

## Особенности распространения и генезиса некоторых карбонатных минералов в кимберлитовых породах (на примере Сибирской платформы)

Кроме ранее охарактеризованного кальцита, являющегося совместно с серпентином основным породообразующим минералом кимберлитовых пород, в диатремах этого типа широко развиты доломит, арагонит, пироаурит, стронцианит, магнезит, гидромагнезит и хантит. Доломит в существенном количестве диагностирован в диатремах Сибирской платформы (СП), где он ассоциирует с кальцитом и серпентином, иногда являясь и породообразующим минералом. Образование доломита по времени охватывает достаточно широкий интервал: от начала процессов метасоматоза верхнемантийных пород до заключительной стадии гидротермально-метасоматических процессов в пустотно-трещинных образованиях остывающего кимберлитового расплава. Арагонит образует в кимберлитах прожилки, почковидные агрегаты радиально-лучистого и сноповидного строения, а также друзы игольчатых кристаллов. Пироаурит установлен в кимберлитовых породах в виде прожилков и гнёзд волокнистого и кристаллического облика, ассоциируя с кальцитом, магнетитом и серпофитом. Часто пироаурит совместно с серпентином слагает крупные зеленовато-серые жеоды. Пироаурит – характерный минерал для основной массы кимберлитов глубоких горизонтов некоторых диатрем Сибирской платформы. Иногда минерал встречается в виде концентрически-зональных стяжений в ассоциации с серпентином и кальцитом, а также отдельных кристаллов. Из других карбонатов в переменном количестве встречаются хантит, стронцианит, магнезит и гидромагнезит. На основании минералого-геохимических и люминесцентных свойств карбонатов из гидротермально-метасоматических пустотно-трещинных образований в кимберлитовых породах отмечены устойчивые, закономерные парагенетические ассоциации, отражающие характер физико-химических процессов в постмагматическую и гипергенную стадии становления кимберлитовых пород.

*Ключевые слова:* карбонаты, кимберлиты, гидротермально-метасоматические и гипергенные процессы.

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

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

## Specific features of the distribution and genesis of some carbonate minerals in kimberlite rocks (on the example of the Siberian Platform)

N. N. ZINCHUK

West-Yakutian Research Center of the Republic Sakha (Yakutia) Academy of Science, Mirny

In addition to previously individually characterized calcite that, along with serpentine, is the main rock-forming mineral of kimberlite rocks of the Siberian platform (SP), such carbonates as dolomite, aragonite, pyroaurite, strontianite, magnesite, hydromagnesite, and huntite are also widely, although variably, distributed in diatremes of this type. Dolomite was diagnosed in substantial amounts in the SP diatremes, where it associated with calcite and serpentine, occasionally even as a rock-forming mineral. The dolomite formation covers a sufficiently wide temporal interval, from the beginning of metasomatism of the upper mantle rocks through the final stage of hydrothermal-metasomatic processes within cavity-fissure features of the cooling kimberlite melt. Aragonite forms veinlets, radial-beam and sheaf-like reniform aggregates, and druses of acicular crystals in the kimberlites. Pyroaurite was distinguished in the kimberlite rocks in form of the veinlets and nests of fibrous and crystalline appearance, associated with calcite, magnetite, and serpoiphyte. Pyroaurite often composes large greenish-grey geodes together with serpentine. Pyroaurite is a typical mineral for the groundmass of kimberlites at deep horizons of some SP diatremes. This mineral sometimes occurs in form of concentrically zoned concretions in association with serpentine and calcite, as well as individual crystals. Other carbonates are represented by variable amounts of huntite, strontianite, magnesite, and hydromagnesite. Based on mineralogical-geochemical and luminescent properties of the carbonates from the hydrothermal-metasomatic cavity-fissure features in the kimberlite rocks, their stable and regular paragenetic associations were distinguished, reflecting the character of physical-chemical processes at the postmagmatic and supergene stages of the kimberlite formation.

*Key words:* carbonates, kimberlites, hydrothermal-metasomatic and supergene processes.

**Введение.** Вопросам внедрения кимберлитовой магмы, становления и последующего изменения кимберлитовых тел посвящены многочисленные работы [1–3, 5, 8, 21], исчерпывающий список которых приведён в ряде монографических изданий и статей многих исследователей. Поэтому в настоящей работе мы остановимся только на некоторых, слабо освещённых моментах этой большой и сложной проблемы. При изучении кимберлитов главное внимание обычно уделяется реликтовым структурам и текстурам исходных пород, по которым построены практически все классификации кимберлитовых пород [15, 18, 20, 24, 27–29, 32]. Основное значение при этом придается изучению псевдоморфоз, их формам и расположению в породе. В то же время незаслуженно малая роль отводится исследованию основной цементирующей массы. В кимберлитовых породах, в которых сохранилось реликтовое строение, цементирующая масса представлена [11, 13, 16, 19, 30, 31, 33]: а) субмикроскопическим серпентином, б) пелитоморфными карбонатными минералами, в) стекловидным веществом. Многие исследователи считают, что и серпентин цемента представляет собой апостекло, хотя в свежем виде оно никем и никогда не описывалось. Стекло не обнаружено также в обломочном материале кимберлитов. Находящиеся в расплаве при более высоких давлениях ионы  $\text{CO}_3^{2-}$  в случае сравнительно медленного снятия напряжения кристаллизуются с образованием карбонатов. При сохранении щелочной среды  $\text{CO}_2$  может вновь соединиться с Ca с образованием карбонатов. После кристаллизации силикатов, остаточная щелочная карбонатная масса с летучими компонентами отделяется и, находясь под давлением в момент «прострела», выполняет всякого рода трещины (до мелких включительно), в которых могут выкристаллизовываться карбонаты [6, 7, 9, 22]. Источником Ca и  $\text{CO}_2$  в алмазоносных районах Сибирской платформы могут быть и вмещающие кимберлитовые диатремы терригенно-карбонатные породы, многочисленные ксенолиты из которых фиксируются в трубках. Целью настоящих исследований являлось комплексное изучение некоторых карбонатных минералов кимберлитов для получения информации об особенностях их генезиса и решения некоторых прикладных задач (в первую очередь технологических вопросов обогащения кимберлитов).

Изучение карбонатных минералов кимберлитов проводилось с применением комплекса методов,

включающих петрографические, кристалло-оптические и гониометрические изучения, химические и спектральные анализы, рентгеновскую дифрактометрию и люминесценцию, фото- и рентгенолюминесценцию, ИК-спектроскопию, электронный парамагнитный резонанс (ЭПР) и дериватографию.

**Фактический материал, результаты исследований и их интерпретация.** В кимберлитах Сибирской, Восточно-Европейской и Африканской платформ наряду с ранее охарактеризованным кальцитом [18, 26], в классе карбонатов довольно часто встречается [10, 11, 13, 16, 19] **доломит** ( $\text{CaCO}_3 \cdot \text{MgCO}_3$ ), образующий обычно мелкозернистые агрегаты в основной массе пород (рис. 1). Встречен доломит и в жильных образованиях зоны выщелачивания некоторых тел. В единичных кимберлитовых диатремах Сибирской платформы (Юбилейная, Сытыканская, Молодость и др.) минерал содержится в концентрациях, позволяющих считать его породообразующим. Поскольку в основной массе пород доломит встречается [12, 14, 17, 23, 25] в ассоциации с кальцитом, то идентифицируется он только с помощью точных методов исследований (рис. 2). На дифрактограммах образцов кимберлитов, содержащих доломит, он в смеси уверенно диагностируется по серии рефлексов, равных 0,2890; 0,2196; 0,2089; 0,2019; 0,1810; 0,1793; 0,1570; 0,1410 и 0,1390 нм. Показатели преломления минерала:  $n_p = 1,540$ ,  $n_g = 1,686$ . Примесь минерала в ассоциациях пород уверенно определяется также на кривых ДТА дериватограмм по чётким эндотермическим эффектам в области 710–830 (распад и диссоциация  $\text{MgCO}_3$ ) и 870–1000 °С (диссоциация  $\text{CaCO}_3$ ). Присутствие в основной массе пород доломита отчётливо фиксируется и по результатам пересчётов (с рентгеновским контролем) химических анализов на минеральный состав. Так, в западном теле кимберлитовой трубки Удачная максимальные концентрации доломита в основной массе пород, определённых указанными методами, приурочены к участкам, обеднённым серпентином и обогащённым свободным кремнезёмом. В таких новообразованиях доломит ассоциирует (в %): с серпентином – до 49, гипсом – до 6, флогопитом – до 5, хлоритом – до 7, бруситом – до 5, гидроксидами железа – до 3 и кварцем – до 3.

Полученные различными исследователями [26–29, 32] люминесцентные характеристики доломита из кимберлитов показали, что основным и регулярным центром излучения в минерале является

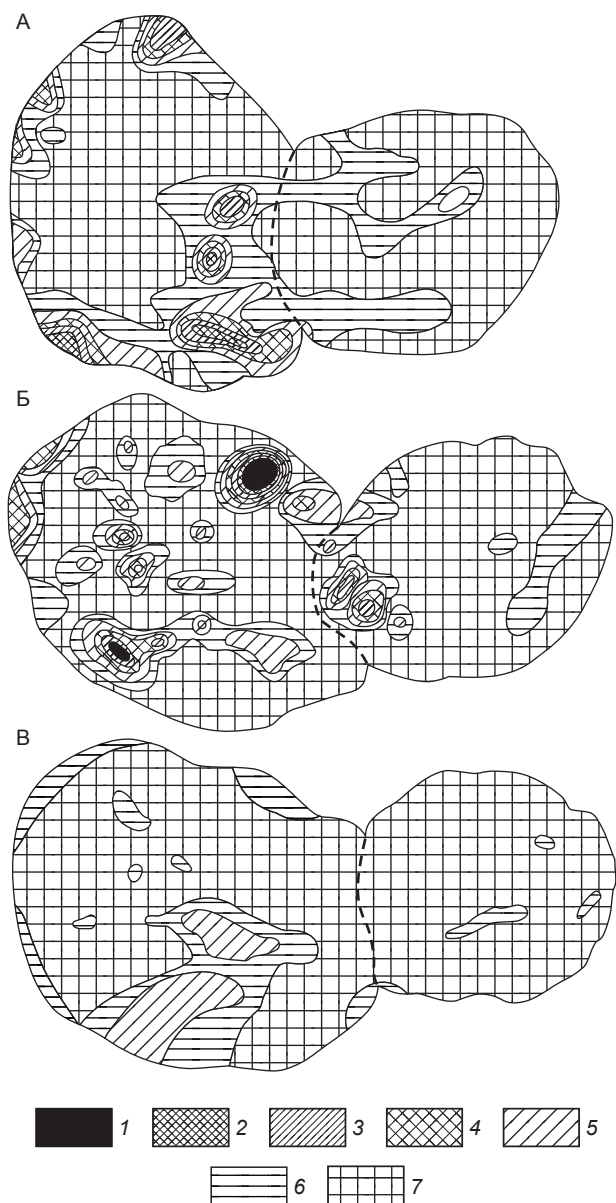


Рис. 1. Схематическая карта распространения доломита в кимберлитовых породах трубки Удачная (А–В): содержание минерала (в вес.%): 1 – >30, 2 – 25–30, 3 – 20–25, 4 – 15–20, 5 – 10–15, 6 – 5–10, 7 – <5

ион  $Mn^{2+}$ , свечение которого в области 630 нм обусловлено смесью кальцитовой и доломитовой фаз. Выявлена сложная структура излучения ионов  $Mn^{2+}$ , находящихся в позиции Са (полоса с  $\lambda_m = 580–590$  нм) и Mg (полоса с  $\lambda_m = 660–670$  нм). Изредка фиксировалось [30, 31, 33] излучение ионов  $Se^{3+}$  при фотовозбуждении (двойная полоса 345–375 нм) и ионов  $Dy^{3+}$  (линейчатый спектр). При сравнительном изучении доломитов различного

происхождения наблюдалась также нестабильность формы спектров: явно структурное уширение полос излучения и существенное смещение положения их максимумов в области 630–670 нм. При более строгом отборе образцов (с рентгеноструктурным и ИК-спектроскопическим контролем) удалось установить, что излучению ионов  $Mn^{2+}$  в собственно доломитовой фазе соответствует полоса с  $\lambda_m = 655$  нм (630 нм в кальците). Полоса 580–590 нм, связанная с ионами марганца в позиции кальция в таких образцах, не наблюдалась. Кроме примесного центра  $Mn^{2+}$ , в доломитах обнаружено [34] также слабое излучение в области 390–460 нм, которое можно связать с обычными для этой системы карбонатными радикальными центрами (типа  $CO_3^{\cdot-}$  и  $CO_3^{3\cdot-}$ ), фиксируемыми методом ЭПР ( $CO_3^{\cdot-}$  или  $O^{2\cdot-}$ ). Низкая интенсивность (на два порядка слабее излучения  $Mn^{2+}$ ) не позволяет проанализировать его структуру и дать более конкретную и приемлемую интерпретацию этого излучения. Важное значение при этом может иметь установленная связь РЛ-характеристик с фазовой неоднородностью доломита. Исследования показали [35], что при изучении РЛ- и ИК-характеристик кальцит-доломитовых образований из различных пород (включая и кимберлиты) могут быть информативны отношения интенсивностей излучения при  $\lambda = 600$  и 660 нм (индикаторный

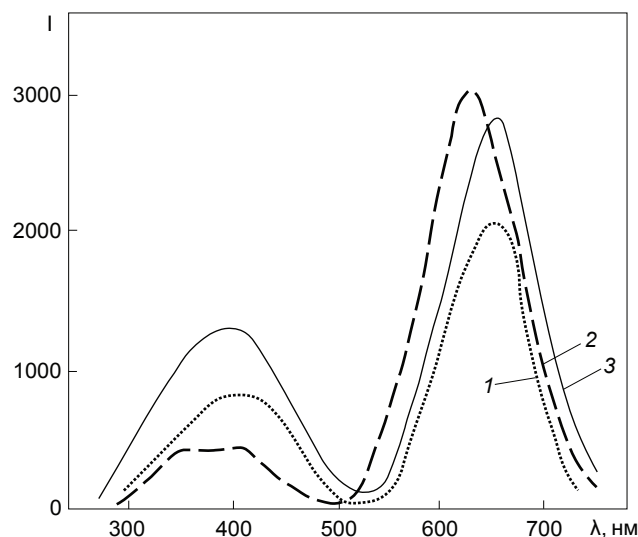


Рис. 2. Спектры рентгенолюминесценции доломитов из кимберлитов (1, 2) и вмещающих их карбонатных пород (3)

фактор доломитизации –  $f_D = I_{600} / I_{660}$ , измеренных по интегральному спектру смеси. Величина этого фактора максимальна у мономинерального кальцита (1,25–1,4) и минимальна у чистого доломита (0,23–0,36). Для кальцитов из кимберлитовых пород Сибирской платформы этот фактор изменяется в несколько больших диапазонах (от 1,2 до 1,53), а для доломитов отмечены значения 0,255–0,6. Оценка фазового состава карбонатных образований Сибирской платформы проводилась [18, 26] по относительной интенсивности полос деформационных колебаний аниона  $\text{CO}_3$  в области  $730 \text{ см}^{-1}$ . При диагностике минералов группы кальцита и доломита применялись полосы в области  $700\text{--}740$  и  $1780\text{--}1840 \text{ см}^{-1}$ .

Доломит по сравнению с кальцитом пользуется подчинённым развитием как в плане трубок (рис. 1, А–В), так и на разведанную глубину. Минерал образует мелкозернистые агрегаты в основной массе, ассоциируя с кальцитом и серпентином [4, 5, 7, 8, 15, 18, 20, 21, 24, 37]. В зонах выщелачивания кимберлитовых пород установлены жильные выделения доломита. Анализируя схематические карты распределения доломита в плане трёх опорных горизонтов трубки Удачная, построенных для плотных (см. рис. 1, В), частично дезинтегрированных (см. рис. 1, Б) и в различной степени изменённых (см. рис. 1, А) кимберлитов, можно получить общую картину поведения минерала в постмагматических и гипергенных условиях. Вверх по описываемым горизонтам содержание кальцита постепенно падает и отмечаются существенные различия концентрации минерала по сравниваемым горизонтам. В распределении доломита наблюдается обратная (по сравнению с кальцитом) картина – повышение концентрации минерала приурочено в основном к центральной части тела с незначительными локальными максимумами на восточном и западном флангах, а также у северных контактов с вмещающими породами. В западном теле отмечена чёткая тенденция к его увеличению к контактам с вмещающими породами. Отчётливый минимум фиксируется в южной части трубки, а в северной половине (на её восточном и западном флангах) наблюдаются два глубоких минимума. Заметна некоторая корреляция тренда нормативных количеств доломита с аналогичным трендом минерала на контакте обоих тел. В восточном теле к среднему горизонту ситуация существенно меняется. Максимальная концентрация минерала отмечена у контакта с западным

телом. Центральная часть диатремы характеризуется субширотной зоной пониженного содержания доломита. К востоку от неё значения тренда постепенно возрастают, достигая максимумов у северо- и юго-восточных контактов с вмещающими толщами. В западном теле трубки Удачная доломит распределён более равномерно. Повышенные концентрации минерала приурочены к приконтактной зоне (но не к самим контактам) в восточной и южной частях тела, в меньшей степени к его северному флангу, а непосредственно у контактов с вмещающими породами концентрация доломита уменьшается (см. рис. 1). Распределение нормативных количеств доломита на верхнем из изученных горизонтов в восточном теле (см. рис. 1, А) наиболее низкое и распределение его достаточно равномерное. Некоторое повышение значений тренда наблюдается у южных и северо-западных контактов с вмещающими породами. В западном теле этого горизонта тренд доломита характеризуется чёткой зональностью – минимальные значения в центре трубки и постепенное увеличение содержания к периферии.

**Арагонит** ( $\text{CaCO}_3$ ) образует в кимберлитах отдельные трубок прожилки, почковидные агрегаты радиально-лучистого и сноповидного строения, а также друзы игольчатых кристаллов. Обычно кристаллы арагонита хорошо огранены. Гониометрическими исследованиями установлены ромбическая дипирамида и призма, придающая арагону игольчатый габитус. В отдельных случаях (трубки Юбилейная, Заполярная, Новинка, Поисковая и др.) мелкие прожилки сложены агрегатами арагонита, близкими к сферическим [18, 36–38]. Бугорчатая поверхность таких прожилков напоминает натёчные агрегаты. Минерал обычно бесцветный, а в агрегатах белый с шелковистым блеском. Между отдельными сферами арагонита отмечены агрегаты серпентина, карбонатов и других новообразований. В смесях минерал чётко диагностируется рентгенометрически, а также фиксируется по результатам пересчётов на минеральный состав химических анализов пород по разработанной методике [4, 6, 39]. В арагоните выявлены [18] центры излучения  $\text{Mn}^{2+}$ ,  $\text{Sm}^{3+}$  и  $\text{Eu}^{2+}$ , причём излучение марганца наблюдалось в двух полосах –  $560$  и  $625 \text{ нм}$  (рис. 3). При изучении арагонита из кимберлитов трубок Удачная, Якутская, Юбилейная и др. установленное обычное для кальциевых минералов сильное излучение ионов  $\text{Mn}^{2+}$  в изученных образцах проявлено слабо

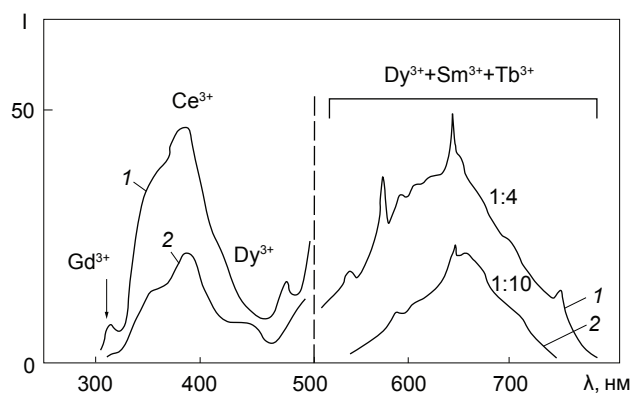


Рис. 3. Типичные спектры рентгенолюминесценции арагонита из кимберлитов трубки Якутская:

образцы: 1 – Як-6 и 2 – Як-2

и представлено сложно-структурированной полосой в области 600–660 нм, что в наибольшей степени соответствует известным данным о двухполосном излучении марганца. Основную часть излучения в арагонитах из кимберлитов Сибирской платформы составляют примесные центры редкоземельных ионов –  $Gd^{3+}$ ,  $Ce^{3+}$ ,  $Dy^{3+}$ ,  $Sm^{3+}$  и  $Tb^{3+}$ . Корреляция между интенсивностью излучения  $Mn^{2+}$  и TR-центров не установлена. Излучение решёточных центров можно связать с полосой ~440 нм, максимально проявляющейся при минимальной роли излучения TR-центров.

В кимберлитах многих кимберлитовых диатрем Сибирской платформы (Мир, Удачная, Юбилейная, Сытыканская, Интернациональная и др.) широко распространён *пироаурит* ( $Mg_6Fe_3^{+2}(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4H_2O$ ) [1, 8–11, 15, 18, 20–22, 40]. Кроме насыщенности минералом основной массы пород многих горизонтов диатрем, довольно часты (особенно в их глубоких частях) прожилки и гнезда волокнистого и кристаллического пироаурита, ассоциирующего с кальцитом, серпофитом и магнетитом. Минерал отмечен в псевдоморфозах по оливину, в изменённых ксенолитах различных пород и включений, совместно с серпентином слагает крупные (до 7 см) зеленовато-серые жеоды. На глубоких горизонтах многих диатрем в ассоциации с серпентином и кальцитом пироаурит встречается в виде голубовато-зелёных ромбоэдрических кристаллов, а иногда и в виде сферических и волокнистых образований, слагающих маломощные прожилки и отдельные жеоды (рис. 5). Кроме волокнистого пироаурита, для кимберлитов

и ксенолитов глубинных пород обычна также пластинчатая разновидность, выполняющая ядра петель серпентинизированного оливина или пустоты выщелачивания. В кимберлитовых диатремах СП пироаурит отмечается [18, 22] в виде кристаллов двух габитусов: ромбоэдрического и пинакоидального (см. рис. 4). Первому типу свойственно одинаковое развитие всех граней (ромбоэдров и пинакоида), отчего кристаллы приобретают псевдооктаэдрический облик. У кристаллов второго типа доминируют грани пинакоида. В одном и том же образце могут встречаться кристаллы пироаурита обеих форм. Окраска минерала обычно неравномерная. Волокнистая разновидность его окрашена обычно в бледно-голубой цвет, а пластинчатая – в сине-зелёный. Изменённые кристаллы минерала приобретают коричневый оттенок. Довольно существенно изменяются и показатели преломления минерала: волокнистая разновидность –  $n_o = 1,560–1,565$ ,  $n_1' = 1,545$ , пластинчатая –  $n_o = 1,567–1,570$ ,  $n_1' = 1,539–1,540$ . На дифрактограммах новообразований, содержащих пироаурит, 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:  $a_o = 0,3103$ ,  $c_o = 2,3400$  нм. На кривых ДТА дериватограмм пироауриту соответствуют чёткие эндотермические эффекты при 210–285 (выделение кристаллизационной воды) и 460–485 °С (дегидратация и диссоциация  $MgCO_3$ ).

Пироаурит является довольно характерным прожилковым минералом для многих кимберлитовых диатрем Сибирской платформы, ассоциируя с другими новообразованиями. Так, в разрезе глубоких горизонтов трубки Мир, вскрытых разведочной скважиной 55 (см. рис. 5), отмечается довольно частая смена петрографических типов кимберлитов. Чёткой закономерности в распределении по типам кимберлитов изученного разреза (до 1200 м) как реликтовых, так и вторичных минералов не отмечено. Вместе с тем анализ смены на глубину прожилковой минерализации показал, что нередко вместо исчезнувших образований появляются другие. Гипс установлен в верхней части диатремы (до глубины примерно 625 м). Только в отдельных горизонтах (615–660 м и др.) отмечен целестин, ассоциирующий обычно с ограниченным кальцитом. На глубоких горизонтах диатремы часто встречается галит, обычно с ангидритом и реже с гипсом. Во многих частях изучаемого

разреза в виде прожилков описаны голубоватые и голубовато-зелёные выделения пирроаурита, часто вместе с галитом. Волокнистые агрегаты пирроаурита в таких случаях выросли на стенках трещин и впоследствии были сцементированы галитом. Длина уплощённых волокон минерала здесь достигает 0,5 см. Не все окна расположены перпендикулярно к субстрату, а часть из них наклонена под небольшим углом или залегает почти параллельно стенкам (хотя их «корни» перпендикулярны к основанию). Изучение таких участков разреза в штуфах позволило предполагать, что до того, как отложился галит, вдоль трещин произошло смещение блоков и загибание волокнистых агрегатов пирроаурита, образовавшихся раньше. Иногда выделения пирроаурита с галитом обожрены за счёт повышенной концентрации в цементе гидроксидов железа. В этих случаях на плоскости

трещин параллельно расположены лейстовидно-волоконистые выделения пирроаурита синевато-зелёного цвета, который в отдельных участках переходит в белую асбестовидную разновидность минерала. Волокна последнего обычно параллельны друг другу в плоскости стенок трещин, на которых спорадически встречаются конусовидные выделения гидроксидов железа. Кроме описанных выделений минерала в ассоциации с галитом, пирроаурит в кимберлитовых диатремах (Мир, Юбилейная и др.) отмечен в виде тонких волосовидных прожилков, а также агрегатов различной формы и размеров. Часто минерал вместе с серпентином слагает крупные (до 7 см) зеленовато-серые жеоды, имеющие обычно зональное строение. В ряде разрезов отмечено зональное строение псевдоморфоз серпентина, центральная часть которых имеет тёмно-зелёную окраску, а периферическая –

Пирроаурит  $Mg_6Fe_2^{3+}(CO_3)(OH)_{16} \cdot 4H_2O$  Piroaurite

тригональная сингония

дитригонально-скаленоэдрический вид симметрии.  $D_{3d} - 3\bar{m} (L_3 3L_2 3PC)$

$a:c = 1:7,519$

Формы	$\varphi$	$\rho$
0001	—	0°00'
$10\bar{1}4$	30°00'	65 16
$01\bar{1}2$	-30°00'	77 02

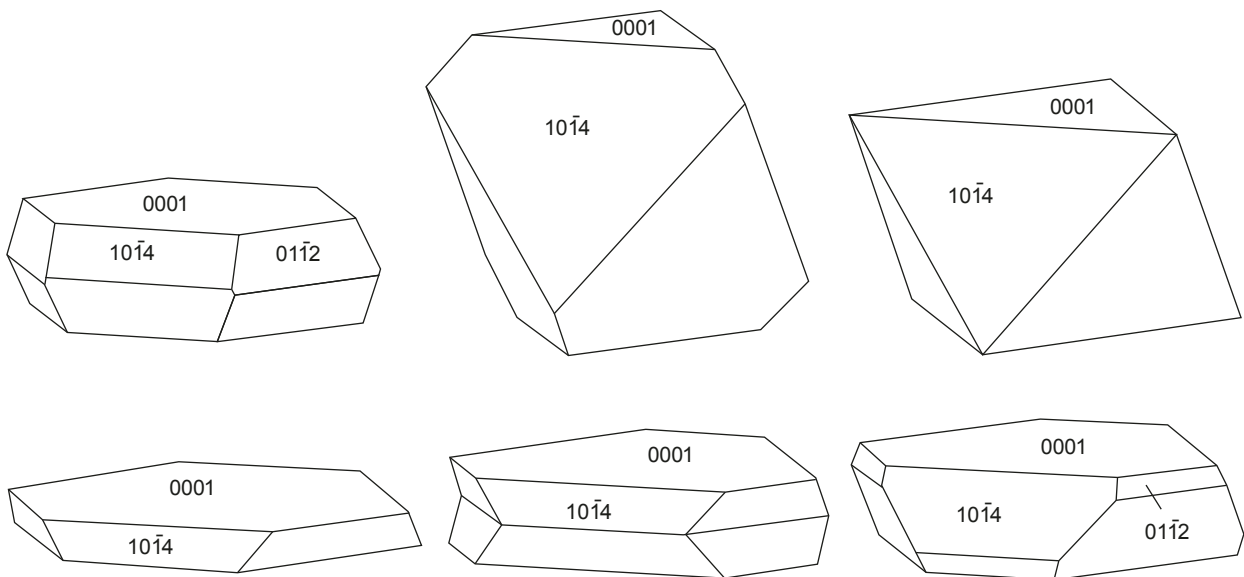


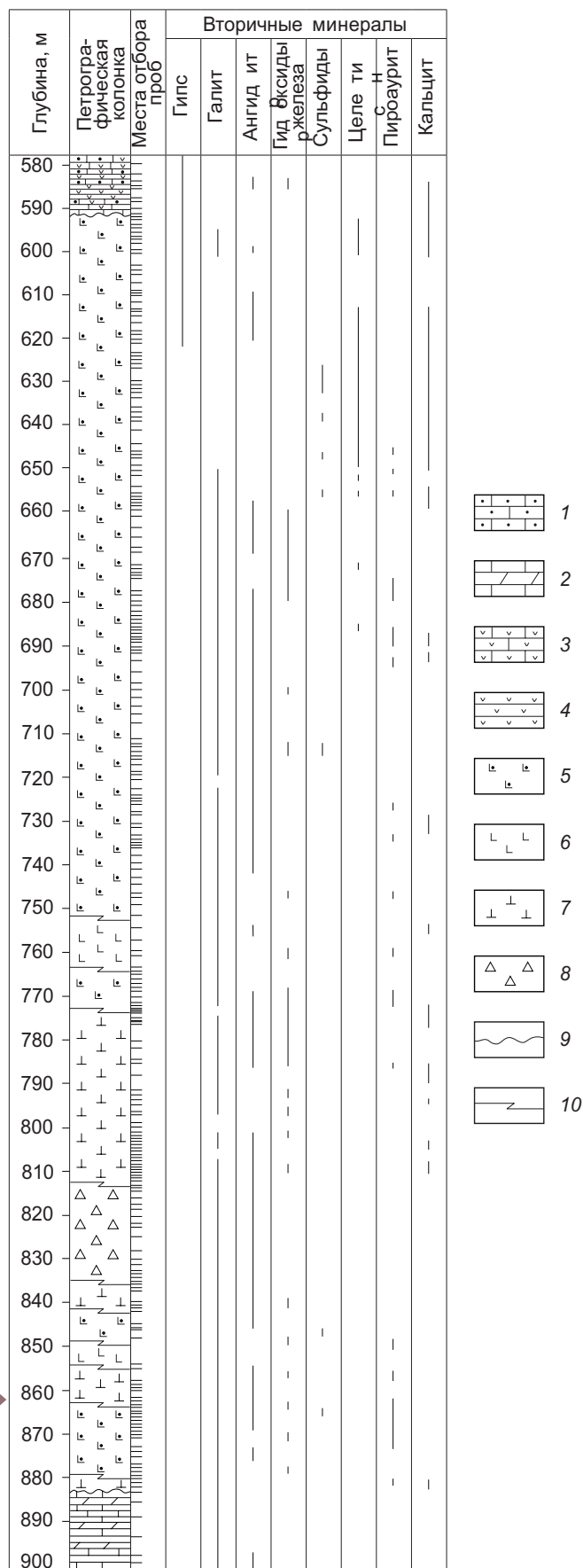
Рис. 4. Морфологические типы кристаллов пирроаурита из кимберлитов трубки Юбилейная. С использованием материалов Б. П. Антонюка

более светлую. Внутри обеих зон таких псевдоморфоз наблюдаются мелкие (до 5 мм) выделения пирроаурита. Последний часто встречается и среди жильных образований в серпентинитизированных кимберлитовых брекчиях, где ассоциирует с галитом, кальцитом и ангидритом. Пирроаурит здесь образует полусферы, которые покрыты бесцветными более поздними минералами.

Пирроаурит – характерный минерал и для основной массы кимберлитовых диатрем СП. Так, результаты пересчётов химических анализов (с рентгеновским контролем) кимберлитов из разрезов, вскрывших разведочными скважинами глубокие горизонты трубки Мир, показали, что пирроаурит в отдельных интервалах является породообразующим минералом (до 14% состава основной массы), ассоциируя с серпентином, кальцитом, хлоритом, оксидами и гидроксидами железа. Существенные концентрации пирроаурита отмечены при изучении кимберлитовых пород трубок Сытыканская, Юбилейная, Удачная и др. Особенно повышенные концентрации минерала зафиксированы (рис. 6, А–Б) в породах трубки Сытыканская, сложенной [10, 18, 22] двумя типами кимберлитовых пород (кимберлитовой брекчией и кимберлитовой брекчией с массивной текстурой цемента), состоящих из обломков ксеногенного материала, оливина, граната, ильменита, многочисленных включений родственных пород, сцементированных серпентиновым или карбонат-серпентиновым агрегатом и другими новообразованиями. В отдельных горизонтах этой диатремы (особенно ниже 280 м) пирроаурит выполняет многочисленные прожилки, линзочки и пустоты различной формы и размеров, достигающих иногда до 4 см в поперечнике.

**Рис. 5. Схема распределения жильных вторичных минералов в кимберлитах глубоких горизонтов трубки Мир (по разведочной скважине 55):**

1–3 – известняки: 1 – песчанистые, 2 – доломитистые, 3 – с выделениями гипса; 4 – гипсы; 5–9 – брекчия: 5 – автолитовая кимберлитовая, 6 – кимберлитовая с массивной текстурой цемента, 7 – крупнопорфировая кимберлитовая, 8 – кластопорфировая кимберлитовая; 9 – граница между кимберлитами и вмещающими трубку породами; 10 – условные границы между отдельными типами кимберлитов



Минерал характеризуется голубоватой и голубовато-зелёной окраской, варьирующей в зависимости от степени изменённости минерала и его парагенезисов (с кальцитом, серпентином и другими новообразованиями), чётко диагностируется на дифрактограммах (рис. 7). В отдельных интервалах (300–500 м и др.) кимберлит разбит многочис-

ленными тонкими (волосовидными) прожилками и микропрожилками, выполненными пироауритом и кальцитом. Частое расположение таких прожилков (через 3–4 см друг от друга), а также их непостоянная мощность (отмечаются многочисленные пережимы и раздувы) придают отдельным участкам породы петельчатый и пятнистый облик.

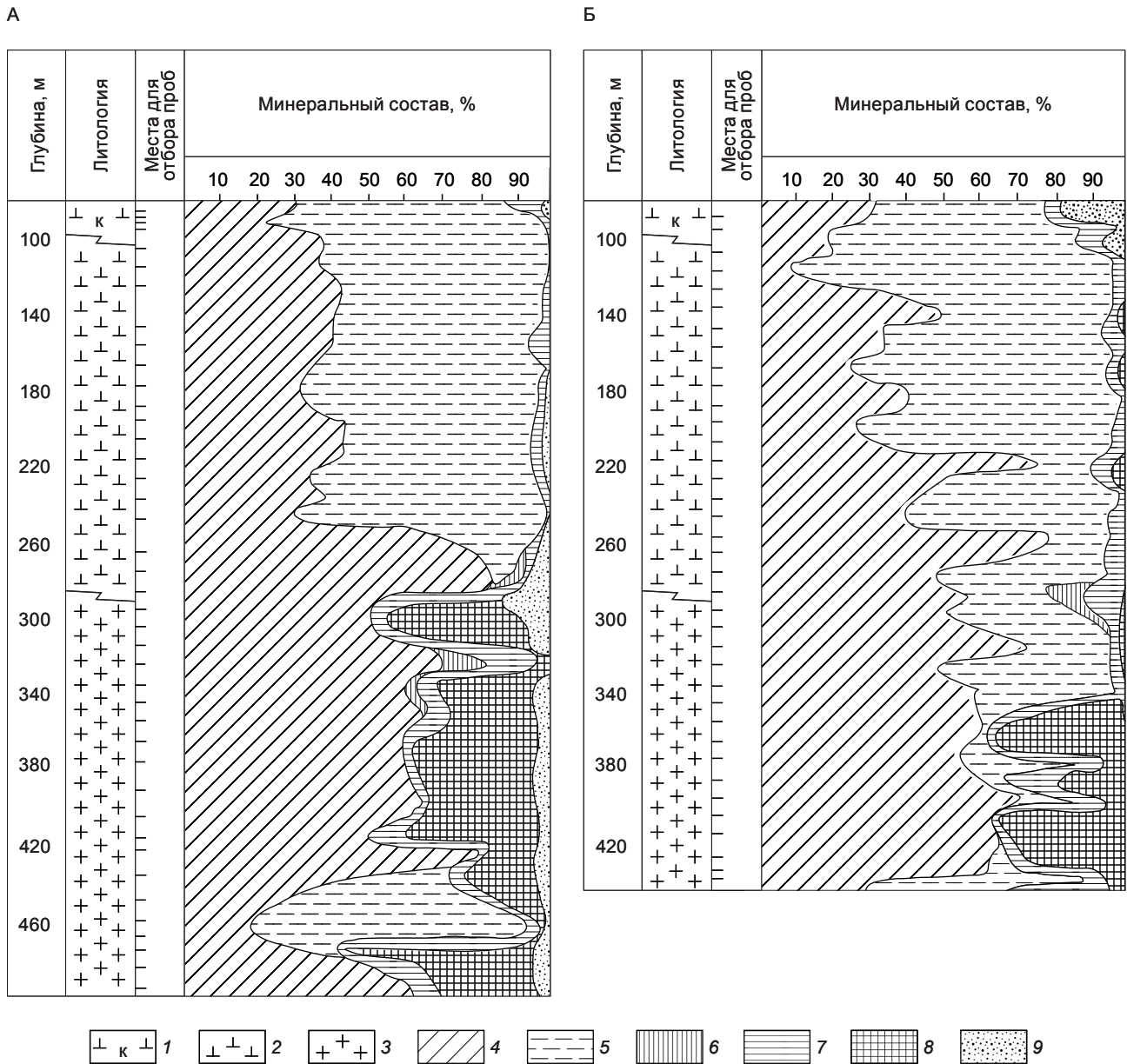


Рис. 6. Распределение вторичных минералов в основной массе кимберлитов трубки Сытыканская по скважинам 98 (А) и 112 (Б):

породы: 1 – выветрелые кимберлиты, 2 – кимберлитовые брекчии с массивной текстурой цемента, 3 – кимберлитовые брекчии; минеральный состав (в %): 4 – серпентин, 5 – кальцит, 6 – доломит, 7 – изменённый флогопит и хлорит, 8 – пироаурит, 9 – прочие минералы

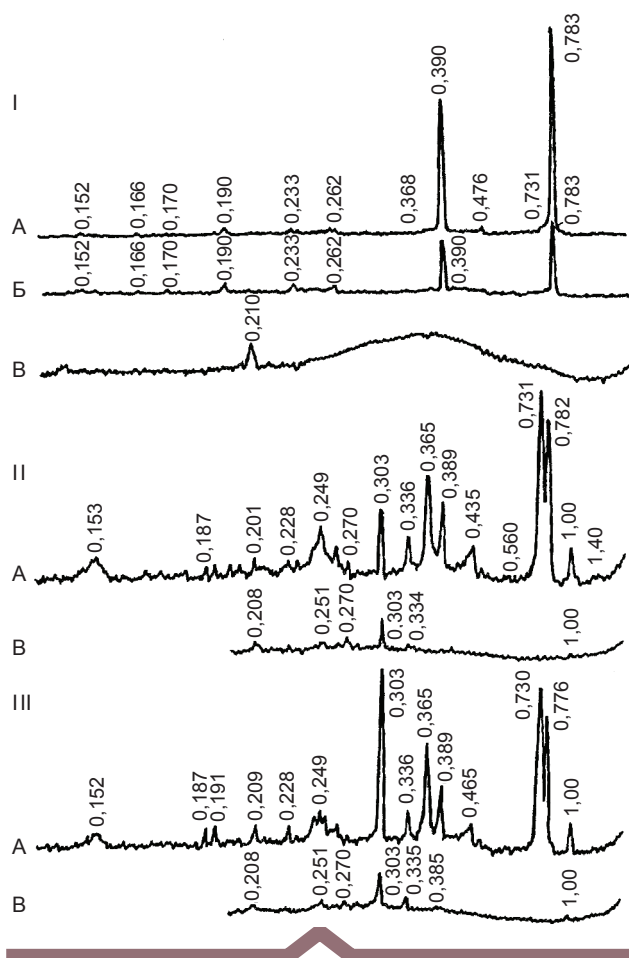


Рис. 7. Дифрактограммы фракции мельче 0,005 мм вторичных образований, обогащённых пирроауритом:

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

Фиксируются также прожилки голубоватого пирроаурита, ассоциирующего с тонкозернистым магнетитом и грязно-буроватым серпентином. Довольно часто в кимберлитах глубоких горизонтов диатремы встречаются концентрически-зональные стяжения (до 3 см в поперечнике), сложенные пирроауритом и кальцитом. В основной массе кимберлитовых брекчий отдельных горизонтов трубки Сытыканская (как и Удачная, Мир, Юбилейная и др.) существенно увеличивается (до 40%) концентрация пирроаурита, что придаёт породе голубоватый оттенок, отличая её от других типов кимберлитов.

Из других эпизодически встречаемых в небольших концентрациях минералов класса карбонаты в кимберлитах Сибирской платформы идентифицированы [9–11, 13, 15, 16, 18–20, 24] стронцианит,

магнетит, гидромагнетит и хантит. **Стронцианит** ( $\text{SrCO}_3$ ) в кимберлитах многих диатрем образует веерообразные друзы или сплошные скопления игольчатых кристаллов (рис. 8, А, Б). Часто минерал ассоциирует с целестином, нарастая на поверхности его кристаллов. Обычно он бесцветный с показателями преломления:  $n'_g = 1,663$ ,  $n'_p = 1,535$ . Грани целестиновых кристаллов часто обнаруживают черты частичного растворения. По рентгенодифрактометрическим данным (серия рефлексов на дифрактограммах 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), этот минерал следует относить к кальциостронцианиту. **Магнетит** ( $\text{MgCO}_3$ ) установлен [10, 18, 22] на двух верхних опорных горизонтах

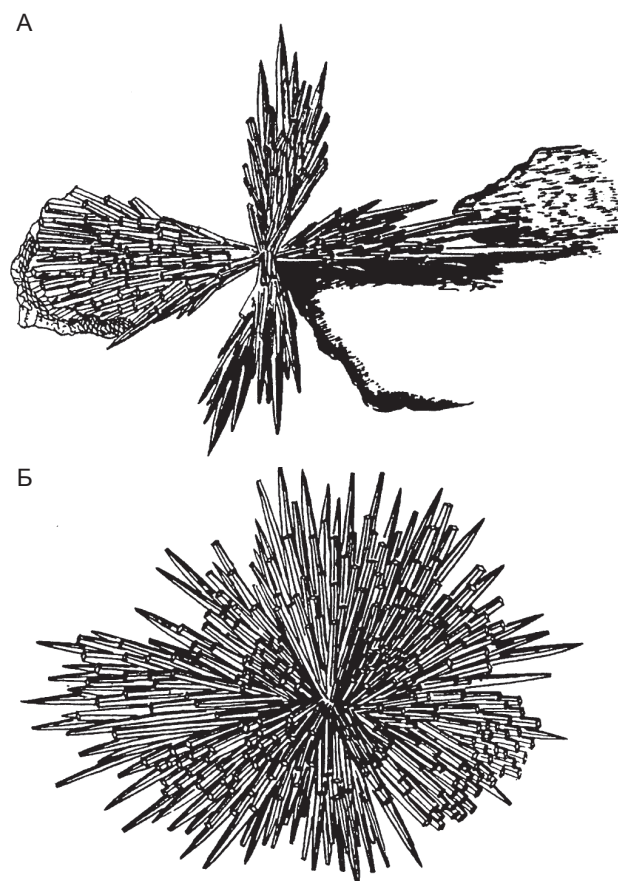


Рис. 8. Кристаллообразная (А) и игольчатая (Б) друзы кристаллов стронцианита из кимберлитов трубки Удачная:

образцы: А – У-216, Б – УЗ-21; увеличение 15

многих кимберлитовых диатрем Сибирской платформы в смеси с другими новообразованиями. Довольно часто он ассоциирует с хантитом, слабая тонкие прожилки, или встречается в бруситизированных кимберлитах. Минерал уверенно диагностируется в смеси рентгенографически по серии рефлексов с межплоскостными расстояниями, равными 0,2741; 0,2104 и 0,1930 нм. **Гидромагнетит** ( $Mg_3(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$ ) встречается в виде белых натёчных рыхлых агрегатов на различных минералах и новообразованиях в верхних частях многих диатрем СП, иногда в смеси с артинитом (рис. 9, А–Г). Отмечаются [18] жеоды гидромагнетита размером до нескольких миллиметров (рис. 10, А, Г). Кристаллы его в жеодах воднопрозрачные удлинённо-таблитчатого лейстовидного облика. Показатели преломления минерала следующие:  $n'_g = 1,546–1,552$ ,  $n'_p = 1,528–1,531$ . 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. На кривых ДТА дериватограмм минералу принадлежит ряд характерных эндотермических эффектов. Дегидратация и частичная диссоциация гидромагнетита происходит при температуре 330 °С, а диссоциация магниальной составляющей этого карбоната – в интервале температур 420–550 °С. **Хантит** ( $CaMg_3(CO_3)_4$ ) обнаружен в ряде кимберлитовых диатрем (Сытыканская, Заполярная, Маршрутная, Поисковая, Молодость и др.) Сибирской платформы, где

в верхних горизонтах выполняет многочисленные трещины и пустоты. Мощность прожилков колеблется от долей миллиметра до 5 см. В отдельных диатремах Верхнемунского кимберлитового поля (Новинка, Заполярная и др.) прожилки встречаются в большом количестве до глубины 100 м от поверхности, что может быть связано с границей влияния гипергенных процессов. Минерал в прожилках и пустотах представлен тонкодисперсным белым порошковидным агрегатом, наполняющим мел. В приповерхностных участках диатрем минерал окрашен гидроксидами железа в буроватые и кремовые тона. С глубиной увеличивается плотность минерала, который растворяется при нагревании в соляной кислоте. На дифрактограммах минералу отвечают отражения с межплоскостными расстояниями, равными 0,361; 0,282; 0,2592; 0,2423; 0,2367; 0,2180; 0,1964; 0,1758 и 0,1580 нм. Нередко хантит встречается в смеси с магнетитом, где его диагностика возможна только с помощью точных физико-химических методов исследований (рис. 11).

**Заключение.** Таким образом, по результатам проведённых исследований можно говорить об особенностях генезиса некоторых карбонатов из кимберлитовых трубок СП. По имеющимся минералогическим данным, образование доломита в кимберлитах во времени охватывает довольно широкий интервал: начало процессов метасоматоза верхнемантийных пород (наличие включений доломита в титан-клиногумите и К-рихтерите), а заключительные стадии – пневматолитово-гидро-

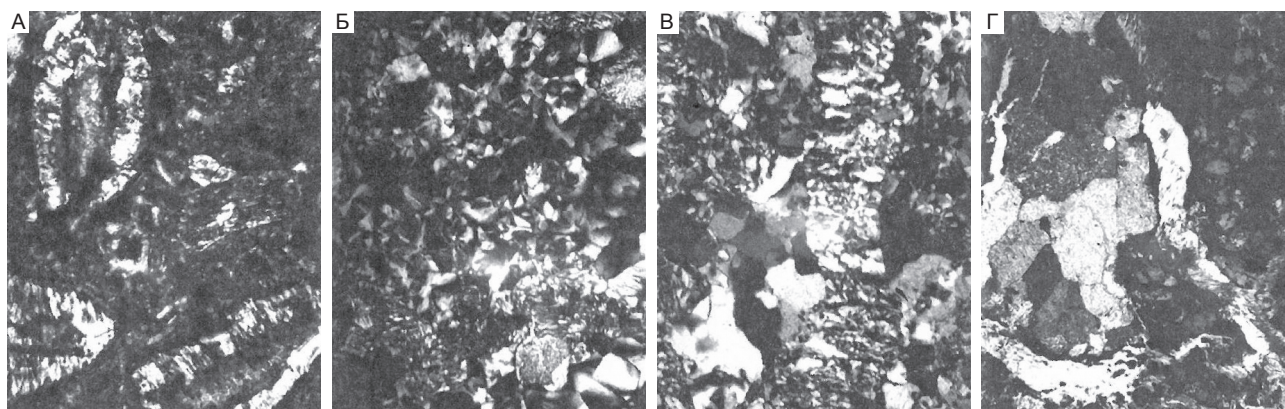


Рис. 9. Новообразования в кимберлитовых породах верхних горизонтов трубки Удачная, обогащённых гидромагнетитом:

доминирующие минералы: А – гидромагнетит (шлиф У-3-2), Б – сферолиты халцедона (шлиф У-26-10), В – прожилки гипса в кварце (шлиф У-26-8), Г – серия прожилков гипса в кимберлите (шлиф У-28-3а)

термальные стадии процессов в пустотно-трещинных образованиях остывающего магматического (кимберлитового) расплава. Этим можно объяснить повышенную частоту встречаемости доломита в виде тонкоагрегатных сростаний с ангидритом, целестином и кальцитом и чрезвычайную редкость его самостоятельных выделений в кимберлитах в целом. Доломиты из кимберлитов по основным люминесцентным характеристикам (конфигурацией спектра и интенсивности излучения) практически не выделяются из массы иных генетических разновидностей данного минерала. Это пока делает проблематичным использование их как типоморфных или индикаторных признаков при изучении процессов вторичного минералообразования в кимберлитовых диатремах. Однако сопоставление данных ИКС и индикаторного фактора доломитизации позволяет всё же использовать люминесцентный способ оценки фазового состава тонкодисперсных кальцит-доломитовых образований из кимберлитов для изучения этих образований, учитывая при этом простоту и экспрессность метода.

Проведённые исследования позволяют утверждать, что основная масса карбонатов (в том числе и доломита) относится к вторичным образованиям. Характерная особенность карбонатных образований из кимберлитов – отсутствие существенного количества минералов этого класса на основе таких элементов, как  $Fe^{2+}$  (сидерита). Исследованиями установлено, что источником  $CO_2$  для образования различных генераций карбонатных минералов являются глубинные эманации и углекислый компонент, выделяющийся при окислении органических веществ, а также многочисленный ксеногенный материал из вмещающих кимберлитовые диатремы пород. Приток слабокислых растворов привёл затем к частичному растворению поверхности минералов с последующей регенерацией граней. Форма кристаллов заметно изменялась в плане диатрем и очень мало – на глубину. Гидротермальное выщелачивание кимберлитов наиболее интенсивно проявилось в краевых частях трубок. При этом вдоль трещин произошло выщелачивание породы, заключавшееся в растворении карбонатов и частичном разрушении силикатов магния. Такое воздействие кислых растворов привело к появлению в кимберлите небольших пустот и каверн. Отсутствие среди упомянутых образований заметного количества гипса и наличие сульфидов железа свидетельствует о том, что главными факторами,

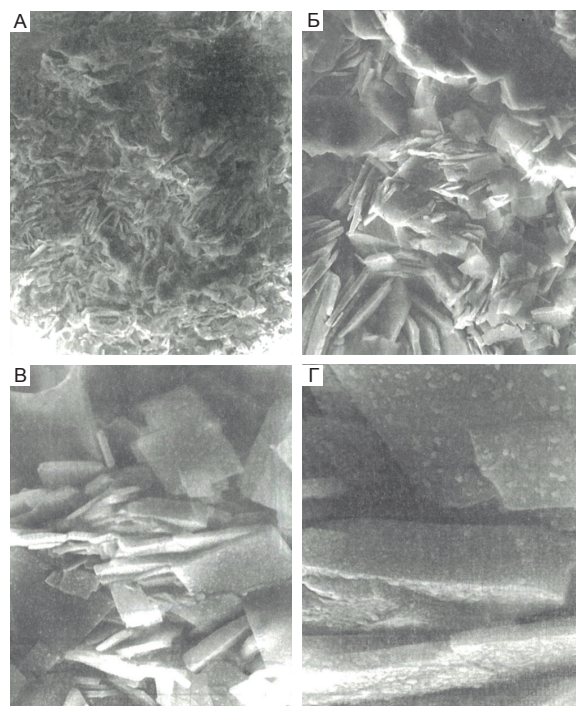
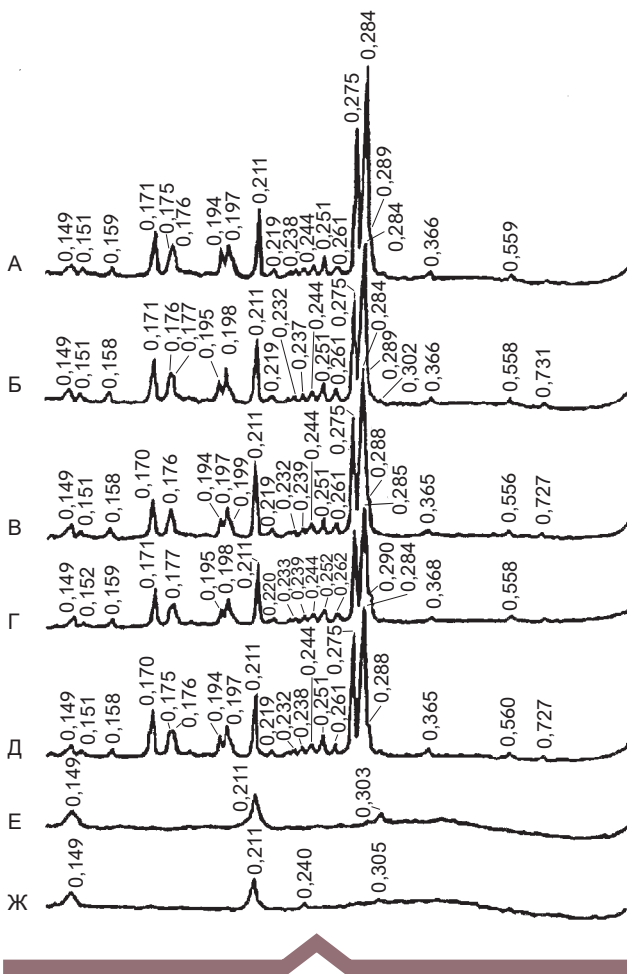


Рис. 10. Растровые электронные фотографии выделений гидромагнезита в кимберлитах трубки Удачная (обр. У-3-18):

увеличение: А – 300, Б – 1000, В – 3000, Г – 10 000

влияющими на повышение кислотности растворов, могли быть такие, в обычных условиях слабые, кислоты, как угольная и сероводородистая. Поскольку выщелачиванием охвачен значительный объём породы, можно предположить, что растворы находились под большим давлением  $CO_2$ , поскольку в этих условиях угольная кислота создаёт сильноокислую среду. Вызванное тектоническими подвижками падение давления привело к утечке  $CO_2$ , повышению pH раствора и выпадению из него новых карбонатных минералов, а также генерации частично растворённых ранних индивидов, граница между которыми отбивается как по «присыпкам», так и по цвету (нарастание минералов более прозрачных). Выщелачивание кимберлита с образованием кавернозных участков в западном теле трубки Удачная проходило при переменном окислительно-восстановительном потенциале раствора с преобладанием восстановительных его свойств. Последнее подтверждается обилием сульфидов железа среди вторичных карбонатов, цементирующих не успевшие полностью раствориться агрегаты серпентина и первичные минералы. При



**Рис. 11. Диффрактограммы новообразований из кимберлитов трубки Заполярная, обогащённых хантитом и магнетитом:**

препараты: А – исходный, Б–Ж – прокалённые в течение двух часов соответственно при 100, 200, 300, 500, 600 и 700 °С

растворении кимберлитов, сложенных кальцитом и силикатами магния, произошла нейтрализация растворов с повышением pH, что вызвало выпадение новых карбонатов и других новообразований, возникших из аутигенного вещества. Процессы растворения кимберлитов повторялись, о чём свидетельствует многообразие скаленоэдрических выделений кальцита, который вместе с доломитом являются обычно порообразующими минералами, генетически связанными с толщами вмещающих диатремы карбонатных и терригенно-карбонатных пород. Это подчёркивается также обогащением приконтактных участков диатрем ксенолитами пород вмещающих толщ и поступлением

в кимберлиты соответствующих, обогащённых CaO и CO<sub>2</sub>, растворов. На минералообразующие растворы существенное влияние оказывали и глубинные газовые эманации, обогащённые CO<sub>2</sub>, приводящие в движение водные растворы. Отмеченные особенности распределения преобладающих карбонатных минералов могут быть успешно использованы как при уточнении геологического строения диатрем, так и при совершенствовании некоторых технологических процессов обогащения кимберлитов.

Образование пироаурита в кимберлитовых диатремах происходит из углекислых растворов магния при взаимодействии их с растворимыми солями окисного железа. Повышенное содержание в растворе соды отмечено для отдельных разрезов, вскрывших глубокие горизонты многих диатрем. В некоторых исследованных пробах выявлено сравнительно высокое содержание NaSO<sub>4</sub>. Химический анализ гидропроб из метегеро-ичерского горизонта трубки Мир (одного из основных водоносных горизонтов месторождения) показал наряду с высоким содержанием кальция, магния и хлора повышенные концентрации натрия и серного ангидрида. Сульфат натрия и сода, которая повышает pH раствора, характерны для трещинных вод кимберлитовых тел рассматриваемого региона. Возможно также в качестве исходного вещества хлорное железо (в основном глубинного происхождения), и тогда в качестве побочного продукта образуется NaCl. Анализ природных ассоциаций пироаурита в кимберлитовых диатремах СП позволяет утверждать, что оба варианта его происхождения вполне возможны. Образование пироаурита происходит при значительной роли растворимого в воде хлорного железа в нейтральных или окислительных (по отношению к железу) условиях и, судя по парагенетической ассоциации с кальцитом, при близком к нейтральному значению pH. Процесс пироауритизации занимает заметные участки кимберлитовых трубок. Немаловажную роль при этом играет содержание в растворе окисного железа. Возможно, определённое количество галита возникло из отработанных при образовании пироаурита растворов. Пироаурит является неустойчивым минералом и при разрушении замещается гидроксидами железа. Разрушение жильного пироаурита часто происходит уже на незначительных глубинах, а поэтому в верхних горизонтах разрабатываемых месторождений изменённый минерал встречается сравнительно

редко. Проведёнными исследованиями установлено широкое распространение пироаурита в кимберлитовых породах СП, причём наиболее характерна пироауритизация для глубоких горизонтов кимберлитовых диатрем, где минерал является пороодообразующим компонентом. Учитывая большую роль пироаурита в процессе технологической отработки месторождений, вопросам изучения пироауритизации кимберлитовых тел следует уделять пристальное внимание, что может быть

достигнуто при комплексном изучении вещественного состава пород с широким применением современных физико-химических методов исследований.

Отмеченные особенности состава и распределения преобладающих карбонатных минералов могут быть успешно использованы как при уточнении геологического строения диатрем, так и при совершенствовании некоторых технологических процессов обогащения кимберлитов.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н. Минерагения древних россыпей алмазов восточного борта Тунгусской синеклизы // Геология и геофизика. – 1987. – № 1. – С. 90–96.
2. 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.
3. Афанасьев В. П., Зинчук Н. Н., Логинова А. М. Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // Записки Российского минералогического общества. – 2009. – Т. 138, № 2. – С. 1–13.
4. 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.
5. 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 алмазоносности Юго-Западной части Сибирской платформы // Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнит. мат-лы 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.
6. Зинчук Н. Н. Геологические исследования при поисках алмазных месторождений // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2021. – № 4. – С. 35–52.
7. Зинчук Н. Н. Докембрийские источники алмазов в россыпях фанерозоя // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2021. – № 3. – С. 50–61.
8. Зинчук Н. Н. Карбонатизация кимберлитов при постмагматических процессах // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2017. – № 4. – С. 63–71.
9. Зинчук Н. Н. Кобы выветривания и их роль в формировании посткимберлитовых осадочных толщ // Руды и металлы. – 2022. – № 2. – С. 100–120.
10. Зинчук Н. Н. Кремнистые минералы в кимберлитах // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2022. – № 4. – С. 38–52.
11. Зинчук Н. Н. Литолого-стратиграфические исследования при алмазописковых работах // Вестник СВФУ. Науки о Земле. – 2023. – № 1 (29). – С. 5–28.
12. Зинчук Н. Н. О геолого-поисковых типах кимберлитовых трубок // Известия Коми НЦ УрО РАН. Науки о Земле. – 2023. – № 2 (60). – С. 43–56.
13. Зинчук Н. Н. О геохимических особенностях разновозрастных образований алмазоперспективных территорий // Отечественная геология. – 2023. – № 1. – С. 42–55.
14. Зинчук Н. Н. Об особенностях флюидных и гидротермальных включений в некоторых минералах кимберлитов // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. – Пермь : ПГНУ, 2023. – Вып. 26. – С. 45–64.
15. Зинчук Н. Н. Особенности алмазоносности разных фаз внедрения кимберлитов // Отечественная геология. – 2017. – № 1. – С. 105–111.
16. Зинчук Н. Н. Особенности гидротермального и гипергенного изменения слюдястых кимберлитов // Вестник Пермского университета. Геология. – 2023. – Т. 22, № 1. – С. 32–50.
17. Зинчук Н. Н. Особенности кальцита из кимберлитовых пород // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2023. – № 2. – С. 28–43.
18. Зинчук Н. Н. Особенности минералов слюд в кимберлитах // Вестник Воронежского университета. Геология. – 2018. – № 2. – С. 29–39.

19. *Зинчук Н. Н.* Особенности петрографического изучения кимберлитовых пород // Отечественная геология. – 2022. – № 4. – С. 34–49.
20. *Зинчук Н. Н.* Особенности серпентинизации кимберлитовых пород // Вестник Воронежского ун-та. Геология. – 2017. – № 3. – С. 66–74.
21. *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.
22. *Зинчук Н. Н.* Роль петролого-минералогических и геохимических исследований в оценке потенциальной алмазности кимберлитов // Отечественная геология. – 2022. – № 1. – С. 36–47.
23. *Зинчук Н. Н.* Сульфаты в кимберлитовых породах // Отечественная геология. – 2023. – № 2. – С. 56–72.
24. *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.
25. *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.
26. *Зинчук Н. Н., Зинчук М. Н.* О специфике термобарических факторов оруденения // Проблемы минералогии, петрографии и металлогении. Научные чтения памяти П. Н. Чирвинского. – Пермь : ПГНУ, 2023. – Вып. 26. – С. 65–86.
27. *Зинчук Н. Н., Зуев В. М., Коптиль В. И., Чёрный С. Д.* Стратегия ведения и результаты алмазопоисковых работ // Горный вестник. – 1997. – № 3. – С. 53–57.
28. *Зинчук Н. Н., Коптиль В. И.* Сравнительные особенности алмазов из коренных источников с высокой плотностью расположения кимберлитовых тел // Известия ВУЗов. Геология и разведка. – 2023. – № 1 (65). – С. 28–42.
29. *Зинчук Н. Н., Мельник Ю. М., Серенко В. П.* Апо-кимберлитовые породы // Геология и геофизика. – 1987. – № 10. – С. 66–72.
30. *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.
31. *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.
32. *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.
33. *Котельников Д. Д., Зинчук Н. Н.* Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в отложениях терригенной формации // Бюллетень Московского общества испытателей природы. Отдел геологический. – 2001. – Т. 76, № 1. – С. 45–53.
34. *Мацюк С. С., Зинчук Н. Н.* Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии. – М. : Недра, 2001. – 428 с.
35. *Савко А. Д., Шевырев Л. Т., Зинчук Н. Н.* Эпохи мощного корообразования в истории Земли. – Воронеж : ВГУ. – 1999. – 102 с.
36. *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.
37. *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.
38. *Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Griffin V. L. et al.* Diamond prospects in the Southwestern plinkt of the Tungusk Sineklise // Geology of ore Deposits. – 2005. – V. 47, № 1. – P. 45–62.
39. *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.
40. *Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Siberian Platform // Petrology. – 2001. – V. 9, № 6. – P. 576–588.

## REFERENCES

1. *Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N.* Minerageniya drevnikh rossypey almazov vostochnogo borta Tungusskoy sineklizy [Minerageny of ancient diamond placers on the eastern side of the Tunguska syneclise], Geologiya i geofizika, 1987, No. 1, pp. 90–96. (In Russ.)
2. *Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Koptil' V. I.* Poligenez almazov v svyazi s problemoy korennykh rossypey severo-vostoka Sibirskoy platformy [Polygenesis of diamonds in connection with the problem of bedrock placers in the northeast of the Siberian Platform], Doklady Akademii nauk, 1998, V. 361, No. 3, pp. 366–369. (In Russ.)
3. *Afanas'yev V. P., Zinchuk N. N., Loginova A. M.* Oso-bennosti raspredeleniya rossypnykh almazov, svyazannykh s dokembriyskimi istochnikami [Features of the distribution of placer diamonds associated with Precambrian sources], Zapiski Rossiyskogo mineralo-

- gicheskogo obshchestva, 2009, V. 138. No. 2, pp. 1–13. (In Russ.)
4. *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 placement of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakut kimberlite province (petrochemical aspect)], *Vestnik Voronezhskogo gosuniversiteta. Geologiya*, 2000, No. 3(9), pp. 37–55. (In Russ.)
  5. *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 chasti Sibirskoy platformy [Prospects for bedrock and alluvial diamond content in the South-western 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, pp. 50–84. (In Russ.)
  6. *Zinchuk N. N.* Geologicheskiye issledovaniya pri poiskakh almaznykh mestorozhdeniy [Geological research in the search for diamond deposits]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2021, No. 4, pp. 35–52. (In Russ.)
  7. *Zinchuk N. N.* Dokembriyskiye istochniki almazov v rossypyakh fanerozoia [Precambrian sources of diamonds in Phanerozoic placers]. *Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya*, 2021, No. 3, pp. 50–61. (In Russ.)
  8. *Zinchuk N. N.* Karbonatizatsiya kimberlitov pri post-magmaticheskikh protsessakh [Carbonatization of kimberlites during post-magmatic processes], *Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya*, 2017, No. 4, pp. 63–71. (In Russ.)
  9. *Zinchuk N. N.* Kory vyvetrivaniya i ikh rol' v formirovani postkimberlitovykh osadochnykh tolshch [Weathering crusts and their role in the formation of post-kimberlite sedimentary strata], *Rudy i metally*, 2022, No. 2, pp. 100–120. (In Russ.)
  10. *Zinchuk N. N.* O spetsifike glinistykh mineralov v osadochnykh formatsiyakh [On the specificity of clay minerals in sedimentary formations], *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2022, No. 1, pp. 10–23. (In Russ.)
  11. *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.)
  12. *Zinchuk N. N.* O geologo-poiskovykh tipakh kimberlitovykh trubok [On geological prospecting types of kimberlite pipes], *Izvestiya Komi NTS UrO RAN. Nauki o Zemle*, 2023, No. 2 (60), pp. 43–56. (In Russ.)
  13. *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.)
  14. *Zinchuk N. N.* Ob osobennostyakh flyuidnykh i gidrotermal'nykh vklyucheniye v nekotorykh mineralakh kimberlitov [On the features of fluid and hydrothermal inclusions in some kimberlite minerals], *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P. N. Chirvinskogo, Perm, PGNU publ.*, 2023, Is. 26, pp. 45–64. (In Russ.)
  15. *Zinchuk N. N.* Osobennosti almazonosnosti raznykh faz vnedreniya kimberlitov [Features of diamond potential of different phases of kimberlite intrusion], *Otechestvennaya geologiya*, 2017, No. 1, pp. 105–111. (In Russ.)
  16. *Zinchuk N. N.* Osobennosti gidrotermal'nogo i giper-gennogo izmeneniya slyudistykh kimberlitov [Features of hydrothermal and supergene alteration of mica kimberlites], *Vestnik Permskogo universiteta. Geologiya*, 2023, V. 22, No. 1, pp. 32–50. (In Russ.)
  17. *Zinchuk N. N.* Osobennosti kal'tsita iz kimberlitovykh porod [Features of calcite from kimberlite rocks], *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2023, No. 2, pp. 28–43. (In Russ.)
  18. *Zinchuk N. N.* Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of micas minerals in kimberlites]. *Vestnik Voronezhskogo universiteta. Geologiya*, 2018, No. 2, pp. 29–39. (In Russ.)
  19. *Zinchuk N. N.* Osobennosti petrograficheskogo izucheniya kimberlitovykh porod [Peculiarities of petrographic study of kimberlite rocks], *Otechestvennaya geologiya*, 2022, No. 4, pp. 34–49. (In Russ.)
  20. *Zinchuk N. N.* Osobennosti serpentinizatsii kimberlitovykh porod [Features of serpentization of kimberlite rocks], *Vestnik Voronezhskogo un-ta. Geologiya*, 2017, No. 3, pp. 66–74. (In Russ.)
  21. *Zinchuk N. N.* Osobennosti sostava i raspredeleniya slyudistykh 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.)
  22. *Zinchuk N. N.* Rol' petrologo-mineralogicheskikh i geokhimicheskikh 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, pp. 36–47. (In Russ.)
  23. *Zinchuk N. N.* Sul'faty v kimberlitovykh porodakh [Sulfates in kimberlite rocks], *Otechestvennaya geologiya*, 2023, No. 2, pp. 56–72. (In Russ.)

24. *Zinchuk N. N.* Tipomorfnyye svoystva indikatornykh mineralov kimberlitov i ikh ispol'zovaniye pri prognozirovaniy 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, pp. 41–56. (In Russ.)
25. *Zinchuk N. N., Afanas'yev V. P.* Geneticheskiye tipy i osnovnyye zakonomernosti formirovaniya almazonosnykh rosspyey [Genetic types and main patterns of formation of diamond placers]. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Geologiya i razvedka*, 1998, No. 2, pp. 66–71. (In Russ.)
26. *Zinchuk N. N., Zinchuk M. N.* O spetsifike termobaricheskikh faktorov orudneniya [On the specifics of thermobaric factors of mineralization], *Problemy mineralogii, petrografii i metallogenii. Nauchnyye chteniya pamyati P. N. Chirvinskogo, Perm, PGU publ.*, 2023, Is. 26, pp. 65–86. (In Russ.)
27. *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, pp. 53–57. (In Russ.)
28. *Zinchuk N. N., Koptil' V. I.* Sravnitel'nyye osobennosti almazov iz korennykh istochnikov s vysokoy plotnost'yu raspolozheniya kimberlitovykh tel [Comparative features of diamonds from primary sources with a high density of kimberlite bodies], *Izvestiya VUZov. Geologiya i razvedka*, 2023, No. 1 (65), pp. 28–42. (In Russ.)
29. *Zinchuk N. N., Mel'nik Yu. M., Serenko V. P.* Apokimberlitovyye porodny [Apokimberlite rocks]. *Geologiya i geofizika*, 1987, No. 10, pp. 66–72. (In Russ.)
30. *Kotel'nikov D. D., Zinchuk N. N.* Ob anomalii obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhenii 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 gos-universiteta. Seriya geologiya*, 2003, No. 2, pp. 57–68. (In Russ.)
31. *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, pp. 53–63. (In Russ.)
32. *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, pp. 53–61. (In Russ.)
33. *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, pp. 45–51. (In Russ.)
34. *Matsyuk S. S., Zinchuk N. N.* Opticheskaya spektroskopiya mineralov verkhney mantii [Optical spectroscopy of minerals of the upper mantle], *Moscow, Nedra*, 2001, 428 p. (In Russ.)
35. *Savko A. D., Shevyrev L. T., Zinchuk N. N.* Epokhi moshchnogo koroobrazovaniya v istorii Zemli [Epochs of powerful crust formation in the history of the Earth], *Voronezh, VGU publ.*, 1999, 102 p. (In Russ.)
36. *Khar'kov A. D., Zuyenko V. V., Zinchuk N. N., Kryuchkov A. I., Ukhanov A. V., Bogatykh M. M.* Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites]. *Moscow, Nedra*, 1991, 304 p. (In Russ.)
37. *Khitrov V. G., Zinchuk N. N., Kotel'nikov D. D.* Primeneniye klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonomernostey 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, pp. 1228–1233. (In Russ.)
38. *Afanas'ev V. P., Zinchuk N. N., Griffin V. L.* et al. Diamond prospects in the Southwestern plinkt of the Tungusk Sineklise, *Geology of ore Deposits*, 2005, V. 47, No. 1, pp. 45–62.
39. *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, pp. 1297–1301.
40. *Serov I. V., Garanin V. K., Zinchuk N. N., Rotman A. Ya.* Mantle Sources of the kimberlite Vorcanism of the Siberian Platform, *Petrology*, 2001, V. 9, No. 6, pp. 576–588.

Статья поступила в редакцию 20.08.23; одобрена после рецензирования 02.10.23; принята к публикации 12.10.23.  
The article was submitted 20.08.23; approved after reviewing 02.10.23; accepted for publication 12.10.23.