

Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород

На основании анализа конкретного фактического и аналитического материала показаны возможности и перспективы петрографических исследований кимберлитовых пород, являющихся вулканическими изверженными, недосыщенными кремнезёмом, богатыми летучими компонентами ультраосновных гибридных образований с повышенной щёлочностью, содержащих мантийный и коровый материал в варьирующих количествах и соотношениях. Мантийный материал в кимберлитах представлен ксенолитами ультраосновных, щелочно-ультраосновных, основных пород и ксенозёрнами минералов из них.

Ключевые слова: петрография, петрология, кимберлиты, глубинные ксенолиты, мантийные разрезы, Сибирская платформа.

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 petrographic study of kimberlite

N. N. ZINCHUK

West Yakutsk Scientific Center (WYSC) of the Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia), Mirny

Based on the analysis of specific actual and analytical material capabilities and perspectives of petrographic and petrological investigations of kimberlite rocks are indicated. Kimberlite is a volcanic igneous rock, undersaturated by silica, enriched in volatiles of peralkaline ultramafic hybrid formations, containing mantle and crust material in varying quantities and ratios. Mantle material in kimberlite is represented by xenoliths of ultramafic, alkali-rich mafic-ultramafic rocks and xeno-minerals from them.

Key words: petrography, petrology, kimberlite, deep xenoliths, mantle sections, Siberian platform.

Алмаз – полигенный минерал, образующийся не только в условиях земных недр, но и при сверхскоростном соударении космических тел с Землёй. В настоящее время в мире известны три основных геолого-генетических типа коренных месторождений алмаза: магматический (кимберлитовый и лампроитовый), метаморфогенный и импактный. Из них главным коренным типом являются кимберлиты [1–8, 10, 11, 14, 16, 18, 23–28], установленные на всех древних платформах Земли, из которых добываются около 80% природного алмазного сырья. Несмотря на широкое распространение кимберлитов (только на Сибирской (СП), Африканской (ЮАП) и Северо-Американской (САП) платформах их больше 2500 проявлений) и наличие в десятой части из них признаков алмазоносности, промышленное значение имеют (то есть являются месторождениями) менее 3% тел [11, 13, 15, 19–22]. По запасам алмазов и размерам месторождения разделяются на уникальные, крупные, средние и мелкие, а по содержаниям – на

уникально-, высоко-, средне- и низкоалмазоносные. Естественно, наиболее рентабельной является обработка верхних горизонтов выходящих на дневную поверхность уникальных и крупных месторождений. Коренные месторождения алмазов, связанные с кимберлитовыми трубками взрыва (диатремами), успешно эксплуатируются около 150 лет. Из них и связанных с ними россыпей за всю историю добычи извлечено более 700 т алмазов. Большинство исследователей признало, что алмаз из кимберлитов кристаллизовался на большой глубине (порядка 150–200 км) в мантии Земли в области его стабильности ($P > 45$ ГПа, $T = 950–1400$ °С) намного раньше образования диатрем, то есть алмаз в кимберлитах – ксеногенный минерал. Его источником являются дезинтегрированные мантийные породы – перидотиты и эклогиты, фрагменты которых вынесены кимберлитовой магмой в верхние слои литосферы [9, 12, 28–36]. Форма залегания алмазоносных кимберлитов – трубки и дайки, реже отмечаются силлы.

Характерными особенностями кимберлитовых проявлений являются групповое расположение тел и приуроченность промышленно алмазоносных тел к участкам древних платформ с кратонным основанием [11, 17, 27]. Несмотря на длительный период системного изучения кимберлитов, многие аспекты геологии, генезиса и состава этих пород остаются недостаточно изученными или дискуссионными.

Ведущие зарубежные исследователи [36–41 и др.] предлагают использовать генетические термины не при первичном описании кимберлитов, а добавлять их уже при дальнейших детальных изучениях пород (эксплозивные процессы, флюидизация, брекчирование и др.). Сравнивая зарубежные и отечественные геологические построения и классификации, следует отметить, что первые обычно отличаются более сложным описанием разных зон и фаций, в отличие от отечественных, где исследователи выделяют только интрузивные (дайки и штоки) и эксплозивные (трубки) кимберлиты. Последние обычно делятся на массивные и автолитовые брекчии. Традиционная (африканская) модель кимберлитовой трубки представляет собой [37–39] диатрему, состоящую из глубокой корневой зоны, средней диатремовой и верхней (если она сохранилась) кратерной зон. Сами кимберлиты здесь обычно делятся на три фации по глубинности: гипабиссальные (массивные, макрокристалльные и афировые разности), кратерные породы (лавовые, пирокластические) и переложенные кимберлиты. Причина такого разделения кимберлитов на глубине в ЮАП многие исследователи связывают с морфологией и особенностями заполнения трубчатых тел. На СП перечисленные текстурно-структурные типы кимберлитов могут встречаться (или отсутствовать) на разных глубинах и фациях. Так, например, порфиновый кимберлит (ПК) может встречаться как в дотрубочных жилах или дайках во вмещающих породах, так и на более поздних стадиях в пределах диатремовой фации.

Кимберлиты представляют собой вулканические изверженные, недосыщенные кремнезёмом, богатые летучими компонентами ультраосновные гибридные породы с повышенной щёлочностью, содержащие мантийный и коровый материал в варьирующих количествах и соотношениях [2–4, 12, 13, 15, 17, 19]. Основной формой проявления кимберлитов являются воронкообразные брекчиевые диатремы (трубки взрыва), верхние части которых венчаются кратерными постройками; на глубине (от 1000 до 2500 м от поверхности) эти тела переходят в дайки. Сохранность кратерных частей зависит от величины «пост-кимберлитового» эрозионного среза территории, а корневые части вскрыты только в отдельных трубках

в силу большой глубины залегания и небольшой мощности даек (жил). Как наблюдается практически во всех провинциях, кимберлиты пространственно локализованы в пределах архейских и архейско-нижнепротерозойских ядер-кратонов, обладающих консолидированной корой, мощной и относительно жёсткой литосферой и низкоградиентными тепловыми потоками. В пределах таких площадей положение проявлений контролируется коровыми структурами, многие кимберлитовые поля связаны с разноранговыми дизъюнктивными нарушениями и структурными зонами. Мантийный материал представлен ксенолитами ультраосновных, щёлочно-ультраосновных и основных пород и ксенозёрнами минералов из них – алмазом, гранатом–пиропом, пикроильменитом, хромшпинелидом, оливином, клинопироксеном, ортопироксеном, флогопитом, редко цирконом, апатитом и титаноклиногумитом. Перечисленные минералы устойчивы в широком диапазоне *PT*-условий: от стабильной кристаллизации алмаза до метастабильного состояния пироба. Расплавленный мантийный материал раскристаллизован в условиях земной коры в виде мезостаза, в состав которого входят выделения минералов второй генерации – оливин II, хромшпинелид II, ильменит II, флогопит II, а также монтичеллит, клинопироксен, рутил, перовскит и кальцит. Коровой составляющей кимберлитов является: а) ксеногенный материал пород, вмещающих кимберлиты; б) материал, перенесённый в кимберлиты из окружающей среды постмагматическими растворами. С минералогической точки зрения кимберлиты отвечают порфировым щелочным перидотитам [4, 13], содержащим избыточный фенокристовый оливин (обычно замещённый серпентином или карбонатом) и флогопит в мелкозернистой основной массе, сложенной кальцитом, оливином (псевдоморфозами по нему) и флогопитом, иногда другими минералами. Особенно представительный материал получен в последнее тридцатилетие в связи с детальной разведкой и обработкой ряда важнейших коренных месторождений алмазов. В этот же период изучение вещественного состава кимберлитовых пород перешло от «стандартного» петрографо-минералогического и петрохимического изучения на новый качественный уровень в связи с появлением новых прецизионных методов исследования вещества (микрорентгено-спектральный, высокоразрешающие электронная микроскопия и рентгенография, изотопия, оптико-спектроскопический и рентген-флуоресцентный анализы, ИК-спектроскопия и др.). Заметным вкладом в изучение минерального состава кимберлитов региона стало внедрение в практику регулярных лабораторно-аналитических работ рентгенофазового анализа [9, 15, 25, 29, 30, 32, 33],

использование которого в течение 30 лет позволяет вести успешную диагностику всего многообразия вторичных минералов, составляющих более 90 % объёма пород. Исследования приобрели более разносторонний и углублённый характер, что, заметно повысило интерес к изучению коренных источников алмазов. Открытие трубок Накынского кимберлитового поля (НКП) на СП, проявивших признаки аномальности в минералого-геохимическом отношении, разведка глубоких горизонтов коренных месторождений алмазов и эксплуатация ряда уникальных диатрем обусловили появление большого массива разнообразных первичных данных, которые были получены и проанализированы в рамках проводимых тематических исследовательских работ.

Диатремы кимберлитов характеризуются обычно специфическими физико-механическими [8, 11], петрофизическими свойствами, многофазным строением с распространением пород не менее двух фаз внедрения: первой – гипабиссальной, представленной порфиrowыми кимберлитами (ПК), и второй – вулканической, сложенной разнообразными кимберлитовыми брекчиями (КБ), различающимися по алмазонности. Важное значение имеет выявление различий между фазами внедрения по составу минералов основной массы и минералов-спутников алмаза (пироба, хромшпинелидов, пикроильменита), глубинных ксенолитов и петрогенных оксидов (SiO_2 , TiO_2 , FeO , MgO , CaO , K_2O , Cr_2O_3). Актуальной составной частью научных исследований коренных месторождений алмазов является изучение парагенезисов индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) и ксенолитов мантийных пород, а также широкого спектра вторичных минералов, количество которых составляет семь десятков, что в итоге способствует решению ряда теоретических и практических вопросов. К главным особенностям кимберлитовых диатрем относятся: отсутствие больших объёмов вытесненных пород и плутонических комплексов; специфика петрографо-минералогических и петрогеохимических признаков (относительно других ультраосновных пород); преимущественно морковкообразная форма (форма перевёрнутого конуса); спектр вулканических образований, характеризующих трёхфазный разрез (кратер, диатрему и корневую гипабиссальную зону) и отличающихся между собой; насыщенность летучими при высокой доле CO_2 ; относительно низкотемпературный характер доминирующей части кимберлитовых минералов; присутствие слабораскристаллизованных участков и другие признаки быстрого внедрения; наличие ксенолитов мантийных, коровых и вмещающих пород, при наиболее угловатой форме последних; присутствие алмазов; примеры перехода диатрем в дайки;

признаки взрывного генезиса; наличие до-, син- и посттрубочных даек; отсутствие термометаморфизма; широкие качественно-количественные вариации минерального состава между сообществами тел и отдельно взятыми проявлениями.

Петрографическая классификация кимберлитов была и остаётся одним из наиболее дискуссионных разделов в проблеме изучения этих своеобразных пород. Не ставя своей целью проводить в данной работе критический анализ этого направления, следует всё же отметить, что основным недостатком существующих принципов классификации, по нашему мнению, является использование генетического подхода во многих из них, что само по себе включает много спорных элементов с учётом различной трактовки происхождения. Наиболее аргументированными с петрографических позиций и приемлемыми для отечественных коренных алмазных месторождений являются классификации кимберлитов, разработанные отечественными учёными [6, 12, 24 и др.]. К общепризнанным позициям следует отнести выделение основных текстурных типов пород – массивных (порфиrowых) и брекчиевых или брекчированных (эруптивные брекчии) кимберлитов.

В порфиrowых кимберлитах гипабиссальной или субвулканической фации (рис. 1, А–Г) порфиrowое строение определяется вкрапленниками оливина или псевдоморфозами по ним, а основной массой служит микрозернистая или скрытокристаллическая серпентин-карбонатная смесь с микролитами оливина, монтичеллита, перовскита, флогопита, апатита, ильменита и магнетита, при обычном присутствии акцессорных вкрапленников пиропов, хромитов, пикроильменитов и пироксенов. В основу выделения структурных разновидностей этого типа кимберлитов положены особенности строения (форма, величина, содержание, характер распределения породообразующих вкрапленников) и количественные соотношения микролитов и серпентин-карбонатных образований в основной массе. Примечательно выделение двух (а иногда и трёх) генераций оливина и флогопита, а в основной массе пород фиксируется варьирующее количество мелких (до пылевидных) выделений магнетита, кристалликов перовскита, апатита, вторичной слюды, кальцита и сульфидов. Для разделения породообразующих минералов-вкрапленников по стадиям (генерациям) кристаллизации используются размеры и морфологические особенности: собственно кимберлитовому этапу кристаллизации отвечают относительно мелкие (до 1–2 мм) кристаллы второй генерации с отчётливо выраженной кристаллографической огранкой, а первая (протокимберлитовая) генерация представлена обломочными выделениями крупнее указанных размеров.

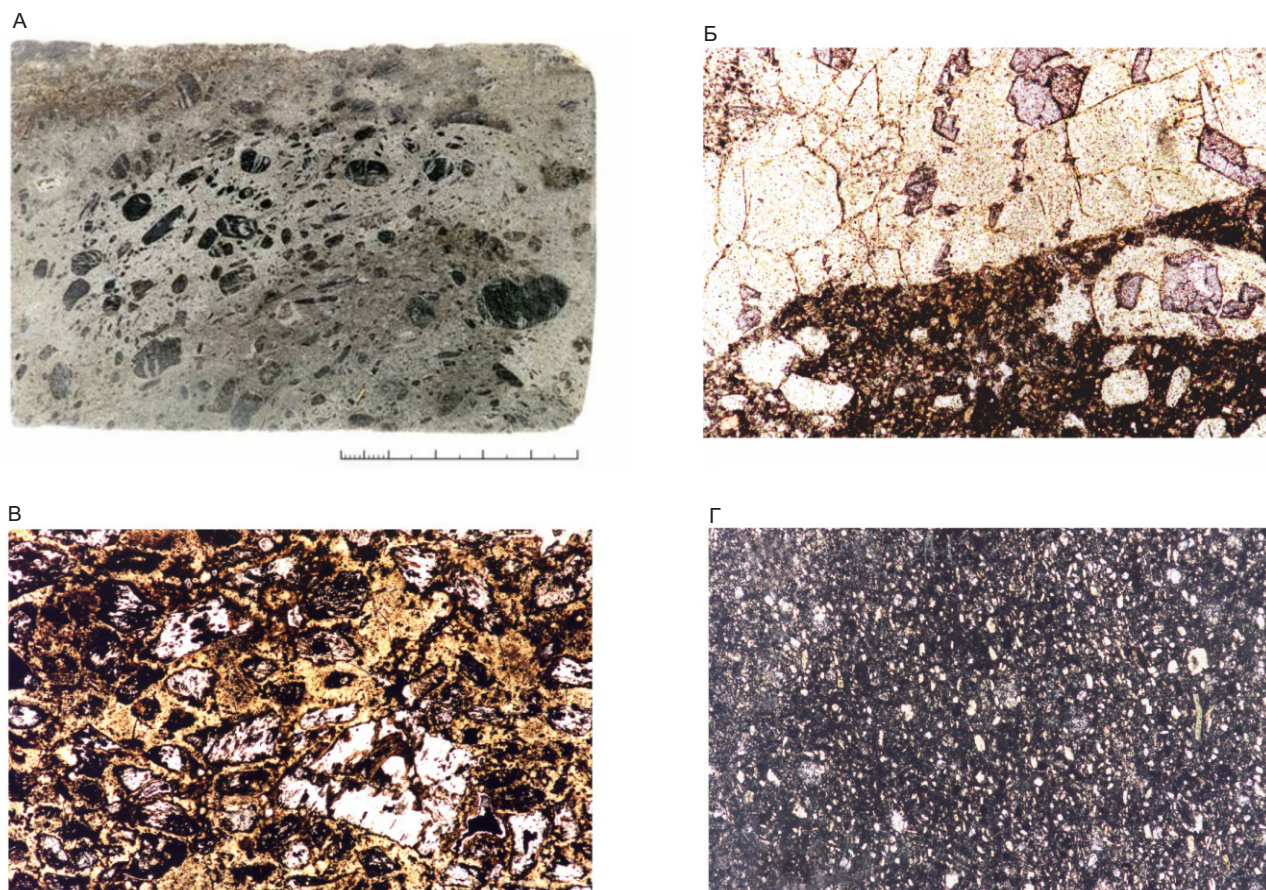


Рис. 1. Крупно- (А и Б), средне- (В) и микропорфировый (Г) кимберлит:

А – кимберлитовая дайка трубки Нюрбинская, штуф 4/150; Б – кимберлитовая дайка трубки Нюрбинская, шлиф 4/150, ув. $\times 25$, николи П; В – западный штрек трубки Юбилейная, шлиф 3/154, ув. $\times 25$, без анализатора; Г – кимберлитовая дайка трубки Ботубинская, шлиф 24/8-399, ув. $\times 25$, николи П

Необходимо отметить, что ПК свойственно относительно равномерное распределение минералов-вкрапленников, а также рудных минералов и перовскита на фоне карбонат-серпентиновой основной массы. Иногда в дайках или в корневых зонах диаметром проявляется сегрегационная структура (шаровидные сегрегационные кимберлиты корневых зон), которая описана в литературе [5, 11, 24, 34–35, 39, 41] при характеристике вскрытых шахтами корневых зон кимберлитовых трубок (Премьер и др.). В этих породах кристаллизация силикатов и оксидов происходила как сегрегация различных по величине капель, что могло происходить в гипабиссальной среде.

Проявление брекчиевой текстуры и наличие заметного (более 7–10 об. %) количества обломков пород рамы (чехла и фундамента) и макрокристов мантийных минералов служит признаком эруптивно-обломочных пород и является основанием для вы-

деления *эруптивных кимберлитовых брекчий* (ЭКБ) или просто КБ (брекчий с массивной текстурой цемента). Наличие в последних макро- или микровключений «кимберлит в кимберлите» (автолитов) позволяет выделять группу *автолитовых кимберлитовых брекчий* (АКБ) (рис. 2, А–В). Кроме автолитов, примечательны спорадически встречающиеся такситовые текстурные неоднородности в кимберлитах (атакситы и эвтакситы), которые могли возникнуть [10, 21] в расплаве вследствие неравномерного распределения в нём воды. Следовательно, в порфировых кимберлитах неоднородного строения можно наблюдать эвтакситовую и атакситовую текстуры (см. рис. 2, Г и рис. 3, А), а среди ЭКБ, наряду с автолитовой, можно выделить атакситовую (см. рис. 3, Б) и эвтакситовую (см. рис. 3, В, Г) текстурные разновидности. В отдельных диатремах СП диагностирован также в незначительном количестве [21, 23–25,

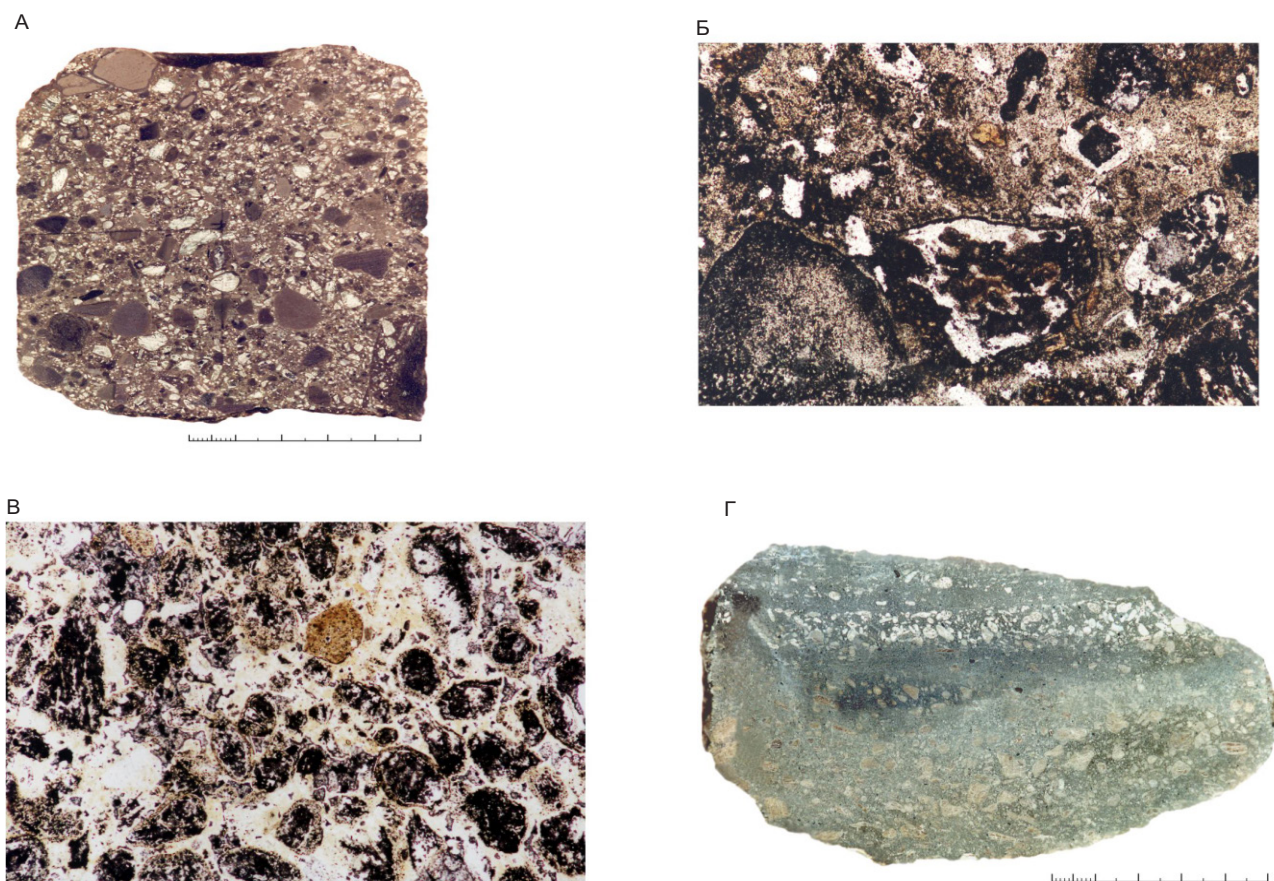


Рис. 2. Автолитовая (А и Б) и мелкообломочная автолитовая (В) кимберлитовая брекчия, а также эвтакситовый порфировый кимберлит (Г):

А – трубка Ботуобинская, штупф 12/2-159; Б – трубка Ботуобинская, шлиф 12/2-159, ув. $\times 25$, николи П; В – восточный штрек трубки Краснопресненская, шлиф В-130/2, ув. $\times 25$, николи П; Г – квершлаг дайки Ботуобинская, штупф ПКВ 1-118

32, 35] монтичеллитовый кимберлит (рис. 4, А–В). По размеру обломков кимберлитовые брекчии разделяются на крупно-, средне- и мелкообломочные, а по характеру кимберлита-цемента выделяются порфировая, кластопорфировая, автолитовая (или лавокластическая) и литокристаллокластическая (лавокристаллокластическая) структуры. Упомянутые выше петрографические типы кимберлитов двух фациальных групп являются общепризнанными. Они лежат в основе геолого-технологической типизации разведываемых блоков месторождений и особых возражений, кроме применения или неприменения вулканологической терминологии, не вызывают. Гораздо больше дискуссионных вопросов связано с диагностикой и классификацией кимберлитовых пород кратерной части (трубки Юбилейная, Краснопресненская, имени Одинцова на СП). Примечательно, что выделение самих кратеров как морфологических элементов признаётся как

несомненный факт, а наименование заполняющих кратеры отмеченных трубок пород нашло несколько вариантов, среди которых основными являются флюидизаты [21, 28]. К кратерным образованиям целесообразно применять терминологию и классификацию вулканических пород [5–7] с выделением взрывно-обломочной, осадочно-вулканокластической, вулканогенно-осадочной и осадочно-кластической групп пород.

Правомочность этого была подтверждена при изучении кимберлитовых диатрем северо-востока Анголы [11, 21, 25]. Группа взрывно-обломочных пород представлена: а) *туфами и туфобрекчиями*, состоящими из кластического материала кимберлитов без существенных примесей (см. рис. 4, Г); б) *ксенотуфами и ксенотуфобрекчиями*, содержащими примесь обломков чуждых пород разной размерности в количестве менее 50%. Туфобрекчии – брекчиевые кимберлитовые породы, образованные

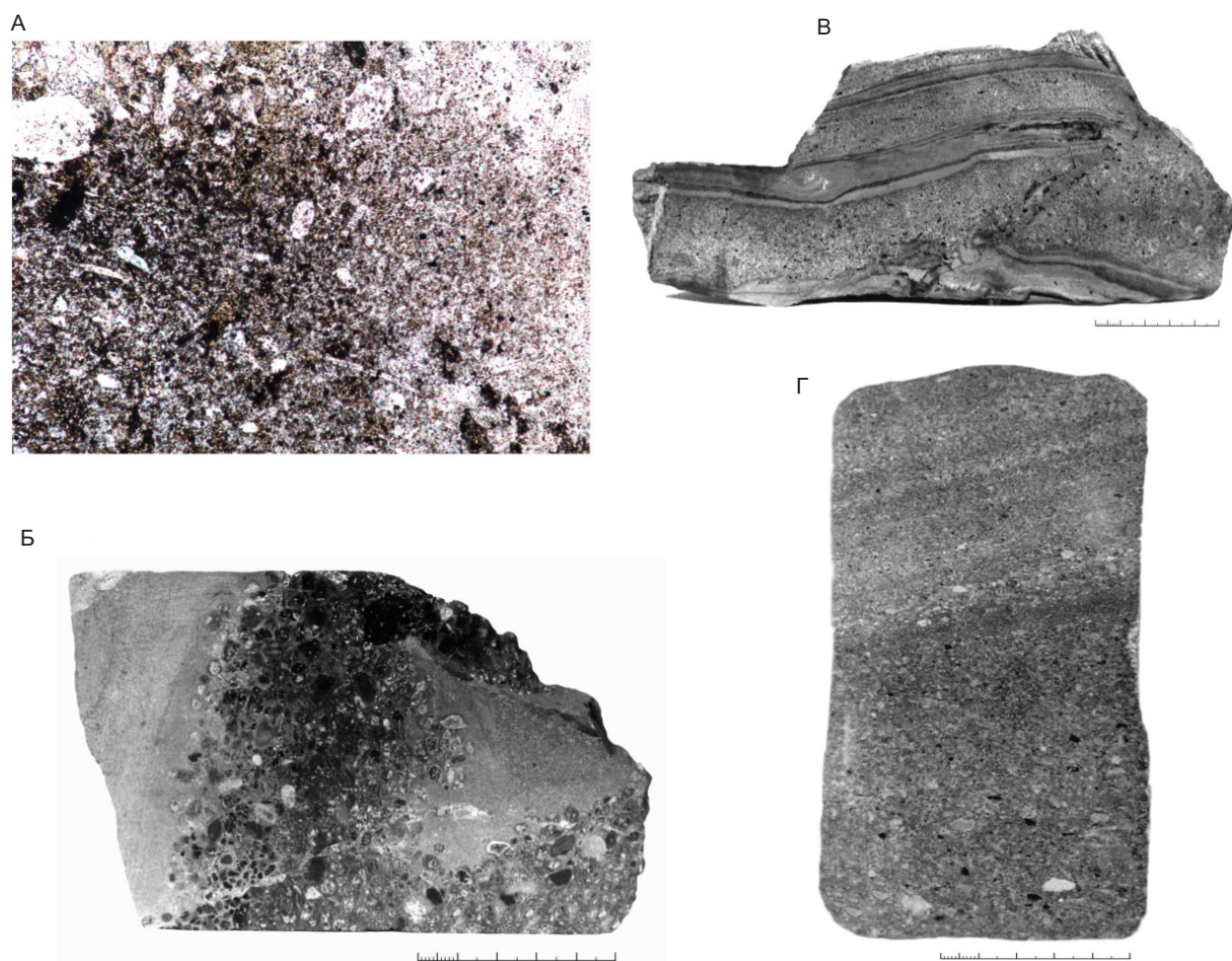


Рис. 3. Атакситовый кимберлит (А), атакситовая автолитовая кимберлитовая брекчия (Б), эвтакситовая автолитовая кимберлитовая брекчия (В и Г):

А – трубка Юбилейная, шлиф 235/120, ув. $\times 25$, николи П; Б – трубка Юбилейная, штупф 11/118,5; В – западный штрек трубки Юбилейная, штупф 3/154; Г – трубка Краснопресненская, штупф 21/180

в результате уплотнения и цементации неотсортированного грубообломочного рыхлого угловатого или слабоокатанного вулканокластического материала, погружённого в более мелкозернистый туфовый цемент. Туфы образуются из твёрдых продуктов кимберлитовых извержений и фрагментов вмещающей среды, впоследствии уплотнённых и сцементированных. Породы разделяются по размеру доминирующих обломков на: грубообломочные (агломератовые), крупнообломочные (псефитовые), среднеобломочные (псаммитовые), тонкообломочные (алевритовые), а по характеру обломков – на литокластические (из обломков пород), кристаллокластические (из кристаллов и их обломков), встречающиеся редко, и смешанные кристаллолитокластические, наиболее распространённые. Диагностика и, как следствие, выделе-

ние кимберлитовых туфов (и туффизитов) не всегда просты – наиболее надёжным признаком их распознавания являются наличие горизонтальной слоистости и геологическое положение. Туфы обычно имеют ограниченное распространение, но в слабоэродированных полях, характерных для провинции Лунда Норте в северо-восточной части Анголы, они входят в виде отдельных слоёв в состав горизонтально залегающих вулканогенно-осадочных толщ кимберлитового состава или фрагментов туфовых воротников по обрамлению кратеров, и, по нашему мнению, их принадлежность к кимберлитовым туфам несомненна. В ряде случаев, при наблюдении резких контактов с другими породами, их правильней было бы назвать *туффизитами* – интрузивными туфами. Иногда интенсивная гидротермальная цементация

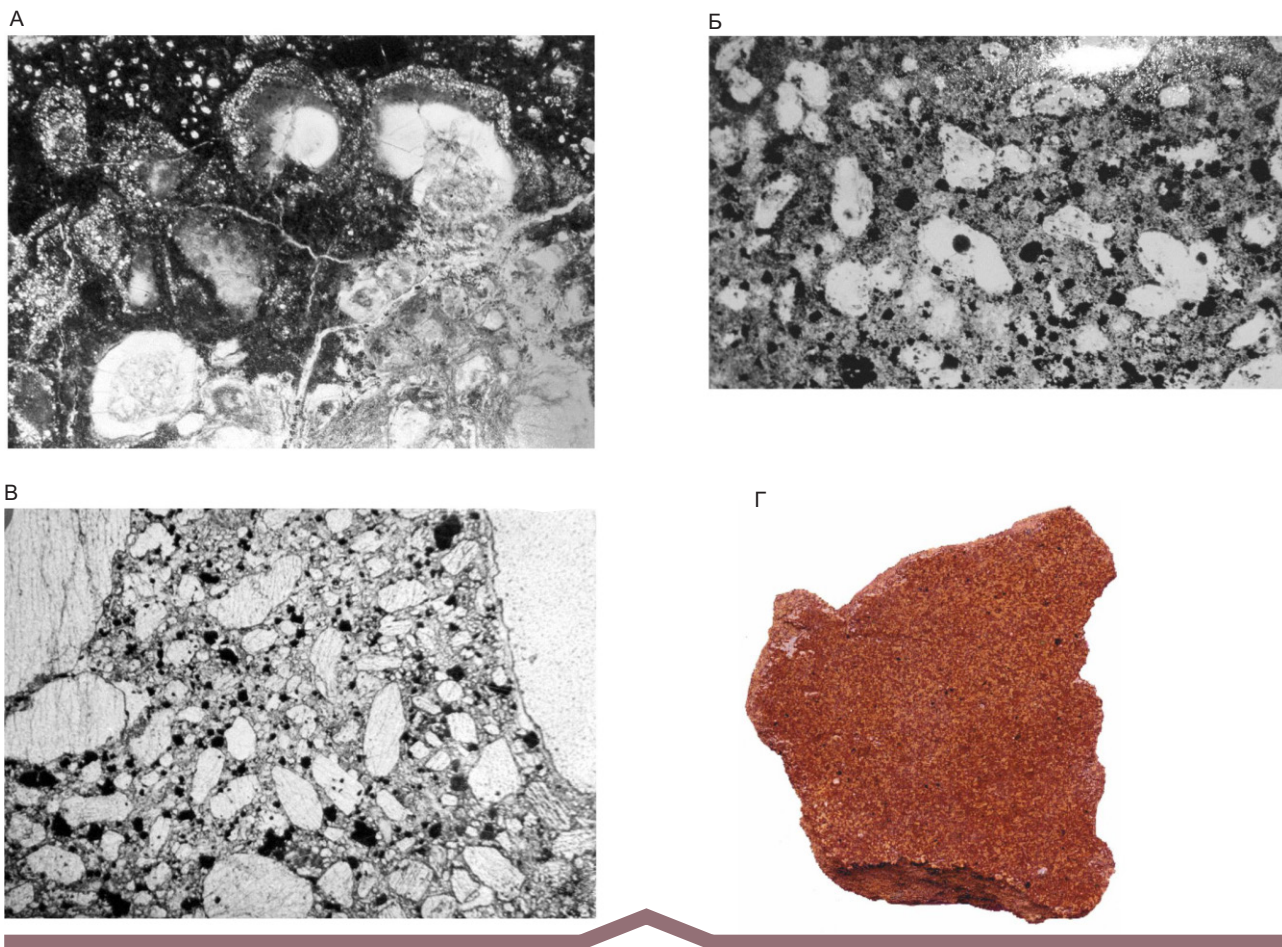


Рис. 4. Монтцеллитовый кимберлит (А–В) и псефито-псаммитовый кимберлитовый туффит (Г):

А – трубка Дальная, шлиф 1/15, ув. $\times 30$, николи П; Б – трубка Новинка, шлиф Н-125, ув. $\times 30$, николи П; В – трубка Удачная, шлиф У/99, ув. $\times 30$, николи П; Г – трубка Камитонго 1 (Ангола), штүф 1/4

пород придаёт породам облик кимберлитовых брекчий и на принадлежность к туфам могут указывать слоистые текстуры и хлорит-гидрослюдистый характер цемента. В отдельных образцах explosивно-обломочных пород, в отличие от автолитов, содержащих то или иное количество фенокристаллов и микролитов оливина и флогопита, отмечаются округлые кимберлитовые включения афировых и спорадофировых кимберлитов с серпентин-карбонатным базисом, которые схожи с бомбами и лапиллями (гипобомбами), так как состоят в основном из аповитрофирового материала. Подобные породы отмечены в разрезах верхних частей трубок Анголы и отнесены к кимберлитовым туфобрекчиям. При нахождении данной разновидности кимберлитов в диаметровой фации или в составе пластических инъекционных даек их следует относить к туффизитам. Здесь следует согласиться с имеющимися мнениями [6], что данные породы образовались в процессе

взрывов магмы в подводщем канале ниже дневной поверхности. Очевидно, что такие разновидности являются полигенными. Осадочно-вулканокластические породы наименее распространены в кимберлитовых постройках и представлены туффитами. Последние наряду с выброшенным при извержении пирокластическим кимберлитовым материалом, в отличие от ксенотуфов и ксенотуфобрекчий, содержат [7, 24] примесь не гетерогенных обломков, а только осадочных (вмещающих) пород в количестве менее 50% (пирокластического материала 50–90%). Эта разновидность кимберлитовых пород по текстурно-структурным и другим особенностям ничем не отличается от туффитов других вулканических формаций: по размеру пирокластического материала выделяются псефитовые, псаммитовые, алевритовые и пелитовые разновидности. Цемент может быть карбонатным, монтмориллонитовым, хлоритовым, хлорит-гидрослюдистым и др.

В группу вулканогенно-осадочных пород входят вулканокласто-осадочные, тефроидные и вулканотерригенные образования с содержанием осадочного материала более 50%. Из этих трёх типов среди кимберлитовых пород пока реально можно выделить только вулканокласто-осадочные, в которых кимберлитовый материал (40–20% и менее) присутствует в виде обломков брекчий, автолитов, зёрен минералов-спутников и др., а также труднодиагностируемые вулканотерригенные породы. Среди первых по размерам и характеру обломочного материала выделяются туфоконгломераты, туфогравелиты, туфопесчаники, туфоалевролиты. Вулканотерригенные породы состоят из окатанных и отсортированных обломков вулканических пород, образующихся за счёт разрушения вулканитов. Они не синхронны извержению и накапливаются после нивелировки вулканической постройки при разрушении вулканических пород жерла (кратера) или тефроидов, с их перекрытием. Тефроидные породы кимберлитовой природы пока не обнаружены, но они предусмотрены в классификации, так как их выбросы, сцементированные гидрохимическим веществом, могут служить прототипом кимберлитовых туфов и туфобрекчий, сохранившихся в отрицательных формах рельефа на различном расстоянии от диатрем. Вулканотерригенные породы, по существу, являются одной из генетических разновидностей россыпей ближнего сноса с характерными для них признаками. Среди таковых особое значение имеет прямая и обратная микроцикличность, где наиболее продуктивными будут грубообломочные образования в первом случае. В связи с очень быстрой дезинтеграцией кимберлитов в экзогенных условиях и обычной эродированностью наземных и верхних частей кимберлитовых вулканов в большинстве известных кимберлитовых провинций вулканотерригенные отложения перемыты или подвергнуты глубоким изменениям в КВ и поэтому трудно распознаваемы. Представляется целесообразным к этой группе пород относить и туфобрекчии со слоистыми текстурами. Последнюю группу (осадочно-кластических образований) представляют синхронные и несинхронные вулканизму образования, сформировавшиеся преимущественно после предыдущих пяти групп и включают спектр разнофациальных осадочных отложений с различной гранулометрией частиц. Большинство из них выделяются под названием «эпикластические отложения», которые включают спектр осадочных образований с содержанием кимберлитового материала менее 1–2% (например, песчаники с примесью кимберлитового материала), гетеролитовые брекчии с содержанием кимберлитового материала менее 1–2%, состоящие из обломков пород

геологического разреза района. Следует отметить также типизацию на основании роли слюды, по количеству которой кимберлитовые породы разделяются на два минералогических типа: базальтоидный и слюдяной (лампрофировый) с последующим выделением в каждом типе отмеченных выше текстурных разновидностей – массивных (порфировых) кимберлитов, КБ, туфов и туфобрекчий. Указанным двум типам кимберлитов отвечают, в принципе, две группы кимберлитов, выделяемых на ЮАП – I и II соответственно. Анализируя распределение отмеченного спектра кимберлитовых пород в объёме диатрем СП можно констатировать, что пирокластические кимберлитовые туфы и туфобрекчии слагают верхние части кратеров, образуя тела мощностью от 30–35 (трубка Одинцова) до 230–250 м (трубка Юбилейная). В последнем случае толща пирокластических образований была нарушена более поздней фазой внедрения автолитовой кимберлитовой брекчии. Эпикластический туфогенный кимберлитовый материал достоверно установлен в кровле кратера трубки Краснопресненская в виде прослоев и линз в терригенных породах тегерюкской свиты нижнего карбона.

В промышленных месторождениях алмазов автолитовая кимберлитовая брекчия характеризуется наибольшей продуктивностью (трубки Мир, Интернациональная, Ботубинская, Нюрбинская, Айхал, Юбилейная, Удачная и др.) по сравнению с порфировыми кимберлитами гипабиссальной фазы, а в средне- и низкоалмазоносных трубках наблюдается обратная закономерность (трубки Заполярная, Комсомольская–Магнитная, Дальняя, Искорка и др.). По характеру взаимоотношений субвулканической (гипабиссальной) и вулканической фаз заполнения диатрем в пределах кимберлитовых полей СП можно выделить три группы трубок: 1) кимберлитовые тела, где ПК субвулканической фазы образуют самостоятельные рудные столбы, при примерных объёмных соотношениях с автолитовой КБ вулканической фазы 1:1 (трубки Заполярная, Байтахская и др.), 1:2 (Дальняя, Сытыканская, Молодость и др.), 1:4 (Юбилейная, Ботубинская, Удачная), 1:10 (Комсомольская, Геофизическая и др.); 2) трубки, в которых порфировый кимберлит присутствует в АКБ в виде многочисленных обломков и отдельных крупных (десятки метров) блоков, не образуя рудных столбов (трубки Краснопресненская, Кылахская, Восток, Мир, Нюрбинская и др.), а объёмная доля порфирового кимберлита относительно автолитовой кимберлитовой брекчии варьирует от 1:30 до 1:100; 3) кимберлитовые тела, где ПК присутствуют в КБ в виде многочисленных мелких обломков (трубки им. 325 лет Якутии, Мархинская, Заря, Маршрутная, Ленинградская,

Зарница, Якутская, Долгожданная и др.). Промышленные содержания алмазов фиксируются в трубках первой и второй групп, а третья группа представляет низкоалмазоносные кимберлитовые трубки. Необходимо отметить важность оптико-микроскопического изучения основной массы кимберлитовых пород, что позволяет детализировать минералогические особенности и показатели эволюции выделяемых типов и разновидностей кимберлитов. В процессе таких исследований выделены монтичеллитсодержащие кимберлиты (см. фото 4, А–В) центральных районов провинции (трубки Удачная Восточная, Дальняя, трубки Верхне-Мунского поля и др.), которые являются алмазоносными, в том числе промышленно значимыми. Монтичеллит – характерный минерал для многих среднепалеозойских кимберлитовых тел СП, и его распространённость в них, прежде всего, определяется степенью вторичного преобразования пород. Монтичеллиты из кимберлитовых тел северных и южных полей широко перекрываются по составу. С другой стороны, в пределах одной сложностроенной диатремы (например, Удачная-Восточная) монтичеллиты в кимберлитах отдельных фаз внедрения могут резко отличаться по геохимии микроэлементов и составу. Высокомагнезиальные монтичеллиты ($Mg/(Mg + Fe) = 92–97\%$) из кимберлитов (трубки Дальняя, Новинка и др.) имеют метасоматический генезис. Среди достаточно широкого спектра кимберлитовых и комагматических им пород СП слюдяные кимберлиты с диопсидом в основной массе встречаются реже, чем монтичеллитовые разновидности пород. Отдельные тела, сложенные подобными породами, наиболее распространены в северной части СП, а в южной части подобные образования встречаются в виде отдельных обломков в диатремах (Удачная, Сытыканская, Юбилейная, Таёжная) и слагают небольшие по размеру трубки или отдельные фазы в них (трубки Загадочная, Буковинская).

Типизация кимберлитов промышленно алмазоносных полей по *петрографо-минералогическим признакам* с выделением монтичеллитовых и диопсид-флогопит-оливиновых разновидностей позволила проследить в общем виде эволюцию родоначальных кимберлитовых расплавов от периода, предшествовавшего образованию диатрем, до заключительного этапа, связанного с образованием внутритрубочных жил и инъекций. На начальном субвулканическом этапе формирования южных кимберлитовых полей происходило внедрение даек, затем штоков, реже образование отдельных трубочных тел, выполненных породами, которые мы обычно наблюдаем в виде обломков слюдяных кимберлитов. Исходя из состава этих кимберлитов и минералов, их слагающих, видно, что первые порции расплава

были обогащены [4, 16, 25, 32] кремнием, титаном, алюминием, щелочами, железом и обеднены магнием. В соответствии с этим образованные породы по ряду особенностей (в частности, присутствию в них высокотитанистых флогопитов и титанистых диопсидов) конвергентны лампрофирам или оливиновым лампроитам. Присутствие в расплаве достаточного количества щелочей, воды и кремнезёма способствовало массовой кристаллизации флогопита, в результате чего кристаллизующиеся на заключительных стадиях рудные минералы обеднены алюминием, содержание глинозёма в них не превышает 0,6%. Дальнейшая эволюция расплава связана с накоплением летучих и кальция и формированием кимберлитов дотрубочных жил, штоков и разновидностей кимберлитовых брекчий. Крупнейшая трубка СП – Юбилейная – является уникальным кимберлитовым телом и в геологическом отношении она характеризуется полным набором морфологических элементов – подводящей дайковой корневой системой, диатремой и кратерным чашеобразным расширением. В пределах её восточной части выделены три самостоятельные фазы внедрения кимберлитов (крупнопорфировый, дейтеропорфировый кимберлит и брекчия расщепления), отличающиеся между собой по текстурно-структурным, минералого-геохимическим признакам и алмазоносности. По контактовым взаимоотношениям между выделенными фазами кимберлитов установлена их последовательность формирования. На начальном субвулканическом этапе, предшествующем образованию трубки, происходило внедрение дайковых кимберлитовых тел, сложенных слюдяным крупнопорфировым кимберлитом, конвергентным по ряду вещественных признаков лампрофирам или оливиновым лампроитам. Дальнейшая эволюция кимберлитового расплава, связанная с процессами фракционной кристаллизации, флюидно-магматической дифференциации, а также захватом расплавом коровых и осадочных пород, привела к образованию различных брекчиевых кимберлитовых пород.

Выявлено своеобразие вещественного состава кимберлитов трубки Загадочная Далдынского поля (ДКП), которое заключается [4, 9, 25, 32] в следующих особенностях: а) значительном количестве гроспидитов, дистеновых эклогитов и практически полном отсутствии ультраосновных включений в породе; б) резком преобладании граната (главным образом эклогитового парагенезиса) и хромита над пикроильменитом, который характеризуется повышенными концентрациями Cr_2O_3 и MgO ; в) высоком содержании в породе клинопироксена, образующего по составу широкий ряд от хромдиопсидов до кальциевых диопсидов; г) прямой зональности вкрапленников

флогопита, по характеру аналогичной с зональностью таковых из лампроитов; д) ярко выраженной индивидуальности по содержанию микроэлементов (особенно некогерентных и радиоактивных). По минерало-петрографическим особенностям кимберлит трубки Загадочная проявляет сходство с оливинфлогопитовыми лампроитами, а также слюдяными кимберлитами, встречающимися в виде обломков в ряде других трубок (Удачная, Сытыканская и др.).

Сопоставление химических составов кимберлитов Накынского поля (НКП) с петрохимическими типами кимберлитов СП по данным факторного анализа показывает, что кимберлиты НКП в целом относятся к магнезиальным и кальцит-магнезиальным типам. При этом наиболее карбонатизированными являются кимберлиты трубки Нюрбинская. Следует отметить, что, несмотря на присутствие в переменных количествах флогопита в кимберлитовых брекчиях и порфириновых кимберлитах НКП, они не попадают в поле типичных слюдяных петрохимических типов кимберлитов трубок Загадочная, Юбилейная, Удачная. Для кимберлитов этого поля характерны низкие содержания окисно-рудных минералов и редкая встречаемость перовскита.

С ранним этапом проявления кимберлитового магматизма в ДКП связано формирование жильных тел, выполненных слюдяным кимберлитом с пироксеновой основной массой и кальцитовым кимберлитом, содержащим переменное количество флогопита. Вслед за кимберлитовыми жилами, часто наблюдаемыми в трубках, внедрялись штокообразные тела, сложенные монтичеллитовым массивным кимберлитом и слюдяной разновидностью, близкой по вещественному составу кальцитовому кимберлиту жил. Особенности внутреннего строения многофазных трубок свидетельствуют о том, что многие кимберлитовые жилы и дайки являлись «слепыми» и образовались на значительных глубинах от дневной поверхности. Принимая во внимание вышеуказанные данные, а также последовательность формирования разнообразных по вещественному составу кимберлитов во многих многофазных трубках ДКП, можно уверенно предполагать проявление не менее двух этапов кимберлитового магматизма в пределах рассматриваемого района. Проявление основного объема кимберлитового материала в виде образования отдельных трубок, жил или самостоятельных фаз кимберлитов в уже сформировавшихся диатремах происходило во второй этап кимберлитового магматизма. Разница по возрасту отдельных фаз внедрения внутри одной трубки, по геологическим наблюдениям и радиологическим данным, может достигать 15–20 млн лет. Установленные типы кимберлитов и коагматичные им породы многофазных трубок

отличаются между собой по количеству, соотношению и типохимизму протоминералов, а также по алмазности (содержанию, типоморфизму крупных и мелких кристаллов).

Весьма важным составным компонентом кимберлитов являются ксенолиты мантийных пород, которые являются главнейшим источником информации о составе глубинных зон Земли и играют определяющую роль для расшифровки процессов кимберлитового и алмазообразования. К настоящему времени усилиями многих исследователей наработан обширный фактический материал по вещественному составу распространенных мантийных парагенезисов, выносимых кимберлитами к поверхности в виде глубинных ксенолитов, прежде всего, по их геохимии и составу породообразующих минералов. В значительно меньшей степени проводились изотопно-геохимические исследования, которые тем не менее дали важнейшие результаты относительно возраста мантийных пород и особенностей двух главных процессов в глубинах Земли – мантийного метасоматоза и частичного плавления мантийных субстратов, приводящих к появлению проторасплавов, кристаллизующихся затем в виде широкого спектра алмазносных кимберлитов и родственных пород. Глубинные ксенолиты в кимберлитах представляют три семейства пород: ультраосновные, основные и промежуточные при заметном преобладании в большинстве трубок первых, включающих дуниты (гранат + оливин + шпинель ± алмаз), верлиты (гранат + оливин + клинопироксен + шпинель), гарцбургиты (гранат + оливин + ортопироксен ± алмаз), лерцолиты (гранат + оливин + клинопироксен + ортопироксен + шпинель), ильменитовые перидотиты (гранат + оливин + ильменит + ортопироксен ± клинопироксен ± флогопит), вебстериты (гранат + клинопироксен + ортопироксен). По текстурно-структурным признакам они подразделяются на равномернозернистые (крупно- и среднезернистые гранобластовые или пойкилобластовые [6, 10, 24]) и порфириновые (порфиривидные). На основании всестороннего изучения ультраосновных нодулей разделяют их на две группы [8, 25]: магнезиальные и магнезиально-железистые. Последняя группа объединяет ильменитсодержащие разновидности. Основные породы в ксенолитах представлены магнезиально-железистыми, магнезиальными (нередко с энстатитом), дистеновыми и корундовыми эклогитами, гроспидитами. Иногда внимание акцентируется на особой роли гранатов и пироксенов при анализе особенностей состава минералов перидотитов, что вызвано равновесием между ними в зависимости от температуры и давления. Среди гранатосодержащих ксенолитов ультраосновного состава этим исследователем

выделяются следующие ассоциации: 1) пироп + оливин, 2) пироп + оливин + энстатит, 3) пироп + оливин + энстатит + диопсид, 4) пироп + оливин + диопсид, 5) пироп + энстатит + диопсид, 6) пироп + диопсид при наличии аксессуарных шпинелидов в большинстве ассоциаций и наиболее широком распространении третьей ассоциации с вариациями компонентов, а также пятой ассоциации. Перечисленные ассоциации устойчивы в широком диапазоне температур и давлений и охватывают графит-пироповую и алмаз-пироповую фации глубинности в соответствии с фазовой границей графит–алмаз [22–25, 28]. Алмаз-пироповая фация включает алмазсодержащие и потенциально алмазоносные (по составу минералов идентичные алмазоносным) минеральные ассоциации: дуниты, верлиты, гарцбургиты и лерцолиты, а также гранатовые пироксениты и ильменитовые перидотиты. Примечательно, что, несмотря на меньшую распространённость эклогитовых ксенолитов, их находки с алмазами более часты, чем перидотитовые. Данные по предельному содержанию хромовой компоненты и примеси натрия в гранатах, а калия в пироксенах – из парагенезисов алмаз-пироповой фации глубинности, указывают [24–26] на их кристаллизацию при давлениях от 45–50 до 60–70 кбар, что отвечает глубинам 150–230 км.

Анализ распределения мантийных нодулей в кимберлитах СП показывает, что для южной части региона примечательны высокомагнезиальные гранатовые перидотиты и пироксениты, которые определяют специфику всей популяции мантийных ксенолитов в трубке Мир. Преобладающие здесь гранатовые перидотиты представлены типичными для кимберлитов двупироксеновыми парагенезисами, довольно сильно истощёнными магнофильными компонентами. В петрографическом смысле они относятся преимущественно к гарцбургитам [20, 24 и др.]. Среди пироксенитов также преобладают двупироксеновые парагенезисы, преимущественно вебстериты. Редкие гранатовые клинопироксениты сходны с эклогитами по минеральному составу, но отличаются от них высокой магнезиальностью и повышенной хромистостью силикатов наряду с низким содержанием жадеитовой молекулы в клинопироксенах. Наиболее глубинные породы в пределах Мирнинского кимберлитового поля (МКП) представлены катаклазированными гранатовыми перидотитами; к ним по глубинности, вероятно, близки ильменит-гранатовые верлиты с порфирокластическими структурами, а также дискретные нодули (мегакристы) низкохромистой серии (титановая ассоциация вкрапленников). Тенденция обогащения титаном и железом характеризует процессы мантийного Fe-Ti метасоматоза у нижней кромки литосферы. В поле стабильности

алмаза, вероятно, могут быть распространены мегакристаллические алмазоносные дунит-гарцбургиты (в трубке Мир их находки пока редки), а также алмазоносные эклогиты и пироксениты. Над уровнем алмазосодержащих пород залегают недеформированные гранатовые перидотиты, переслаивающиеся с пёстрыми по составу гранатовыми пироксенитами. Эта наиболее широко распространённая в трубке группа пород была равновесна в поле устойчивости графита при относительно низких температурах. Наименее глубинный мантийный слой в трубке Мир представлен шпинелевыми и переходными гранатизированными шпинелевыми перидотитами и пироксенитами. В трубке Удачная мантийные нодули представлены широким спектром пород, наиболее глубинными среди которых являются деплетированные в архейское время мегакристаллические перидотиты, которые, вероятнее всего, являются материнскими для абсолютного большинства (более 90%) алмазов этого региона [8–10]. В целом в кимберлитах данной трубки, аналогично трубкам Мир и Сытыканская, отмечены практически все известные в кимберлитовых диатремах СП разновидности ультраосновных и основных пород, но преобладающими являются [22–25] гранатовые лерцолиты порфиробластовые деформированные (более 39% всех мантийных ксенолитов) и гранатовые лерцолиты (21%). В трубке Сытыканская (Алакит-Мархинское поле), как и в трубке Мир, доминируют гранатовые лерцолиты, при значительной доле (15,3%) шпинелевых лерцолитов. Здесь же несколько выше (более 5%) встречаемость эклогитов, ильменитовых перидотитов и ильменит-гранатовых перидотитов.

Таким образом, кимберлиты установлены на всех древних платформах Земли, а основной формой их проявления являются воронкообразные брекчиевые вулканические трубки взрыва маар-диатремового типа, верхние части которых венчаются кратерными постройками, а на глубине (от 1000 до 2500 м) диатремы переходят в дайки. Сохранность кратерных частей зависит от величины «посткимберлитового» эрозионного среза территории, а корневые части вскрыты только в отдельных трубках (Мир и некоторые другие) в силу большой глубины залегания и небольшой мощности даек (жил). Петрографический спектр кимберлитовых образований характеризуется трёхфациальным разрезом (кратер, диатрему и корневую гипабиссальную зону) и обнаруживает соответствующие текстурно-структурные отличительные черты. Для кимберлитовых диатрем примечательны отсутствие больших объёмов вытеснённых пород и плутонических комплексов, выраженное в минеральном и химическом составе насыщенность летучими, при высокой доле CO₂, относительно

низкотемпературный характер доминирующей части кимберлитовых минералов, присутствие слабо раскристаллизованных участков и другие признаки быстрого внедрения, наличие ксенолитов мантийных, коровых и вмещающих пород, присутствие алмазов, примеры перехода диатрем в дайки, признаки взрывного генезиса, наличие до-, син- и посттрубочных даек, отсутствие термометаморфизма, широкие качественно-количественные вариации минерального состава между сообществами тел и отдельно взятыми проявлениями. Облик и состав разнофациальных кимберлитовых пород (порфиновые кимберлиты, кимберлитовые и автолитовые кимберлитовые брекчии, туфобрекчии и туфы) во многом определяются качественно-количественным спектром вторичных минералов, главными из которых являются серпентин и карбонаты, а к второстепенным отнесены все остальные минералы, образовавшиеся на разных стадиях становления кимберлитовых трубок и представляющие различные минералогические классы – силикаты, карбонаты, оксиды и гидроксиды, сульфиды, сульфаты, галогениды, фосфаты, бораты и битумы. Установленные мантийно-челлитовые и диопсид-флогопит-оливиновые разновидности кимберлитов позволяют проследить различные этапы эволюции родоначальных кимберлитовых расплавов.

Мантийный разрез северной части провинции можно охарактеризовать по ксенолитам в кимберлитовой трубке Обнаженная, которая является одной из наиболее богатых включениями глубинных пород,

содержание которых достигает 2,5 об.%. В трубке выделяются два небольших участка, насыщенные нодулями, причём в одном из них преобладают перидотиты, а в другом – эклогиты. Отмечаются повышенные содержания безгранатовых перидотитов и разнообразных гранат-пироксеновых пород. Встречаются также своеобразные гранатовые пироксениты, переходные по содержанию оливина от эклогита к перидотиту, часто отмечаются пироксениты и перидотиты с развитием граната вокруг зёрен хромшпинелида. Отличие мантийного материала трубки Обнаженная от такового большинства других трубок СП, в которых гранатовые перидотиты резко преобладают над всеми остальными разновидностями глубинных нодулей, состоит в весьма большом содержании гранатовых пироксенитов (38%) и эклогитов (26%). В трубке Обнаженная менее одной шестой глубинных нодулей приходится на породы, образовавшиеся при умеренных давлениях шпинелевой фации: дуниты, перидотиты (лерцолиты, гарцбургиты) – около 3% и пироксениты (энстатиты и вебстериты) – около 4%, флогопитовые пироксениты и слюдиты, глиммериты, слюдистые перидотиты – около 8%. К породам, сформировавшимся при более высоких давлениях, в зоне устойчивости пиропового граната, относятся гранатовые лерцолиты (9%), пироксениты (40%), эклогиты (13%), ильменитсодержащие слюдиты, перидотиты и пироксениты (4%), а также гранатизированные перидотиты и пироксениты, количество которых достигает 10%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Афанасьев В. П., Елисеев А. П., Надолинный В. А., Зинчук Н. Н., Коптиль В. И., Рылов Г. М., Томиленко А. А., Горяинов 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., Зинчук Н. Н.* Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // *Геология рудных месторождений.* – 1999. – Т. 41, № 3. – С. 281–288.
3. *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.
4. *Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логинова А. Н.* Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // *Записки Российского минералогического общества.* – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.
5. *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 алмазонасных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // *Геология и геофизика.* – 2000. – Т. 41. – № 12. – С. 1729–1741.
6. *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.
7. *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 (9). – С. 37–55.

8. *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.
9. *Горшков А. И., Зинчук Н. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов 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.
10. *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., Кошкарев Д. А.* Перспективы коренной и россыпной алмазности Юго-Западной части Сибирской платформы // *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.
11. *Зинчук Н. Н.* Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых пород // *Геология и геофизика*. – 1998. – Т. 39, № 12. – С. 1704–1715.
12. *Зинчук Н. Н.* Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // *Вестник Воронежского университета. Геология*. – 2021. – № 4. – С. 35–52.
13. *Зинчук Н. Н.* Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // *Вестник Воронежского ун-та. Геология*. – 2021. – № 3. – С. 50–61.
14. *Зинчук Н. Н.* Об основных источниках глинистых минералов в мезозойских континентальных алмазносных отложениях Западной Якутии // *Геология и геофизика*. – 1982. – № 8. – С. 81–90.
15. *Зинчук Н. Н.* Особенности минералов слюд в кимберлитах // *Вестник Воронежского университета. Геология*. – 2018. – № 2. – С. 29–39.
16. *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.
17. *Зинчук Н. Н.* Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазности кимберлитов // *Отечественная геология*. – 2022. – № 1. – С. 36–47.
18. *Зинчук Н. Н.* Состав и генезис глинистых минералов в верхнепалеозойских осадочных толщах восточного борта Тунгусской синеклизы // *Геология и геофизика*. – 1981. – № 8. – С. 22–29.
19. *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.
20. *Зинчук Н. Н., Афанасьев В. П.* Генетические типы и основные закономерности формирования алмазносных россыпей // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 1998. – № 2. – С. 66–71.
21. *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.
22. *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.
23. *Зинчук Н. Н., Борис Е. И., Стегницкий Ю. Б.* Структурно-формационное и минерагеническое районирование территорий развития погребенных кор выветривания и продуктов их переотложения в алмазносных регионах (на примере Якутской кимберлитовой провинции) // *Геология и геофизика*. – 1998. – Т. 39, № 7. – С. 950–964.
24. *Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н., Котельников Д. Д., Шлыков В. Г., Жухлистов 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.
25. *Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д.* Стратегия ведения и результаты алмазопроисковых работ // *Горный вестник*. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
26. *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.
27. *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.
28. *Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П.* Апокимберлитовые породы // *Геология и геофизика*. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
29. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Об аномалии общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратиферу // *Вестник Воронежского госуниверситета. Серия геология*. – 2003. – № 2. – С. 57–68.
30. *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.
31. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдястых минералов // *Известия высших учебных заведений. Геология и разведка*. – 1996. – № 1. – С. 53–61.
32. *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.
33. *Савко А. Д., Зинчук Н. Н., Шевырёв Л. Т., Ильяш В. В., Афанасьев Н. С.* Алмазность Воронежской антеклизы. Труды НИИГ Воронежского ун-та. – 2003. – Т. 17. – 121 с.

34. Харькив А.Д., Зуенко В.В., Зинчук Н.Н., Крючков А.И., Уханов А.В., Богатых М.М. Петрохимия кимберлитов. – М.: Недра, 1991. – 304 с.
35. 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.
36. 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. – V. 465, № 2. – P. 1297–1301.
37. Hawthorne J. B. Model of a kimberlite pipe // Phys. Chem. Earth. – 1975. – № 9. – P. 1–15.
38. Mitchell P. Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. – New York: Plenum Pub. Corp., 1986–1989. – 442 p.
39. Scott Smith B. H. Lamproites and kimberlites in India // Weues Jahrbuch Miner. – 1989. – Abh. 161. – № 2. – P. 193–225.
40. 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.
41. Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I. et al. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry // Journal of Geochemical Exploration. – 2002. – V. 76, № 2. – P. 93–112.

REFERENCES

1. Afanas'yev V. P., Yeliseyev A. P., Nadolinnyy V. A., Zinchuk N. N., Koptil' V. I., Rylov G. M., Tomilenko A. A., Goryaynov S. V., Yur'yeva O. P., Sonin V. M., Chepurov A. I. Mineralogiya i nekotoryye voprosy genezisa almazov V i VII raznovidnostey (po klassifikatsii Yu. L. Orlova) [Mineralogy and some questions of the genesis of diamonds of V and VII varieties (according to the classification of Yu. L. Orlov)]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya, 2000, No. 5, P. 79–97. (In Russ.)
2. Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N. Osnovnyye litodinamicheskiye tipy oreolov indikatornykh mineralov kimberlitov i obstanovki ikh formirovaniya [The main lithodynamic types of aureoles of indicator minerals of kimberlites and their formation environment]. Geologiya rudnykh mestorozhdeniy, 1999, V. 41, No. 3, P. 281–288. (In Russ.)
3. Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Koptil' V. I. Poligenez almazov v svyazi s problemoy korennykh rosspyey severovostoka Sibirskoy platformy [Diamond polygenesis in connection with the problem of bedrock placers in the northeast of the Siberian Platform]. Doklady Akademii nauk, 1998, V. 361, No. 3, P. 366–369. (In Russ.)
4. Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Loginova A. N. Osobennosti raspredeleniya rossypnykh almazov, svyazannykh s dokembriyskimi istochnikami [Features of the distribution of alluvial diamonds associated with Precambrian sources]. Zapiski Rossiyskogo mineralogicheskogo obshchestva, 2009, V. 138, No. 2, P. 1–13. (In Russ.)
5. Afanas'yev V. P., Pokhilenko N. P., Logvinova A. M., Zinchuk N. N., Yefimova E. S., Saf'yannikov V. I., Krasavchikov V. O., Podgornyykh 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 of diamond-bearing areas in connection with the problem of «false» indicators of kimberlites]. Geologiya i geofizika, 2000, V. 41, No. 12, P. 1729–1741. (In Russ.)
6. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Avtolitovyye kimberlity kak produkt vyzkostnoy differentsiatsii kimberlitovogo rasplava v diatremakh [Autolithic kimberlites as a product of viscous differentiation of kimberlite melt in diatremes]. Petrologiya, 2000, V. 8, No. 3, P. 549–560. (In Russ.)
7. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. Geodinamicheskiy kontrol' razmeshcheniya kimberlitovykh poley tsentral'noy i severnoy chastey Yakutskoy kimberlitovoy provintsii (petrokhimicheskiy aspekt) [Geodynamic control of the location of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakut kimberlite province (petrochemical aspect)]. Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya, 2000, No. 3 (9), P. 37–55. (In Russ.)
8. Vasilenko V. B., Zinchuk N. N., Kuznetsova L. G. O sopryazhonnosti sostavov glubinykh vkluycheniy v petrokhimicheskikh raznovidnostyakh kimberlitov v diatremakh Yakutii [On the conjugation of compositions of deep-seated inclusions in petrochemical varieties of kimberlites in diatremes of Yakutia]. Petrologiya, 2001, V. 9, No. 1, P. 1–12. (In Russ.)
9. Gorshkov A. I., Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D., Shlykov V. G., Zhukhlistov A. P., Mokhov A. V., Sivtsov A. V. Novyy uporyadochennyy smeshanosloynny mineral lizardit-saponit iz kimberlitov Yuzhnoy Afriki [New ordered mixed-layer mineral lizardite-saponite from kimberlites South Africa]. Doklady RAN, 2002, V. 382, No. 3, P. 374–378. (In Russ.)
10. Yegorov K. N., Zinchuk N. N., Mishenin S. G., Serov V. P., Sekerin A. P., Galenko V. P., Denisenko Ye. P., Baryshev A. S., Men'shagin Yu. V., Koshkarev D. A. Perspektivy korennoy i rossypnoy almazonosnosti Yugo-Zapadnoy chasty Sibirskoy platformy [Prospects for bedrock and alluvial diamond content in the Southwestern part of the Siberian platform]. Additional materials based on the results of the regional scientific and 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, Mirnyy, MGT publ., 2003, P. 50–84. (In Russ.)
11. Zinchuk N. N. Vliyaniye vtorykh 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, P. 1704–1715. (In Russ.)
12. *Zinchuk N.N.* Geologicheskiye issledovaniya pri poiskakh almaznykh mestorozhdeniy [Geological research in the search for diamond deposits]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2021, No. 4, P. 35–52. (In Russ.)
 13. *Zinchuk N.N.* Dokembriyskiye istochniki almazov v rossiyskikh fanerozooya [Precambrian sources of diamonds in Phanerozoic placers]. *Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya*, 2021, No. 3, P. 50–61. (In Russ.)
 14. *Zinchuk N.N.* Ob osnovnykh istochnikakh glinistykh mineralov v mezozoyskikh kontinental'nykh almazonosnykh otlozheniyakh Zapadnoy Yakutii [On the main sources of clay minerals in the Mesozoic continental diamondiferous deposits of Western Yakutia]. *Geologiya i geofizika*, 1982, No. 8, P. 81–90. (In Russ.)
 15. *Zinchuk N.N.* Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of micas minerals in kimberlites]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2018, No. 2, P. 29–39. (In Russ.)
 16. *Zinchuk N.N.* Osobennosti sostava i raspredeleniya slyudistykh obrazovaniy v kimberlitovykh porodakh Yakutii [Peculiarities of composition and distribution of micaeous formations in kimberlite rocks of Yakutia]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1991, No. 7, P. 58–66. (In Russ.)
 17. *Zinchuk N.N.* Rol' petrologicheskikh i geochemicheskikh issledovaniy v otsenke potentsial'noy almazonosnosti kimberlitov [The role of petrological, mineralogical and geochemical studies in assessing the potential diamond content of kimberlites]. *Otechestvennaya geologiya*, 2022, No. 1, P. 36–47. (In Russ.)
 18. *Zinchuk N.N.* Sostav i genesis glinistykh mineralov v verkhnepaleozoyskikh osadochnykh tolshchakh vostochnogo borta Tungusskoy sineklizy [The composition and genesis of clay minerals in the UPer Paleozoic sedimentary sequences of the eastern side of the Tunguska syncline]. *Geologiya i geofizika*, 1981, No. 8, P. 22–29. (In Russ.)
 19. *Zinchuk N.N.* Tipomorfnyye svoystva indikatornykh mineralov kimberlitov i ikh ispol'zovaniye pri prognozirovanii mestorozhdeniy almaza na Sibirskoy platforme [Typomorphic properties of kimberlite indicator minerals and their use in predicting diamond deposits on the Siberian platform]. *Otechestvennaya geologiya*, 2021, No. 2, P. 41–56. (In Russ.)
 20. *Zinchuk N.N., Afanas'yev V.P.* Geneticheskiye tipy i osnovnyye zakonomernosti formirovaniya almazonosnykh rossypey [Genetic types and main patterns of formation of diamond placers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1998, No. 2, P. 66–71. (In Russ.)
 21. *Zinchuk N.N., Bardukhinov L.D.* O spetsifike izucheniya almaza pri prognozno-poiskovykh rabotakh (na primere Sibirskoy platformy) [On the specifics of the study of diamond during predictive and prospecting work (on the example of the Siberian platform)]. *Rudy i metally*, 2021, No. 3, P. 59–75. (In Russ.)
 22. *Zinchuk N.N., Boris Ye.I.* O kontsentratsii produktov pereotlozheniya kor vyvetrivaniya v verkhnepaleozoyskikh osadochnykh tolshchakh vostochnogo borta Tungusskoy sineklizy [On the concentration of weathering crust redeposition products in the UPer Paleozoic sedimentary strata of the eastern side of the Tunguska syncline]. *Geologiya i geofizika*, 1981, No. 8, P. 22–29. (In Russ.)
 23. *Zinchuk N.N., Boris Ye.I., Stegnitskiy Yu.B.* Strukturno-formatsionnoye i mineragenicheskoye rayonirovaniye territoriy razvitiya pogrebennykh kor vyvetrivaniya i produktov ikh pereotlozheniya v almazonosnykh regionakh (na primere Yakutskoy kimberlitovoy provintsii) [Structural-formational and mineragenic zoning of the territories of development of buried weathering crusts and products of their redeposition in diamond-bearing regions (on the example of the Yakut kimberlite province)]. *Geologiya i geofizika*, 1998, V. 39, No. 7, P. 950–964. (In Russ.)
 24. *Zinchuk N.N., Zinchuk M.N., Kotel'nikov D.D., Shlykov V.G., Zhukhlistov A.P.* Strukturno-kristallokhimicheskiye preobrazovaniya sloistykh mineralov na raznykh stadiyakh gipergennoy 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, P. 47–60. (In Russ.)
 25. *Zinchuk N.N., Zuyev V.M., Koptil' V.I., Chornyy S.D.* Strategiya vedeniya i rezul'taty almazoposkovykh rabot [The strategy of conducting and results of diamond prospecting]. *Gornyy vestnik*, 1997, No. 3, P. 53–57. (In Russ.)
 26. *Zinchuk N.N., Kotel'nikov D.D., Gorshkov A.I.* Identifikatsiya i genesis lizardit-saponitovogo smeshanosloynogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoy 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 iskopayemye*, 2003, No. 1, P. 87–96. (In Russ.)
 27. *Zinchuk N.N., Kotel'nikov D.D., Sokolov V.N.* Izmeneniye mineral'nogo sostava i strukturnykh osobennostey kimberlitov Yakutii v protsesse vyvetrivaniya [Changes in the mineral composition and structural features of kimberlites of Yakutia during weathering]. *Geologiya i geofizika*, 1982, No. 2, P. 42–53. (In Russ.)
 28. *Zinchuk N.N., Mel'nik Yu.M., Serenkov V.P.* Apokimberlitovyye porody [Apokimberlite rocks]. *Geologiya i geofizika*, 1987, No. 10, P. 66–72. (In Russ.)
 29. *Kotel'nikov D.D., Zinchuk N.N.* Ob anomalii obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhении soderzhashchikh 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, P. 57–68. (In Russ.)
 30. *Kotel'nikov D.D., Zinchuk N.N.* Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsiy [Peculiarities of clay minerals in deposits of various sedimentary formations]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1997, No. 2, P. 53–63. (In Russ.)
 31. *Kotel'nikov D.D., Zinchuk N.N.* Tipomorfnyye osobennosti i paleogeograficheskoye znachenie slyudistykh

- mineralov [Typomorphic features and paleogeographical significance of micaceous minerals]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1996, No. 1, P. 53–61. (In Russ.)
32. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Usloviya nakopleniya i postsedimentatsionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoy kory [Conditions of accumulation and post-sedimentary transformation of clay minerals in the sedimentary cover of the earth's crust]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2001, No. 12, P. 45–51. (In Russ.)
 33. *Savko A. D., Zinchuk N. N., Shevyrov L. T., Il'yash V. V., Afanas'yev N. S.* Almazonosnost' Voronezhskoy anteklizy [Diamond potential of the Voronezh antecline]. *Trudy NIIG Voronezhskogo un-ta*, 2003, V. 17, 121 p. (In Russ.)
 34. *Khar'kiv A. D., Zuyenko V. V., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I., Ukhanov A. V., Bogatykh M. M.* (In Russ.) Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites]. Moscow, Nedra, 1991, 304 p.
 35. *Khitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D.* Primeniye klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonmernostey vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster analysis to elucidate the patterns of weathering of rocks of various compositions]. *Doklady AN SSSR*, 1987, V. 296, No. 5, P. 1228–1233. (In Russ.)
 36. *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, V. 465, No. 2, P. 1297–1301.
 37. *Hawthorne J. B.* Model of a kimberlite pipe. *Phys. Chem. Earth*, 1975, No. 9, P. 1–15.
 38. *Mitchell P.* Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. New York, Plenum Pub. Corp., 1986–1989, 442 p.
 39. *Scott Smith B. H.* Lamproites and kimberlites in India. *Weues Jahrbuch Miner*, 1989, Abh. 161, No. 2, P. 193–225.
 40. *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, P. 576–588.
 41. *Vasilenko V. B., Kuznetsova L. G., Volkova N. I.* et al. Diamond potential estimation based on Kimberlite major element chemistry. *Jornal of Geochemical Exploration*, 2002, V. 76, No. 2, P. 93–112.

Статья поступила в редакцию 30.07.22; одобрена после рецензирования 12.09.22; принята к публикации 26.10.22.
The article was submitted 30.07.22; approved after reviewing 12.09.22; accepted for publication 26.10.22.