимберлитов. Брусит либо развивается по оливину непосредственно, либо между ними образуется узкая прокладка серпентина или реликтов оливина (рис. 11). Нередко брусит замещает не только зёрна оливина, но и частично другие глубинные минералы кимберлитов (гранаты и пироксены), основную массу породы, а также ксенолиты глубинных и осадочных вмещающих пород, где уверенно идентифицируется рентгенометрически. Параметры элементарной ячейки минерала ($a_0 = 0,4743$ нм) хорошо согласуются с литературными данными. Обычно агрегаты брусита ориентированы в одном направлении. В отличие от серпентинизации, в процессе полного замещения бруситом исходных минералов

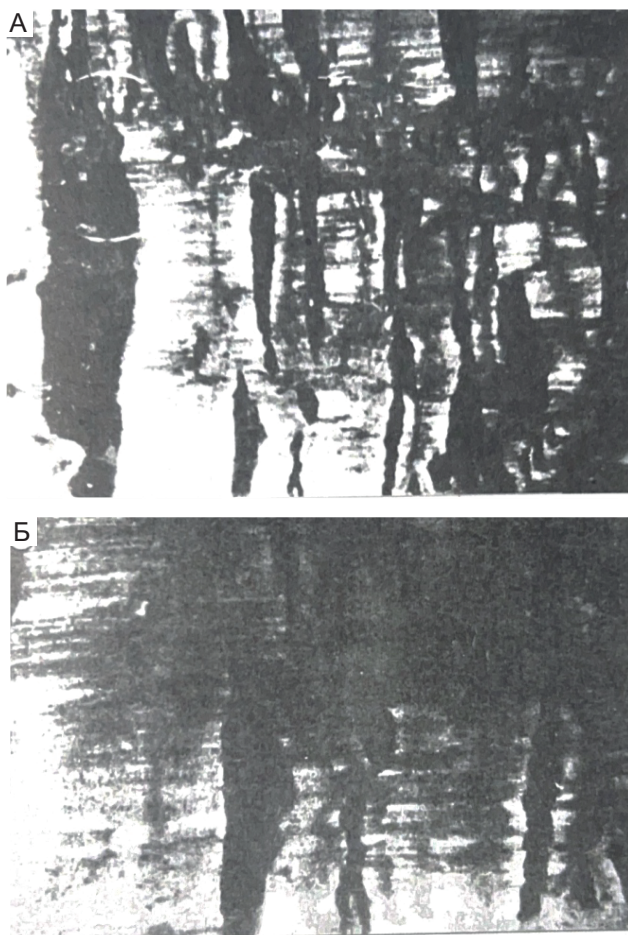


Рис. 11. Густая сеть прожилков, выполненных параллельно-шестоватыми агрегатами волокнистой разновидности брусита – немалита в кимберлитах трубки Удачная:

тёмные участки – реликты оливина (серпентина), светлое – брусит; увеличение: А – 12, Б – 24

кимберлитов реликтовые текстуры и структуры почти не сохраняются. Остаются только реликты некоторых устойчивых минералов, а также расплывчатые очертания вкрапленников оливина, что свидетельствует о полной перекристаллизации исходной породы, сопровождаемой выносом кремнекислоты [26]. *Магнетит* широко распространён в кимберлитах многих трубок, где зачастую расплён в основной массе пород; отмечается он и в виде неправильных выделений, конкреций и жезд, а также в отдельных серпентиновых псевдоморфозах. Минерал образует также мелкие (до 2,5 мм) или ветвящиеся прожилки (до 5 мм) с нечёткими очертаниями. В гео-

дах и конкрециях октаэдрические кристаллы этого минерала обычно ассоциируют с кальцитом, баритом и серпентином. Вокруг вкрапленников и по краям прожилков серпентина обычно также отмечается пелитоморфный магнетит. Отмечаются две важнейшие морфологические разновидности магнетита: а) крупнозернистые агрегаты (нередко радиально-лучистого строения) или сростки кристаллов, реже отдельные кристаллы; б) скопления мелкозернистого магнетита, которые либо образуют неправильные гнезда, полосы и линзы, либо равномерно распределены в основной массе. Гематит в кимберлитовых трубках присутствует в концентрациях, редко превышающих первые проценты. Чаще всего он встречается в основной массе кимберлитов или покрывает тонкой коркой кристаллы кальцита или других минералов. *Гётит* является довольно распространённым новообразованием в кимберлитовых породах многих алмазоносных регионов. Особенно много минерала в верхних частях ряда диатрем СП, где он окрашивает породы в светло-коричневый (охристый) цвет. Иногда пылевидные выделения его рассеяны в основной массе пород или заполняют пространство между кристаллами кальцита, магнетита и других минералов. В виде сферолитов гётит в ассоциации с гематитом часто нарастает на гранях других минералов. В верхних горизонтах кимберлитовых трубок, где развита кора выветривания (КВ), гидроксиды железа пропитывают в различной степени изменённые породы, окрашивая их в различные коричневые оттенки. *Амакинит* встречен нами в основной массе ряда кимберлитовых диатрем СП в виде зеленоватых кристаллов или их сростков размером до 5 мм. На дневной поверхности он быстро изменяется и покрывается буровой корочкой гидроксидов железа. Отмечен амакинит в виде самостоятельных выделений на стенках отдельных трещин, где он обычно ассоциирует с пироауритом, кальцитом и серпентином. *Кварц* и *халцедон* являются характерными вторичными минералами кимберлитовых пород СП, неравномерно распределяясь как в основной массе, так и в трещинах, прожилках и в виде отдельных новообразований. Повышенные концентрации этих минералов приурочены не только к самым верхним, затронутым гипергенными процессами, частям диатрем, но и к приконтактовым зонам на более глубоких горизонтах. Кварц часто встречается вместе с кальцитом и другими ново-

образованиями, образуя щётки, жилы и прожилки. Нередко кристаллы кварца на кварц-опал-халцедоновой подложке наблюдаются на в различной степени изменённой кимберлитовой породе. Размеры, форма и морфология кварцевых индивидов самые разнообразные [5, 10, 27], с примесями гидроксидов железа (бурые) или микровключениями сульфидов железа (серые). Присутствие среди кварцев из верхних горизонтов диатрем значительного количества аметистовидных формирований позволяет отнести этот минерал к низкотемпературным образованиям, которыми является большинство природных аметистов. На низкотемпературный характер кристаллизации кварца в кимберлитах указывает также присутствие во многих изученных кристалликах включений гётита – минерала, образующегося при температурах ниже 200 °С. Эти данные согласуются и с результатами исследований температур гомогенизации газовой-жидких включений в кимберлитах [7, 26, 27], по которым верхний температурный интервал кристаллизации кальцита обычно не превышает 350 °С, а кварца – намного ниже. Довольно распространён в кимберлитовых диатремах (особенно в приконтактовых их частях) и халцедон, отмеченный как в составе основной массы пород, так и в псевдоморфозах и друзах. Псевдоморфозы халцедона вместе с находящимися в них минералами образуются в крайне изменённых кимберлитах. В результате наложения различных процессов произошли сильные изменения не только в самих кимберлитах, но и в образовавшихся по трещинам жилах. Порода обычно станет светлой, в связи с содержанием значительного количества гипса и уменьшением роли гидроксидов железа. Стенки такой породы нередко покрыты друзами мелких кристаллов, которые обычно окутаны гипсом.

Среди вторичных образований основной массы кимберлитов СП, ВЕП и ЮАП широко распространены сульфиды, часто встречаемые также в жилах и прожилках. Кроме сульфидов железа распространены в основной массе пород и минералы других металлов (галенит, сфалерит и миллерит). Некоторые из них формируются в виде зернистых (халькопирит) или волосовидных (миллерит) агрегатов. *Пирит* образует в кимберлитовых породах как сплошные массы и агрегаты, так и отдельные кристаллы и их друзы. Наиболее широким распространением минерал пользуется в верхах кимберлитовых диатрем, в различной сте-

пени изменённых гипергенными процессами, что подтверждается практически полным замещением флогопита хлоритом в таких апокимберлитах (рис. 10). Часто по трещинам минерал выполняет прожилки, ассоциируя с другими образованиями. Отмечаются также сферолитовые агрегаты минерала в основной массе пород. Нередко выделяются несколько генераций пирита: I генерация кубооктаэдрического габитуса с мозаично-блоковым строением локализована в трещинах, выполненных также друзами светло-коричневого кальцита. Пирит II генерации – более мелкий, нарастающий на другие минералы (кальцит и серпентин). *Сфалерит* обнаружен в верхних частях многих кимберлитовых диатрем (Мир, Новинка, Прогнозная, Комсомольская-Магнитная и других) в ассоциации с другими сульфидами. Совместно с кальцитом он встречен в отдельных прожилках и на более глубоких горизонтах этих же трубок. На стенках трещин минерал образует идиоморфные кристаллы. Часто он слагает сплошные массы и неправильной формы выделения в изменённых кимберлитах. Сфалерит имеет чёрный или тёмно-коричневый цвет с алмазным блеском. *Галенит* встречен в небольшом количестве только в верхних частях некоторых кимберлитовых диатрем (Мир, Краснопресненская, Юбилейная, Сытыканская и др.). Среди вторичных образований основной массы кимберлитов, где минерал диагностирован рентгенодифрактометрическими методами исследований, нередко отмечаются отдельные хорошо огранённые кристаллы галенита. *Миллерит* отмечен во многих кимберлитовых трубках в виде примеси в новообразованиях сульфидов, а иногда образует с некоторыми минералами тесные срастания. Встречается он и в серпентин-кальцитовых псевдоморфозах по оливи-ну, в пустотах выщелачивания, а также в качестве включений в прожилках кальцита. Цвет минерала – жёлтый, золотистый до коричнево-жёлтого, блеск металлический. Длина его волосовидных индивидов составляет обычно 1–3 мм, достигающая в отдельных случаях до 15 мм. Иногда миллерит образует радиально-лучистые агрегаты, реже спутанно-волокнистые войлокоподобные корки, состоящие из игольчатых или волосовидных индивидов. *Пирротин* обычно в кимберлитах развивается по мелким трещинам, но чаще всего встречается в виде тонкозернистых мелких агрегатов в серпентин-кальцитовой массе кимберлитов. *Тоцилинит* обнаружен во многих кимберлитовых

трубках (Мир, Удачная, Юбилейная, Сытыканская и др.), где его агрегаты имеют чёрный цвет с бронзовым оттенком. На воздухе этот минерал быстро покрывается плёнкой гидроксидов железа. Точилинит иногда развивается также по псевдоморфозам серпентина, придавая им тёмно-серую окраску [7, 29]. Иногда в зальбандах жильного кальцита розетки мелкочешуйчатого точилинита ассоциируют с пиритом и пироауритом. *Марказит* встречается как в основной массе пород, так и в виде прожилков и кайм вокруг вкрапленного серпентина и других новообразований. Анализ ассоциаций минералов показывает, что марказит более поздний минерал по отношению к пириту. *Халькопирит* установлен в верхних горизонтах отдельных кимберлитовых трубок, где обычно образует две генерации. Первая замещает другие сульфиды (пентландит и др.) и развивается по трещинам в кимберлите. Вторая встречается в виде реликтовых выделений пентландита, замещённого халькопиритом.

В основной массе кимберлитов многих диатрем встречаются *сульфаты*, представленные безводными (ангидритом, целестином, баритом и таумаситом) и водными (гипс, эпсомит, метабазалюминит и брошантит) разновидностями, а также *фосфаты* (франколит) и *галогениды* (галит). *Ангидрит* наиболее характерен для кимберлитовых пород глубоких горизонтов трубок Мир, Интернациональная и др. *Целестин* установлен в основной массе кимберлитов многих кимберлитовых трубок СП и ЮАП, отмечается в виде уплощённых радиально-лучистых агрегатов. Встречены также короткостолбчатые, таблитчатые и копьевидные кристаллы. *Барит* выявлен при изучении вещественного состава трубок Краснопресненская, Удачная, Якутская и др. *Таумасит* обнаружен в кимберлитовых породах отдельных трубок (Заполярная, Новинка, Удачная и др.) в виде ветвящихся мономинеральных прожилков или гнёзд размером до 1–1,5 см, а также рассеян в основной массе пород. Агрегаты *гипса* игольчатой и волокнистой формы встречены в верхних горизонтах многих кимберлитовых диатрем (Удачная, Краснопресненская, Якутская и др.). *Эпсомит* отмечен в отдельных блоках кимберлитов верхних частей диатрем (Юбилейная, Удачная и др.), придавая породам белёсую окраску. *Метабазалюминит* установлен в виде ничтожной примеси в изменённых кимберлитах трубок Сытыканская, Юбилейная и др. *Брошантит* уверенно диагностиро-

ван лишь в некоторых изученных образцах изменённых кимберлитов трубок Удачная и Сытыканская, где в единичных случаях его концентрация достигает до 10 %.

Характер и интенсивность развития вторичных минералов в основной массе кимберлитовых пород СП показывают разнообразие процессов карбонатизации и хлоритизации, но не раскрывают всех особенностей их, связанных с образованием серпентинов и флогопитов. Последние относятся к индикаторным минералам кимберлитов (ИМК), имеющим слоистую структуру, способную отражать условия их образования и давать возможность использования их и для анализа постмагматического преобразования кимберлитовых пород. Поскольку полуколичественных характеристик содержания минералов в породе недостаточно, для выявления индивидуальных черт различных месторождений важным становится установление структурных особенностей минералов (серпентинов, слюдистых образований и др.) основной массы кимберлитов. Это позволяет также выявлять и отмечаемые ранее структурные характеристики этих минералов, связанные или с их структурно-морфологическими, или видовыми особенностями. Так, серпентиновые минералы в кимберлитах представлены в основном лизардитом, хризотилом и Al-серпентином (септохлоритом). Признано, что серпентинизация оливина происходит при температурах не выше 500 °С даже при высоких давлениях. При этом лизардит образуется при температуре 400–500 °С, а хризотил – при более низких температурах. Большое значение на течение этого процесса имеет рН условий среды. Проведёнными экспериментальными исследованиями процессов серпентинизации установлено, что в кислой среде большая часть оливина замещается лизардитом, в кремнесодержащей щелочной – антигоритом и хризотилом, в нейтральной – лизардитом и хризотилом. Судя по этим и другим минералам, для кимберлитов отмечается закономерное изменение среды метасоматизирующих растворов от кислой через нейтральную до щелочной. Различные кимберлитовые поля СП существенно различаются по содержанию отдельных разновидностей серпентинов. Так, наиболее часто Al-серпентин встречается в трубках ДКП, постепенно снижаясь в диатремах в направлении от ВМКП, МКП, НКП до АМКП. Наибольшие концентрации минерала отмечены в кимберлитах трубок Зарница и Фестивальная,

где он диагностирован в 70 % изученных проб. На примере трубок Ботуобинская, Нюрбинская, Заполярная и Айхал выявлена [9, 26] тенденция к последовательному увеличению количества проб, содержащих Al-серпентин при переходе от порфировых кимберлитов к автолитовым кимберлитовым брекчиям и далее к кимберлитовым туфобрекчиям. Однако в отдельных диатремах одни и те же типы пород, относящиеся к разным диатремам, могут существенно различаться по степени распространения Al-серпентина. Многократная смена pH условий среды в период становления кимберлитов является основной причиной развития дефектов в структуре серпентинов. Количество серпентинов с низкой, средней и высокой степенью дефектности может в определённой мере характеризовать уровень стабильности постмагматических преобразований кимберлитов. Наиболее часто дефектные серпентины встречаются в основной массе кимберлитов трубок Айхал (АМКП) и Нюрбинская (НКП). Эти месторождения подобны по степени распространения Al-серпентина, но существенно отличаются по уровню развития лизардита и хризотила. Так, в основной массе кимберлитов трубки Айхал преобладает хризотил, в то время как в диатреме Нюрбинская более развит лизардит. Существенно меняются морфологические формы серпентина в процессе гипергенного изменения кимберлитов. В нижних горизонтах коры выветривания (КВ) преобладает серпентин из слоёв структурного типа А и В [7, 10, 17, 35]. При этом для частиц новообразованного политипа (А) вначале (рис. 12, А) характерна округлая глобулярная форма (размер глобул достигает 0,5 мкм в диаметре), которая образуется иногда на острых гранях других минералов. На отдельных участках отдельные глобулы сочленяются в вытянутые червеподобные сростки длиной в несколько микрометров. Вверх по разрезу КВ происходит укрупнение (см. рис. 12, Б) как частиц новообразованного серпентина, так и собственных им сростков. Причём у отдельных кристаллов появляется в этом случае псевдогексагональная огранка, а сам серпентин практически полностью переходит в более устойчивую в гипергенных условиях модификацию А. Это показывает, что на ранних этапах выветривания кимберлитов изменение серпентина связано в основном с его перекристаллизацией, сопровождающейся политипными превращениями. Одновременно с этим слоистые мине-

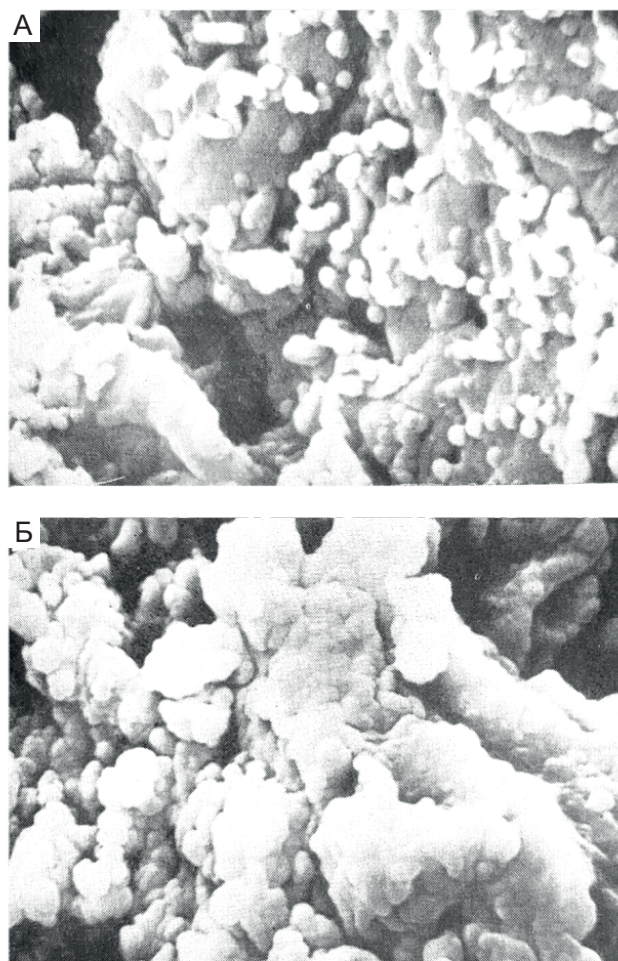


Рис. 12. Электронные микрофотографии округлых выделений серпентина на гранях первичных минералов (А) и псевдогексагональных кристаллов минерала (Б) в продуктах выветривания кимберлитов трубки имени XXIII съезда КПСС (по скв. 102):

А – глубина 28 м (|| напластованию, увеличение 5000); Б – глубина 25 м (|| напластованию, увеличение 5000)

ралы триоктаэдрического типа либо разлагаются (Mg- и Fe-Mg-хлориты), либо частично преобразуются в диоктаэдрические разновидности (например, флогопит в гидрослюдю). В совокупности эти процессы обуславливают значительное изменение физических и физико-механических свойств материнских пород (рис. 13), что определяет последовательное увеличение в их объёме открытой поверхности, контактирующей с флюидами, и скорости дренирования последними выветривавшихся горизонтов. В свою очередь минеральный состав новообразований и распределение

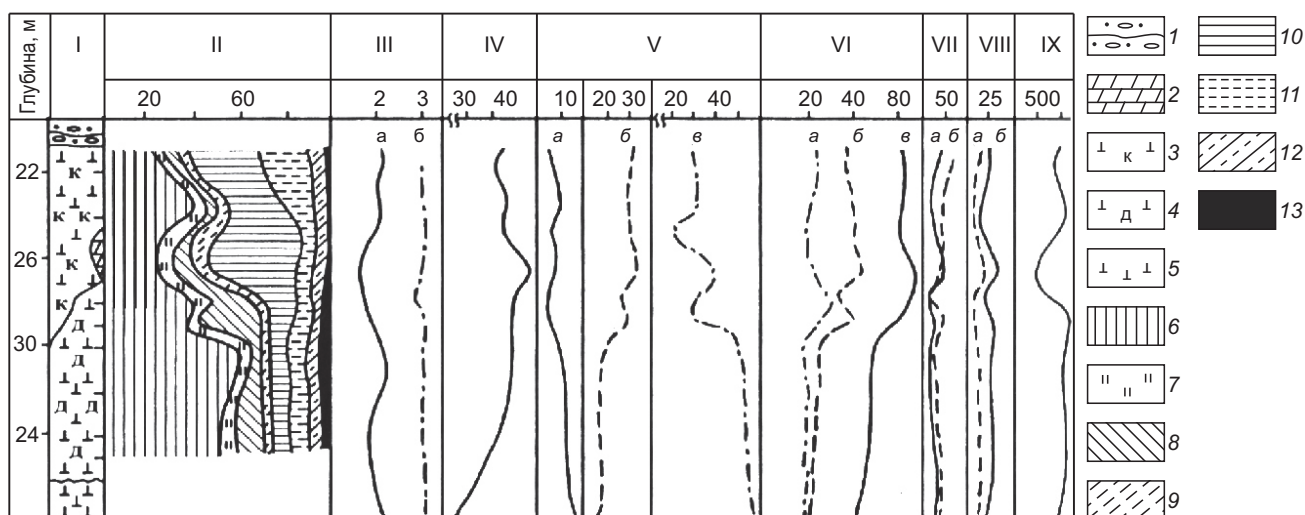


Рис. 13. Изменение физических и физико-механических свойств пород по разрезу КВ кимберлитов трубки имени XXIII съезда КПСС (по разведочной скважине 102):

I – литологическая колонка: 1 – песчано-гравийно-галечные образования мезозоя, 2 – терригенно-карбонатные породы нижнего палеозоя, 3–5 – кимберлиты: 3 – выветрелые, 4 – дезинтегрированные, 5 – плотные; II – микроагрегатный состав (в %, размеры фракций в мм): б – крупнее 0,5, 7 – 0,5–0,25, 8 – 0,25–0,1, 9 – 0,1–0,05, 10 – 0,05–0,01, 11 – 0,01–0,005, 12 – 0,005–0,001, 13 – мельче 0,001; III – объёмная масса (а) и плотность (б) пород (в г/см³); IV – пористость пород (в %); V – влагосодержание (в %): а – гигроскопическая влажность, б – максимальная молекулярная влагёмкость, в – естественная влажность; VI – характеристика пластичности: а – число пластичности, б–в – нижний (б) и верхний (в) пределы пластичности (в %); VII – прочность на сжатие: а – ⊥, б – ||; VIII – сопротивление сдвигу: а – максимальное, б – минимальное значение; IX – скорость упругих волн (в м/с)

по профилям значений рН (9,46–7,10) и Eh (328–190) позволяют сделать вывод, что рассматриваемая стадия выветривания кимберлитов соответствует щелочному типу. В целом изученные элювиальные толщи можно отнести к типу остаточных КВ, находящихся на стадии начальной гидратации исходных минералов и выщелачивания наименее устойчивых компонентов.

Наряду с вышеописанными вторичными минералами, связанными с пневматолитово-гидротермальными и гипергенными процессами в кимберлитовых породах отмечены новообразования, возникшие с участием высокоминерализованных растворов. Это относится к борсодержащим минералам (ашариту, екатериниту, ферросайбелиту и др.). Бораты выявлены в мелких соляных жилах и прожилках, где кроме бесцветного, оранжево-красного и голубого галита отмечены также ангидрит, кальцит и серпентин с офитовой структурой (серпофит). В мелких прожилках борные минералы не встречены вместе, а в раздувах не соприкасаются друг с другом. Поскольку борные

минералы обычно связаны с солями, то можно предполагать попадание части бора в кимберлитовые диатремы вместе с растворимыми солями из вмещающих осадочных соленосных отложений. В процессе серпентинизации бор практически рассеивается в породе и только при наличии излишка магнезии наряду с бруситом возникает незначительное количество ашарита [7, 17, 19]. Для кимберлитов наблюдается прямая зависимость содержания бора от состава летучей фазы, под воздействием которой осуществляются их метасоматические (автометасоматические) изменения. Поэтому обогащение подземных растворов бором следует в значительной степени связывать с глубинными источниками этого элемента. Предпосылкой поступления бора из глубины является возникновение самих трубок. Образование канала, впоследствии выполненного кимберлитовыми породами, а также образование вокруг него и в самих кимберлитах интенсивной трещиноватости делает возможным сообщение верхних участков диатрем с глубинами, откуда

и поступают летучие компоненты в верхние горизонты.

На глубоких горизонтах кимберлитовых трубок СП нами впервые диагностирован *магнетитовый ферригидроксид* [7]. Среди жильных образований в серпентинизированных кимберлитовых брекчиях глубоких горизонтов трубки Мир эти новообразования ассоциируют с кальцитом и ангидритом. Встречается минерал в небольших пустотах (2–3 см) и трещинах (до 1 см), в которых слагает прожилки, «арагонитоподобные» скопления, имеющие белую или сероватую и желтоватую окраску (рис. 14, А–Г). Мощность таких скоплений (от основания выделения до поверхности сферы) – 0,3–0,8 см. В продольном разрезе выделений видно, что минерал представлен параллельно-волокнистыми агрегатами (см. рис. 14, А, Б). Рост его начинался в виде асбестовидных волокон на подложке серпентина и заканчивался образованием «арагонитоподобной» сферы, состоящей уже из тонкозернистого агрегата этого минерала. Цвет минерала – от густо-сине-зелёного в основании волокон и в центре параллельно-волокнистого агрегата до густо-жёлто-зелёного и светло-жёлтого в верхней части волокон и в области сферы. В отдельных агрегатах встречаются бесцветные разновидности. Минерал оптически одноосный, оптический знак положительный, удлинение положительное. Минерал принадлежит к тригональной системе с пространственной группой $R\bar{3}m$. Параметры ячейки: $a = 0,3108 \pm \pm 0,002$ нм, $c = 2,324 \pm 0,04$. По рентгенометрическим характеристикам волокнистый минерал близок к новаиту и к природным пирроауритам из различных генетических типов пород. В отражённых электронах минерал представляет собой чередование светло- и тёмно-серых полос (волокон). Тонкозернистая масса в области сферы обнаруживает определённую текстурную деформированность. ИК-спектры рассматриваемого волокнистого сине-зелёного минерала очень сходны с ИК-спектрами пирроаурита. Однако в области колебаний анионов $[\text{CO}_3]^{2-}$ фиксируется главным образом полоса с частотой 1440 см^{-1} , что связано с примесью кальцита. В поляризованных оптических спектрах поглощения сине-зелёной разновидности ферригидроксида в области 14800 см^{-1} отмечается широкая интенсивная полоса поглощения, обусловленная переносом заряда $\text{Fe}^{2+} \rightarrow \text{Fe}^{3+}$. Слабая поляризация этой полосы связана, вероятно, с полосчатым погасанием

волокон, которые были использованы в качестве препарата для измерений.

Таким образом, проведёнными исследованиями показано, что для основной массы каждой кимберлитовой диатремы наблюдается доминирование индивидуального характера развития минералов над их общими свойствами, главными среди которых являются преобладание серпентин-кальцитовых, кальцит-серпентиновых, хлорит-серпентиновых ассоциаций и уровень распространения Mg-Fe-разновидностей флогопита в кимберлитовых породах. Отличие кимберлитовых тел обусловлено интенсивностью развития и равномерностью распределения доминирующих вторичных минералов и их разновидностей (кальцита, доломита, пирроаурита, флогопита, хлорита, лизардита и хризотила). Существуют отличия в составе основной массы и вторичных минералов кимберлитов не только в разных трубках, но и в плане их отдельных тел и даже блоков. Охарактеризованы наиболее распространённые в кимберлитовых породах ассоциации новообразований, состоящие из двух и более минералов, большинство из которых являются парагенетическими, что позволило решить некоторые вопросы их постмагматического преобразования. Обширный материал минералого-петрологических исследований кимберлитовых пород позволил установить, что процессы серпентинизации, карбонатизации, хлоритизации и бруситизации в каждой диатреме имеют индивидуальный характер. Важными результатами проведённых исследований являются рекомендации по возможностям использования вторичных минералов кимберлитов для определения величины эрозионного среза диатрем. Анализ вещественного состава кимберлитов по данным разведки глубоких горизонтов и эксплуатации верхних частей диатрем (Мир, Интернациональная, Айхал, Удачная, Сытыканская, Юбилейная, Орапа, Мвадуя, Премьер, Финш, Карпинская-I, Карпинская-II и др.) позволяет наметить своеобразную вертикальную зональность, которая проявляется в смене состава и строения кимберлитов. С глубиной сильно изменённые кимберлиты сменяются зоной дезинтеграции, которая затем переходит в плотный кимберлит. Кроме гипергенной зональности, с глубиной изменяется степень переработки кимберлитов вторичными процессами под воздействием пневматолитово-гидротермальных растворов. В этом направлении обычно снижается степень серпентинизации

и хлоритизации пород, а также изменяется направленность некоторых других процессов. Естественно, что при разном денудационном срезе кимберлитов на поверхность будут выходить различные зоны вторичной минерализации. Следовательно, по характеру вторичных минералов часто

можно судить о величине эрозионного среза кимберлитовых тел.

Предложены также различные варианты использования основных закономерностей выветривания силикатных пород, типоморфных особенностей глинистых и слюдяных минералов

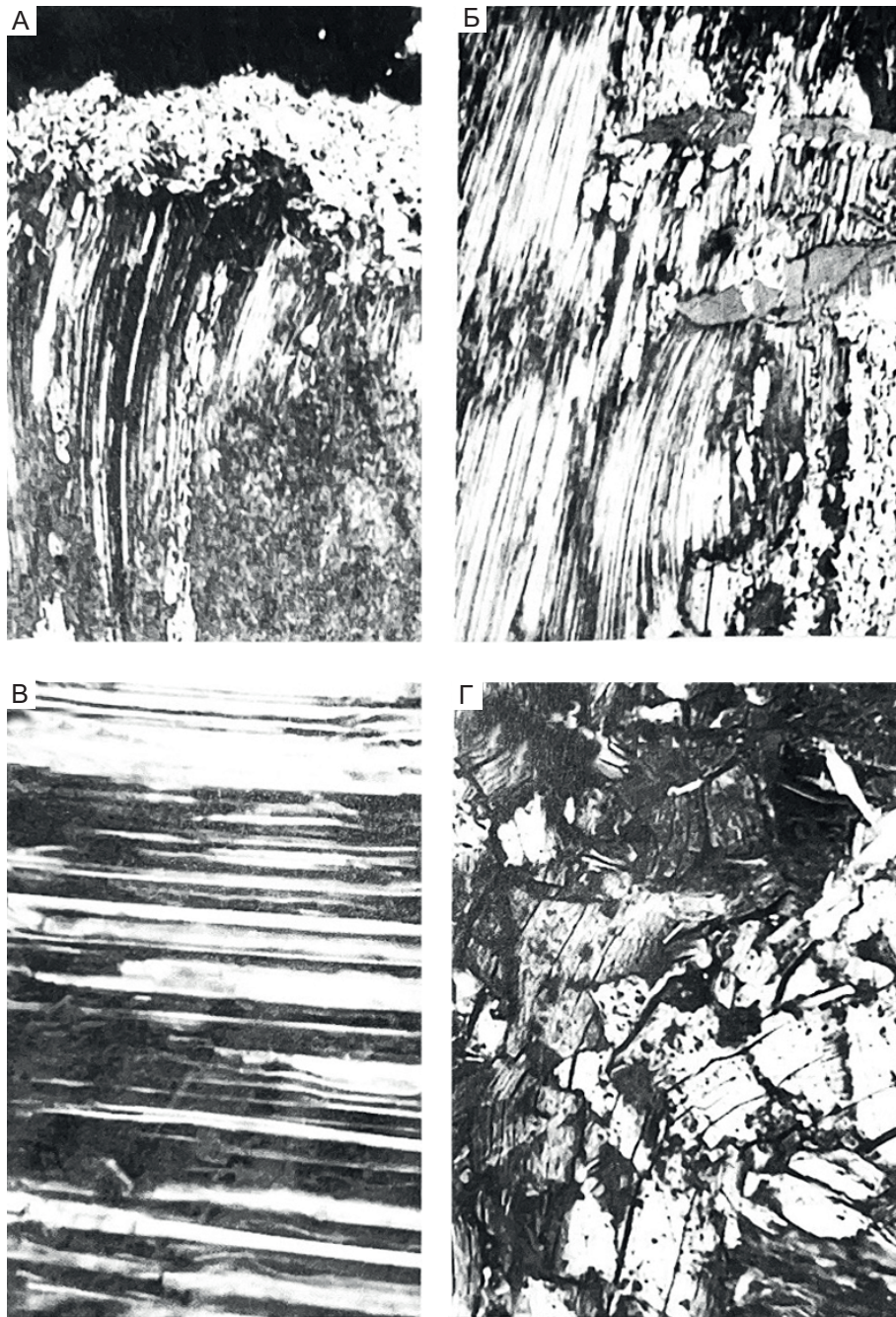


Рис. 14. Формы выделений магниевого ферригидроксида в кимберлитах глубоких горизонтов трубки Мир (обр. М-55/863) (А-Г)

в древних КВ на образованиях различного генезиса и состава. Полученные новые данные о свойствах флогопита и продуктов его твердофазовых превращений (хлорита) имеют важное значение для совершенствования методики прогнозирования и поисков алмазных месторождений.

Обогащение алмазоносных пород и извлечение из них алмазов – процессы сложные, базирующиеся на современных достижениях многих отраслей знаний. Здесь целесообразно коснуться основных аспектов влияния вещественного состава кимберлитов на технологию обогащения и извлечения алмазов, в основе которой лежат физико-механические свойства полезного компонента. Алмазы характеризуются целым рядом специфических свойств, успешно использующихся на обогащении кимберлитов и извлечении их из концентратов. К ним относятся содержание алмазов в породе, крупность их кристаллов, морфология зёрен, плотность, твёрдость, различные типы люминесценции, гидрофобность и способность прилипать к определённым жирам, немагнитность, неэлектропроводность, прозрачность и др. На этих многочисленных свойствах основаны методы обогащения кимберлитов и извлечения из них алмазов. Под воздействием гипергенных процессов кимберлиты выветриваются и превращаются в глинистые образования. При этом выносятся легкорастворимый материал и накапливается труднорастворимый (в том числе алмазы). Повышение алмазоносности в коре выветривания (КВ) кимберлитов колеблется от 2,5 (трубка имени XXIII съезда КПСС) до 5 и более раз (трубка Интернациональная и др.). В верхних горизонтах КВ кимберлитов этих трубок растёт число окрашенных алмазов. Увеличение доли алмазов, имеющих поверхностную окраску оттенка морской воды, отмечено также в верхних (выветрелых) горизонтах трубки Финш (ЮАР). Во всех отмеченных случаях с глубиной в выветрелых кимберлитах голубая окраска алмазов исчезает.

В условиях гипергенеза и при интенсивных пневматолитово-гидротермальных преобразованиях кимберлиты превращаются в апокимберлиты и даже в глинистые образования, существенно меняющие в целом физико-механические свойства обогащаемых пород. Вторичные минералы, образующиеся в постмагматическую стадию изменения кимберлитов, являются определяющими при формировании целого ряда свойств этих пород, таких как крепость, пористость, влаж-

ность, содержание тяжёлой фракции и люминесцентных компонентов. Эти свойства играют важную роль при обогащении, а поэтому изучение вторичной минерализации кимберлитов приобретает важное значение для решения технологических вопросов обработки алмазосодержащих руд. В процессе проведённых нами исследований установлены некоторые закономерности распределения порообразующих вторичных минералов в верхних частях и на разведанную глубину (до 1,2 км) отдельных трубок. В кимберлитах широко распространён ряд минералов, о присутствии которых ранее даже не подозревали или имели лишь отрывочные сведения. По нашим данным, в кимберлитах некоторых трубок в роли порообразующих минералов выступают пироаурит, амакинит, брусит, галит и др., которые на отдельных горизонтах составляют до 30–40 % объёма породы. Повышенное содержание в кимберлитах нетрадиционных для них вторичных минералов может оказывать существенное влияние на технологический процесс. От их количества могут зависеть вязкость кимберлитов, выход шламов, влияющих на селективность и режимы работы пенной сепарации. Ряд вторичных минералов, обладающих адсорбционными свойствами (монтмориллонит, сапонит, различные смешанослойные образования и др.), способен в различной степени накапливать влагу в отдельных блоках кимберлитов и тем самым воздействовать на обогатимость породы.

В состав вторичных минералов входят многие элементы, различная сила связи которых в кристаллической решётке предопределяет неодинаковую растворимость этих минералов или выщелачивания из них отдельных элементов, переходящих в реагенты, используемые при обогащении. Это изменяет состав реагентов, pH среды и тем самым снижает эффективность пенной флотации и сепарации. Кроме того, состав вторичной минерализации определяет особенности поверхностных плёнок и покрытий (оксиды железа, кальция и др.) на кристаллах алмаза, от которых они не освобождаются при извлечении из кимберлитовых пород. Так, повышенное содержание магнетита в кимберлите некоторых трубок ряда алмазоносных районов приводит к тому, что часть алмазов покрыта плёнками или оболочками этого минерала, приобретает магнитные свойства и попадает в магнитную фракцию. Наличие плёнок вторичных минералов на кристаллах алмаза

вызывает снижение его гидрофобности и тем самым влияет на его флотирующие свойства и прилипание к жировым поверхностям. Алмазы из некоторых африканских месторождений покрыты слоем гидрофобного вещества в виде галита, оксида железа, гидроксидов кальция и магния. Благодаря этим смесям алмазы становятся гидрофильными и не прилипают к жировым поверхностям. Особенность гаюанских алмазов из россыпей – появление коричневой оболочки, которая мешает их извлечению из концентратов жировыми аппаратами. Немало различных плёнок содержат алмазы из коренных месторождений СП и ВЕП. Отсюда следует, что процесс флотации алмазов в целом сильно зависит от состава вторичных минералов кимберлитов.

На всех этапах разработки коренных месторождений алмазов большое значение в настоящее время придаётся изучению рентгеновской люминесценции алмазов и сопутствующих им компонентов – карбонатов, плагиоклазосодержащих ксенолитов и др. Для селективного извлечения алмазов рентгенолюминесцентными методами необходимо создавать такой режим, чтобы другие люминесцентные минералы не извлекались вместе с алмазами.

Для совершенствования методики и повышения эффективности технологии обогащения кимберлитов и извлечения из них полезного компо-

нента рекомендовано использовать установленные особенности вещественного состава пород, получаемые в результате предварительного минералогического картирования, позволяющего делать прогнозную оценку руд. Важно при этом использовать структурно-морфологические и физические свойства как породообразующих, так и сравнительно редко встречающихся в кимберлитовых породах минералов. В частности, установлено широкое распространение в кимберлитах СП пирроаурита и брусита, наиболее характерные для глубоких горизонтов коренных алмазных месторождений, где минералы нередко являются породообразующими компонентами. Учитывая большую роль этих минералов в процессе технологической отработки месторождений, вопросам изучения пирроауритизации и бруситизации кимберлитовых диатрем следует уделять пристальное внимание. Не менее важными являются задачи по изучению процессов серпентинизации, хлоритизации и карбонатизации, приводящие к изменению физико-механических свойств пород, которые в последующем влияют на состав шихты и извлекаемость из неё полезного компонента. Практическая реализация этих задач возможна только при комплексном изучении вещественного состава кимберлитовых руд с использованием современных физико-химических методов исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В. П., Елисеев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горяйнов С. В., Юрьева О. П., Сонин В. М., Чепуров А. И.* Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидностей (по классификации Ю. Л. Орлова) // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2000. – № 5. – С. 79–97.
2. *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.
3. *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. Геология. – 2000. – № 3. – С. 37–55.
4. *Зинчук Н. Н.* Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород // Геология и геофизика. – 1998. – Т. 39, № 12. – С. 1704–1715.
5. *Зинчук Н. Н.* Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2021. – № 4. – С. 35–52.
6. *Зинчук Н. Н.* Геолого-тектоническое строение и особенности развития Сибирской платформы в связи с алмазописковыми работами // Отечественная геология. – 2024. – № 3. – С. 43–72.
7. *Зинчук Н. Н.* Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2021. – № 3. – С. 50–61.

8. *Зинчук Н. Н.* Коры выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 100–120.
9. *Зинчук Н. Н.* Кремнистые минералы в кимберлитах // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2022. – № 4. – С. 38–52.
10. *Зинчук Н. Н.* Литолого-стратиграфические исследования при алмазопромышленных работах // Вестник СВФУ. Науки о Земле. – 2023. – № 1 (29). – С. 5–28.
11. *Зинчук Н. Н.* О геолого-поисковых типах кимберлитовых трубок // Известия Коми НЦ УрО РАН. Науки о Земле. – 2023. – № 2 (60). – С. 43–56.
12. *Зинчук Н. Н.* О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий // Отечественная геология. – 2023. – № 1. – С. 42–55.
13. *Зинчук Н. Н.* О некоторых особенностях региональной поисковой алмазной минералогии // Вестник Пермского государственного университета. Геология. – 2024. – Т. 23, № 2. – С. 152–172.
14. *Зинчук Н. Н.* Об основных источниках глинистых минералов в мезозойских континентальных алмазонасных отложениях Западной Якутии // Геология и геофизика. – 1982. – № 8. – С. 81–90.
15. *Зинчук Н. Н.* Об особенностях слоистых силикатов в отложениях различных осадочных формаций // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. – Вып. 27. – Пермь : ПГНУ, 2024. – С. 32–49.
16. *Зинчук Н. Н.* Опыт литолого-минералогических исследований древних осадочных толщ в связи с алмазопромышленными работами (на примере Сибирской платформы) // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2014. – № 1. – С. 13–19.
17. *Зинчук Н. Н.* Особенности гидротермального и гипергенного изменения слюдяных кимберлитов // Вестник Пермского государственного университета. Геология. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 32–50.
18. *Зинчук Н. Н.* Особенности кальцита из кимберлитовых пород // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2023. – № 2. – С. 28–43.
19. *Зинчук Н. Н.* Особенности магнетита из кимберлитовых пород // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2024. – № 3. – С. 32–47.
20. *Зинчук Н. Н.* Особенности минералов слюд в кимберлитах // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2018. – № 2. – С. 29–39.
21. *Зинчук Н. Н.* Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород // Отечественная геология. – 2022. – № 4. – С. 34–49.
22. *Зинчук Н. Н.* Особенности распространения и генезиса некоторых карбонатных минералов в кимберлитовых породах (на примере Сибирской платформы) // Отечественная геология. – 2023. – № 6. – С. 62–77.
23. *Зинчук Н. Н.* Особенности состава и распределения слюдяных образований в кимберлитовых породах Якутии // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1991. – № 7. – С. 58–66.
24. *Зинчук Н. Н.* Особенности строения и состава коры выветривания на туфогенных образованиях в алмазонасных регионах Сибирской платформы // Бюллетень МОИП. Отдел геологический. – 2015. – Т. 90, № 4. – С. 42–52.
25. *Зинчук Н. Н.* Особенности сульфидов в кимберлитовых породах // Вестник Воронежского государственного университета. Геология. – 2023. – № 4. – С. 47–62.
26. *Зинчук Н. Н.* Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазонасности кимберлитов // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 36–47.
27. *Зинчук Н. Н.* Сульфаты в кимберлитовых породах // Отечественная геология. – 2023. – № 2. – С. 56–72.
28. *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.
29. *Зинчук Н. Н., Афанасьев В. П.* Генетические типы и основные закономерности формирования алмазонасных россыпей // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1998. – № 2. – С. 66–71.
30. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И.* О концентрации продуктов переотложения кор выветривания в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. – 1981. – № 8. – С. 22–29.
31. *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.
32. *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.
33. *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.
34. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратиферу // Вестник Воронежского государственного университета. Серия геология. – 2003. – № 2. – С. 57–68.

35. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдистых минералов // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1996. – № 1. – С. 53–61.
36. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в осадочном чехле земной коры // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2001. – № 12. – С. 45–51.
37. Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н. Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // Известия высших учебных заведений. Геология и разведка. – 1997. – № 2. – С. 53–63.
38. 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.
39. Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya. Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform // Petrology. – 2001. – V. 9, № 6. – P. 576–588.
40. 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. – V. 76, № 2. – P. 93–112.

REFERENCES

1. Afanasyev V. P., Eliseev A. P., Nadolinny V. A., Zinchuk N. N., Koptil V. I., Rylov G. M., Tomilenko A. A., Goryainov S. V., Yuryeva O. P., Sonin V. M., Chepurov A. I. Mineralogiya i nekotoryye voprosy genezisaalmazov V i VII raznovidnostey (po klassifikatsii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some questions of the genesis of diamonds of types V and VII (according to the classification of Yu. L. Orlov)], Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya, 2000, No. 5, pp. 79–97. (In Russ.)
2. Afanasyev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Efimova E. S., Safyannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornykh M. M., Prugov V. P. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy “lozhnykh” indikatorov kimberlitov [Features of the morphology and composition of some chrome spinels from diamond-bearing areas in connection with the problem of “false” kimberlite indicators], Geologiya i geofizika, 2000, V. 41, No. 12, pp. 1729–1741. (In Russ.)
3. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Geodinamicheskiy kontrol razmeshcheniya kimberlitovykh poley tsentralnoy i severnoy chastey Yakutskoy kimberlitovoy provintsii (petrokhimicheskiy aspekt) [Geodynamic control of the placement of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakut kimberlite province (petrochemical aspect)], Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya, 2000, No. 3, pp. 37–55. (In Russ.)
4. Zinchuk N. N. Vliyaniye vtorichnykh mineralov na oblik i sostav kimberlitovykh porod [Influence of secondary minerals on the appearance and composition of kimberlite rocks], Geologiya i geofizika, 1998, V. 39, No. 12, pp. 1704–1715. (In Russ.)
5. Zinchuk N. N. Geologicheskiye issledovaniya pri poiskakhalmaznykh mestorozhdeniy [Geological research in the search for diamond deposits], Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya, 2021, No. 4, pp. 35–52. (In Russ.)
6. Zinchuk N. N. Geologo-tektonicheskoye stroyeniye i osobennosti razvitiya Sibirskoy platformy v svyazi s almazoposkovymi rabotami [Geological and tectonic structure and features of the development of the Siberian platform in connection with diamond prospecting operations], Otechestvennaya geologiya, 2024, No. 3, pp. 43–72. (In Russ.)
7. Zinchuk N. N. Dokembriyskiye istochnikialmazov v rosspyakh fanerozooya [Precambrian sources of diamonds in Phanerozoic placers], Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya, 2021, No. 3, pp. 50–61. (In Russ.)
8. Zinchuk N. N. Kory vyvetrivaniya i ikh rol v formirovaniipostkimberlitovykh osadochnykh tolshch [Weathering crusts and their role in the formation of post-kimberlite sedimentary strata], Rudy i metally [Ores and metals], 2022, No. 2, pp. 100–120. (In Russ.)
9. Zinchuk N. N. Kremnistyye mineraly v kimberlitakh [Siliceous minerals in kimberlites], Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya, 2022, No. 4, pp. 38–52. (In Russ.)
10. Zinchuk N. N. Litologo-stratigraficheskiye issledovaniya pri almazoposkovykh rabotakh [Lithological and stratigraphic studies during diamond prospecting], Vestnik SVFU. Nauki o Zemle, 2023, No. 1 (29), pp. 5–28. (In Russ.)
11. Zinchuk N. N. O geologo-poiskovykh tipakh kimberlitovykh trubok [On geological exploration types of kimberlite pipes], Izvestiya Komi NTS UrO RAN. Nauki o Zemle, 2023, No. 2 (60), pp. 43–56. (In Russ.)

12. *Zinchuk N. N.* O geokhimicheskikh osobennostyakh raznovozrastnykh obrazovaniy almazoperspektivnykh territoriy [On the geochemical features of formations of different ages in diamond-promising territories], *Otechestvennaya geologiya*, 2023, No. 1, pp. 42–55. (In Russ.)
13. *Zinchuk N. N.* O nekotorykh osobennostyakh regionalnoy poiskovoy almaznoy mineralogii [On some features of regional diamond prospecting mineralogy], *Vestnik Permskogo gosuniversiteta. Geologiya*, 2024, V. 23, No. 2, pp. 152–172. (In Russ.)
14. *Zinchuk N. N.* Ob osnovnykh istochnikakh glinistyykh mineralov v mezozoyskikh kontinentalnykh almazonosnykh otlozheniyakh Zapadnoy Yakutii [On the main sources of clay minerals in the Mesozoic continental diamond-bearing deposits of Western Yakutia], *Geologiya i geofizika*, 1982, No. 8, pp. 81–90. (In Russ.)
15. *Zinchuk N. N.* Ob osobennostyakh sloistyykh silikatov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsiy [On the Features of Layered Silicates in Deposits of Various Sedimentary Formations], *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P. N. Chirvinskogo*, Is. 27, Perm, PGNU publ., 2024, pp. 32–49. (In Russ.)
16. *Zinchuk N. N.* Opyt litologo-mineralogicheskikh issledovaniy drevnykh osadochnykh tolshch v svyazi s almazopoiskovymi rabotami (na primere Sibirskoy platformy) [Experience of lithological and mineralogical studies of ancient sedimentary strata in connection with diamond prospecting operations (using the Siberian platform as an example)], *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya*, 2014, No. 1, pp. 13–19. (In Russ.)
17. *Zinchuk N. N.* Osobennosti gidrotermalnogo i giperennogo izmeneniya slyudistyykh kimberlitov [Features of hydrothermal and supergene alteration of mica kimberlites], *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2023, V. 22, No. 1, pp. 32–50. (In Russ.)
18. *Zinchuk N. N.* Osobennosti kaltsita iz kimberlitovykh porod [Features of calcite from kimberlite rocks], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2023, No. 2, pp. 28–43. (In Russ.)
19. *Zinchuk N. N.* Osobennosti magnetita iz kimberlitovykh porod [Features of magnetite from kimberlite rocks], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2024, No. 3, pp. 32–47. (In Russ.)
20. *Zinchuk N. N.* Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of mica minerals in kimberlites], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2018, No. 2, pp. 29–39. (In Russ.)
21. *Zinchuk N. N.* Osobennosti petrograficheskogo izucheniya kimberlitovykh porod [Features of petrographic study of kimberlite rocks], *Otechestvennaya geologiya*, 2022, No. 4, pp. 34–49. (In Russ.)
22. *Zinchuk N. N.* Osobennosti rasprostraneniya i genezisa nekotorykh karbonatnykh mineralov v kimberlitovykh porodakh (na primere Sibirskoy platformy) [Features of the distribution and genesis of some carbonate minerals in kimberlite rocks (using the Siberian platform as an example)], *Otechestvennaya geologiya*, 2023, No. 6, pp. 62–77. (In Russ.)
23. *Zinchuk N. N.* Osobennosti sostava i raspredeleniya slyudistyykh obrazovaniy v kimberlitovykh porodakh Yakutii [Features of the composition and distribution of mica formations in kimberlite rocks of Yakutia], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1991, No. 7, pp. 58–66. (In Russ.)
24. *Zinchuk N. N.* Osobennosti stroyeniya i sostava kory vyvetrivaniya na tufogennykh obrazovaniyakh v almazonosnykh regionakh Sibirskoy platformy [Features of the structure and composition of the weathering crust on tuffaceous formations in diamond-bearing regions of the Siberian platform], *Byulleten MOIP. Otdel geologicheskii*, 2015, V. 90, No. 4, pp. 42–52. (In Russ.)
25. *Zinchuk N. N.* Osobennosti sulfidov v kimberlitovykh porodakh [Features of sulfides in kimberlite rocks], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2023, No. 4, pp. 47–62. (In Russ.)
26. *Zinchuk N. N.* Rol petrologo-mineralogicheskikh i geokhimicheskikh issledovaniy v otsenke potentsialnoy almazonosnosti kimberlitov [The role of petrological-mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond content of kimberlites], *Otechestvennaya geologiya*, 2022, No. 1, pp. 36–47. (In Russ.)
27. *Zinchuk N. N.* Sulfaty v kimberlitovykh porodakh [Sulfates in kimberlite rocks], *Otechestvennaya geologiya*, 2023, No. 2, pp. 56–72. (In Russ.)
28. *Zinchuk N. N.* Tipomorfnyye svoystva indikatornykh mineralov kimberlitov i ikh ispolzovaniye pri prognozirovaniy mestorozhdeniy almaza na Sibirskoy platforme [Typomorphic properties of indicator minerals of kimberlites and their use in predicting diamond deposits on the Siberian platform], *Otechestvennaya geologiya*, 2021, No. 2, pp. 41–56. (In Russ.)
29. *Zinchuk N. N., Afanasyev V. P.* Geneticheskiye tipy i osnovnyye zakonomernosti formirovaniya almazonosnykh rossypey [Genetic types and basic patterns of formation of diamond-bearing placers], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1998, No. 2, pp. 66–71. (In Russ.)
30. *Zinchuk N. N., Boris Ye. I.* O kontsentratsii produktov pereotlozheniya kor vyvetrivaniya v verkhne-paleozoyskikh osadochnykh tolshchakh vostochnogo borta Tungusskoy sineklizy [On the concentration of products of redeposition of weathering crusts in the Upper Paleozoic sedimentary strata of the eastern side of the Tunguska syncline], *Geologiya i geofizika*, 1981, No. 8, pp. 22–29. (In Russ.)
31. *Zinchuk N. N., Zinchuk M. N., Kotelnikov D. D., Shlykov V. G., Zhukhlistov A. P.* Strukturno-kristallo-

- khimicheskiye preobrazovaniya sloistykh mineralov na raznykh stadiyakh gipergenogo izmeneniya kimberlitov [Structural and crystallochemical transformations of layered minerals at different stages of hypergene alteration of kimberlites], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 2002, No. 1, pp. 47–60. (In Russ.)
32. *Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D., Gorshkov A. I.* Identifikatsiya i genezis lizardit-saponitovogo smeshanosloynogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoy iz trubok Yuzhnoy Afriki [Identification and genesis of a lizardite-saponite mixed-layer formation in kimberlites of one of the pipes of South Africa], *Litologiya i poleznye iskopayemye*, 2003, No. 1, pp. 87–96. (In Russ.)
 33. *Zinchuk N. N., Kotelnikov D. D., Sokolov V. N.* Izmeneniye mineralnogo sostava i strukturnykh osobennostey kimberlitov Yakutii v protsesse vyvetrivaniya [Changes in the mineral composition and structural features of Yakutia kimberlites during weathering], *Geologiya i geofizika*, 1982, No. 2, pp. 42–53. (In Russ.)
 34. *Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N.* Ob anomalii obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhenii sodержashchikh ikh otlozheniy v stratisferu [On the anomaly of the general scheme of transformation of swelling clay minerals during the immersion of sediments containing them into the stratisphere], *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Seriya geologiya*, 2003, No. 2, pp. 57–68. (In Russ.)
 35. *Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N.* Tipomorfnyye osobennosti i paleogeograficheskoye znachenie slyudistykh mineralov [Typomorphic features and paleogeographical significance of mica minerals], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1996, No. 1, pp. 53–61. (In Russ.)
 36. *Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N.* Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoy kory [Conditions for the accumulation and post-sedimentation transformation of clay minerals in the sedimentary cover of the earth's crust], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2001, No. 12, pp. 45–51. (In Russ.)
 37. *Kotelnikov D. D., Zinchuk N. N.* Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsiy [Features of clay minerals in deposits of various sedimentary formations], *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1997, No. 2, pp. 53–63. (In Russ.)
 38. *Kharkiv A. D., Zuyenko 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.)
 39. *Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Volcanism of the Siberian Platform, *Petrology*, 2001, V. 9, No. 6, pp. 576–588.
 40. *Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I., Zinchuk N. N., Krasavchikov V. O.* Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry, *Jornal of Geochemical Exploration*, 2002, V. 76, No. 2, pp. 93–112.

Статья поступила в редакцию 05.08.24; одобрена после рецензирования 20.11.24; принята к публикации 20.11.24.
The article was submitted 05.08.24; approved after reviewing 20.11.24; accepted for publication 20.11.24.