

## **ОБ ОСОБЕННОСТЯХ ИЗУЧЕНИЯ ПОСТМАГМАТИЧЕСКИХ И ГИПЕРГЕННЫХ ИЗМЕНЕНИЙ КИМБЕРЛИТОВЫХ ПОРОД**

**Н. Н. Зинчук**

*Западно-Якутский научный центр АН Республики Саха (Якутия), Мирный*

Поступила в редакцию 29 марта 2017 г.

**Аннотация:** *Охарактеризованы методы изучения постмагматического и гипергенного изменения кимберлитовых пород, а также идентификации вторичных минералов и их ассоциаций. Показано, что процессы вторичного минералообразования проходили в большом интервале температур и вызванного их спадом изменения реакции среды от щелочной к кислой с последующей нейтрализацией, что зафиксировалось в форме растворения, дорастания и возникновения новых генераций вторичных минералов.*

**Ключевые слова:** *кимберлиты, постмагматические и гипергенные процессы, вторичные минералы.*

### **ABOUT POSTMAGMATIC AND HYPERGENE ALTERATIONS OF KIMBERLITE ROCKS INVESTIGATION**

**Abstract:** *Methods of studying postmagmatic and hypergene alteration of kimberlite rocks, as well as identifying secondary minerals and their associations are characterized. It is shown that processes of secondary mineral formation took place in a large interval of temperatures and caused by their drop change of medium reaction from alkaline to acidic with subsequent neutralization, which was registered in the form of dissolution, additional growth and emergence of new generations of secondary minerals.*

**Key words:** *kimberlites, postmagmatic and hypergene processes, secondary minerals.*

При изучении кимберлитов – главных поставщиков алмазов на земную поверхность, главное внимание исследователями уделяется реликтовым структурам и текстурам исходной породы, по которым построены практически все классификации кимберлитовых пород [1, 2]. Основное внимание обычно придается изучению псевдоморфоз, их форм и расположения в породе. Незаслуженно малая роль при этом отводится исследованию цементирующей массы этих уникальных природных магматитов [4-11]. В кимберлитовых породах, в которых сохранилось реликтовое строение, цементирующая масса в основном представлена: а) субмикроскопическим серпентином; б) пелитоморфным карбонатом; в) стекловатым веществом. Многие исследователи считают, что и серпентин цемента представляет собой апостекло, хотя в свежем виде в кимберлитах оно никем и никогда не описывалось. Стекло не обнаружено также в обломочном материале этих пород. К постмагматическим преобразованиям кимберлитов обычно относятся [5-7, 9-11] изменения, которые претерпели магматические породы в пневмолито-гидротермальную стадию метаморфизма. Верхней температурной границей обычно указывается 600°C, т.е. температура, при которой от магматического расплава отщепляется флюид, а нижней можно условно считать температуру кипения воды, хотя некоторые минералы возникают и

при более низких температурах. Наряду с аутометаморфическими процессами, протекающими в обстановке, близкой к изохимической, в кимберлитовых телах широко распространен метасоматоз (аутометасоматоз). Под новообразованиями кимберлитов мы [6, 11] понимаем все минералы, сформировавшиеся из термальных растворов, под которыми подразумеваются не только постмагматические ювенильные, но и образовавшиеся как в период формирования трубок, так и на более поздних этапах их становления, в том числе и в гипергенных условиях. Сложными и дискуссионными являются вопросы количественного определения конкретных минералов-новообразований в породе, что с достаточной точностью не удастся выполнить существующими физическими методами исследований вещества. Поэтому химические анализы кимберлитов, кроме выяснения петрохимических особенностей пород, нами использовались для пересчетов на минеральный состав по методике, разработанной совместно с Ю. М. Мельником [4, 7, 11]. Для эффективного использования этого метода важным является параллельное изучение этих же проб с помощью рентгенодифрактометрического метода, дающего для общего контроля фазовый перечень присутствующих в породах минералов. При пересчетах химических анализов кимберлитов учитывались не только вторичные минералы, но и некоторые релик-

товые. В первую очередь при таких пересчетах определяются компоненты кальциевых минералов, поскольку для них характерны различные радикалы и обычно не типичны широкие изоморфные замещения. Из кальциевых минералов в кимберлитовых породах установлены кальцит, доломит, гипс, перовскит и апатит. Поскольку последний является обычным образованием кимберлитов (редко встречающийся в этих породах франколит предварительно уверенно диагностируется рентгеновскими исследованиями), то при перерасчетах всё количество  $P_2O_5$  соединяется с эквивалентной для этого минерала частью  $CaO$ , которая вычисляется из общего содержания компонента. Так же поступаем с «образованием» гипса, соответственно соединяя  $CaO$  с сульфатным ангидритом и водой. Поскольку целестин и барит имеют локальное распространение (и приурочены они в основном к жильным образованиям), а другие минералы этой группы для кимберлитов изученных нами диатрем не характерны, то количество сульфата кальция, полученное путем пересчета, является довольно точным даже при незначительном содержании этого компонента в породе. Оставшаяся часть  $CaO$  вместе с  $CO_2$  идет на карбонат кальция, который здесь представлен двумя модификациями – кальцитом и арагонитом, причем последний встречается в этих породах редко. Если  $CO_2$  в избытке, то, добавляя  $MgO$ , рассчитываем кальцит и доломит. Оставшийся  $CaO$  вместе с  $TiO_2$  образует перовскит. Определенное количество  $MgO$  после вычета расходуемого на доломит, идет на флогопит, расчет которого проводится по концентрации в кимберлите  $K_2O$ . Поскольку других калийсодержащих минералов в кимберлитовых породах нами не установлено, то на «образование» слюды идет не только весь  $K_2O$ , но и соответствующие количества  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $FeO$  и  $H_2O$ . Оставшееся после этого количество  $MgO$  пересчитывается на серпентин. Можно потом по оставшемуся количеству  $Al_2O_3$  предварительно рассчитать и хлорит. При расчете серпентина соответствующая часть  $MgO$ ,  $FeO$  и  $Fe_2O_3$  объединялась с эквивалентными количествами  $SiO_2$  и  $H_2O$ . Избытки  $MgO$  (по отношению к  $SiO_2$ ) и  $H_2O$  пересчитывались на брусит. Избыток  $SiO_2$  выделялся в виде отдельной фазы, которая в кимберлитах обычно представлена кварцем и халцедоном. Поскольку доминирующим сульфидом железа является пирит, то сульфидную серу «связывали» с соответствующей частью  $FeO$  в персульфид. Остальные сульфиды рассчитывались в зависимости от результатов рентгенографического и химического анализов. Количество  $FeO$ , оставшееся после вычитания на «образование» пирита, идет вместе с  $Fe_2O_3$  на магнетит. Следует отметить, что обычно  $FeO$  не хватает для «образования» ильменита и магнетита, поэтому оставшиеся  $Fe_2O_3$  и  $H_2O$  учитываются при расчете аутигенных гидроксидов железа (гётит, гидрогётит, маггемит и др.). Полученные таким образом (при пересчете химических анализов с рентгеновским контролем минеральных фаз) количественные данные по каждому из преобла-

дающих минералов основной массы кимберлитов нами наносились на планы погоризонтальных опорных горизонтов, построенных обычно по материалам эксплоразведочных горных выработок, пройденных по сетке 40 м x 40 м, а также на геолого-петрографические разрезы, построенные по результатам комплексного изучения керна разведочных скважин. Это позволило получить объективные количественные данные по распределению основных материалов и выделению геолого-технологических типов руд. В использованных в настоящей работе методах петрофизических, петрохимических, минералогических, геохимических и других видов исследований [2, 7, 8-12] применены отдельные усовершенствования и изменения в зависимости от типов изучаемых геологических объектов. Большое значение при изучении кимберлитовых пород уделялось обработке материалов комплексного изучения вещественного состава с применением широкого комплекса современных методов и подходов [7-9]. Для обработки химических анализов в различной степени измененных кимберлитов, как и для развитых древних кор выветривания (КВ) на породах различного состава в алмазоносных регионах, был использован многомерный непараметрический кластер-анализ, развиваемый нами совместно с В.Г.Хитровым [12]. Обобщающие особенности и закономерности, полученные с использованием этого метода, можно представить (в том числе и на плоскости) в виде взаимосвязанных индексов (рис. 1) их валового химического состава – LM и ОК. Первый «лейко-мелано» индекс – LM определяется алгебраической суммой рангов содержания (в процентах;  $n = 10$ ) породообразующих оксидов в образце ( $R_1 = 1, 2, \dots, i, \dots, 10$ ;  $M = S_+ + S_-$ ), взятых со знаком «+» для светлоокрашенных компонентов, содержание которых возрастает в глобальном процессе эволюции горных пород от ультраосновных к кислым ( $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$ ,  $K_2O$  и  $H_2O^+$ ), и со знаком «-» для темноокрашенных компонентов, содержание которых соответственно уменьшается в указанном ряду пород ( $MgO$ ,  $FeO$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  и  $TiO_2$ ). Второй индекс – ОК (индекс окисленности, выветривания) по этому методу определяется алгебраической суммой рангов содержания (в процентах) шести избранных породообразующих оксидов в той же породе, причем используются численные значения рангов  $R_i$ , полученные при первом, общем ранжировании:  $OK = S''_+ + S''_-$ . Здесь  $S''_+$  представляет сумму рангов по оксидам, преимущественно накапливающимся в измененных (в том числе и выветривающихся) продуктах ( $Fe_2O_3$ ,  $Al_2O_3$ ,  $H_2O^+$ ), а  $S''_-$  – сумму рангов по оксидам, выносимым из исходных пород при постмагматических и гипергенных изменениях пород ( $FeO$ ,  $MgO$ ,  $Na_2O$ ).

*Вторичные минералы кимберлитов* составляют обычно более 90% объема пород и представлены более 50 минеральными видами. Результаты комплексного диагностического изучения вторичных минералов кимберлитов и особенностей их влияния на состав и облик пород показывают, что главными вторичными

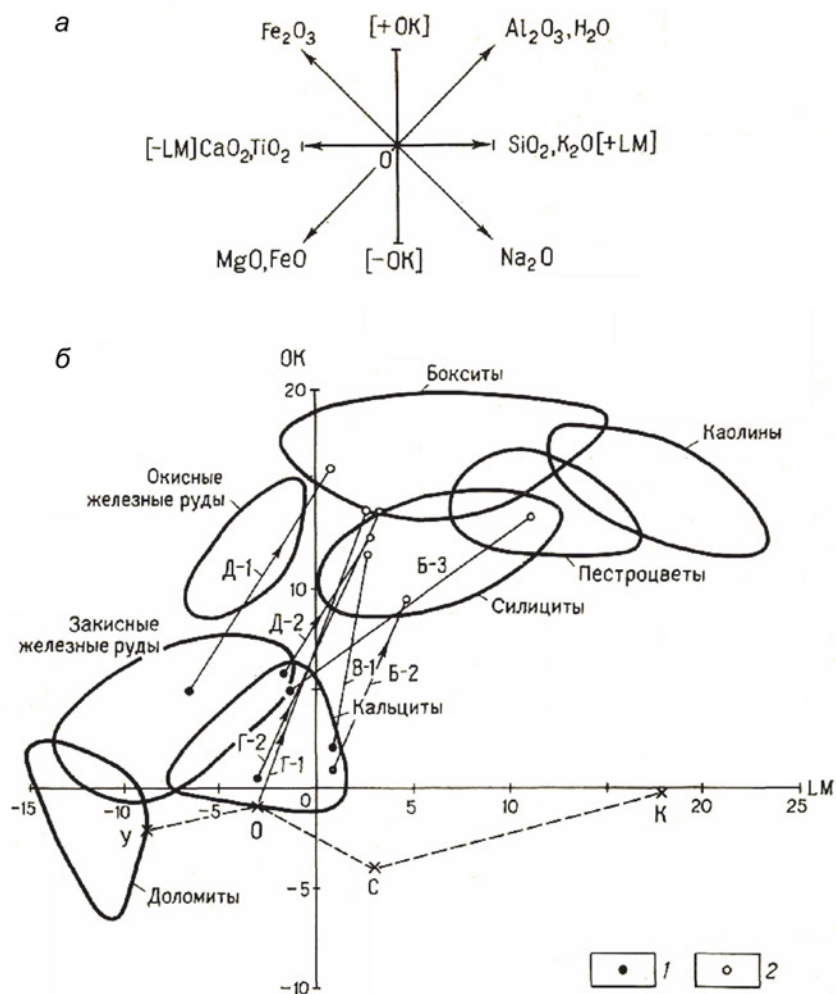


Рис.1. Вариационная диаграмма LM-ОК химического состава пород и продуктов их изменения в земной коре [12]: а – векторы породообразующих окислов на диаграмме; б – распределение химических составов продуктов выветривания терригенно-карбонатных пород (Б), долеритов (В), туфов и туфогенных образований (Г) и кимберлитов (Д). Породы: У – ультраосновные, О – основные, С – средние, К – кислые; Б-2 – скв.432/192; Б-3 – скв.114/176; В-1 – скв.202/44; Г-1 – скв.Ан-50; Г-2 – скв.280/188; Д-1 – скв.А-63К; Д-2 – шахта 102. 1 – исходные породы, 2 – выветрелые продукты.

минералами кимберлитов являются серпентин и карбонаты, которыми в основном сложены эти породы. К второстепенным отнесены все остальные минералы, образовавшиеся на разных стадиях становления кимберлитовых трубок. Различные минералы проявляют свойственные только им особенности концентрации и распределения в породах и приводят к различному облику и составу кимберлитов. Проведенными исследованиями установлено [2-5, 10-16 и др.] своеобразие качественно-количественного распределения в кимберлитовых породах силикатов (серпентин, флогопит, хлорит, вермикулит, тальк, монтмориллонит, сепиолит, таумасит), карбонатов (кальцит, доломит, арагонит, пирроаурит, шортит, стронцианит, магнезит, гидромагнезит, хантит), оксидов и гидроксидов (магнетит, гематит, гётит, амакинит, кварц, халцедон, брусит), сульфидов (пирит, сфалерит, галенит, миллерит, пирротин, пентландит, халькопирит, точилинит), сульфатов (ангидрит, гипс, целестин, барит, эпсомит, метабазалюминит, брошантит), галогенидов (галит), фосфатов (франколит), боратов

(екатеринит, ферросайбелит) и битумов.

Распределение одного из характернейших вторичных минералов - *серпентина* в телах кимберлитовых трубок зависит не только от состава исходной магматической породы, но и от количества и природы ксенолитов, а также вторичных инфильтрационных процессов. Ксенолиты мантийных ультраосновных пород серпентинизируются одинаково: как и кимберлит (то есть первичные оливины и пироксены) частично или полностью замещаются серпентином, содержание которого определяется количеством этих исходных минералов в породе и степенью замещения. Для определения влияния на серпентинизацию кимберлитов гипергенных процессов, проводилось сравнение минералогических карт различных опорных горизонтов. Распределение серпентина на глубину трубки (рис. 2) подчеркивает степень серпентинизации оливины и других включений ксенолитов в кимберлитовой диатреме. Количество серпентина в ксенолитах осадочных пород определяется содержанием в исходном материале силикатов (особенно со слоистой

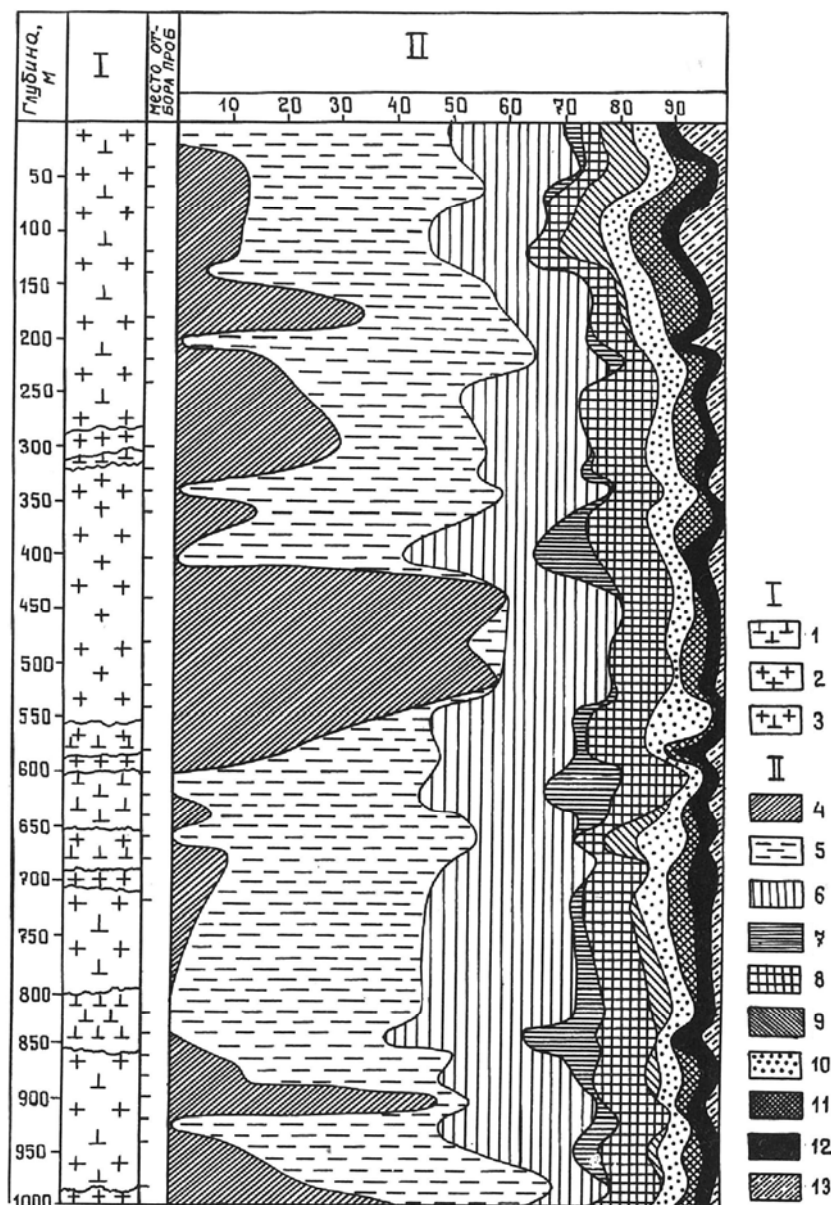


Рис.2. Распределение минералов в основной массе кимберлитов трубки Удачная (по разведочной скважине 203): 1 – 3 – петрографическая колонка: 1 – порфиновый кимберлит первого этапа внедрения, 2 – кимберлитовая брекчия второго этапа внедрения, 3 – кимберлитовая брекчия второго этапа внедрения с автолитами первого этапа; 4 – 13 – минералы: 4 – оливин, 5 – серпентин, 6 – кальцит, 7 – доломит, 8 – флогопит, 9 – хлорит, 10 – оксиды и гидроксиды железа, 11 – брусит, 12 – гипс + галит, 13 – прочие минералы.

структурой). Поэтому содержание серпентина в кимберлите представляет собой сумму количеств в различных по происхождению составляющих компонентов данной довольно сложной породы. Морфология агрегатов серпентина определяет структуру мономинеральной породы, то есть серпентинитов, представляющих в отдельных трубках (Ботуобинская, Нюрбинская и др.) продукты преобразования ультраосновных модулей, а в большинстве случаев - только определенный участок породы, поскольку значительная ее часть сложена другими минералами, имеющими свою форму индивидов и агрегатов. Чисто серпентиновые агрегаты чаще всего видны у большинства псевдоморфоз по оливину, а также на некоторых участках цементирующей массы. Полностью серпентиновыми являются многие жилы, прожилки и неправильной формы выделения серпофита. Морфология агрегатов серпентина определяется размером частиц, их формой, расположением и взаимодействием между

собой. Большинство частиц серпентина представлено субмикроскопических размеров индивидами, являющимися смесью хризотила и лизардита. Доля первого выше в верхних, часто выветрелых, частях диатрем. Его выделения сосредоточены в жильных серпофитах. Лизардит обычен для ядер псевдоморфоз.

Следующим по распространенности компонентом кимберлитовых пород являются карбонаты, среди которых доминирует кальцит, характеризующийся широким многообразием форм выделений. Основная его масса вместе с минералами группы серпентина слагает (рис. 2) основной объем пород большинства кимберлитовых тел, “цементируя” дезинтегрированные породы и минералы различного происхождения. Резко меняется концентрация минерала в зависимости от степени постмагматического и гипергенного изменения кимберлитов. По-разному ведет себя минерал и на разных глубинах месторождений (рис. 2), что связано с различной степенью карбонизации пород ди-

атрем. Часть кальцита выполняет пустотно-трещинные образования, формируя в кимберлитах прожилки и друзы, жеоды и щетки. В качестве позднего акцессорного минерала кальцит установлен нами [7, 11 и др.] и в некоторых типах глубинных пород, в частности, в ильменит-титан-клиногумитовых дунитах (парагенетическая ассоциация Тi-клиногумит + К-рихтерит + кальцит + апатит + пирротин), в рутил-цирконовых сростках (циркон + флогопит + кальцит), в рутиловых эклогитах (амфибол + флогопит + кальцит + апатит ± кварц), в ильменит-амфиболовых вебстеритах (амфибол + циркон + апатит + кальцит) и в некоторых глиммеритах (флогопит + кальцит ± амфибол). Кальцит известен также в виде включений в цирконах, гранатах и оливинах, кроме того микровключения кальцита зафиксированы в некоторых алмазах Заира, Ботсваны [8]. На данном этапе изученности этого минерала можно выделить его следующие разновидности: 1 - ранний (глубинный) первичномагматический (включения в глубинных минералах), образующийся из первичной водно-силикатно-карбонатной магмы; 2 - глубинный метасоматический (продукт верхнемантийного метасоматоза глубинных пород) и 3 - разновидность, кристаллизация которой связана с различными процессами формирования кимберлитовых тел. Последнюю по способу и времени образования можно подразделить на кимберлитовую, слагающую основную массу пород, метасоматическую (продукт карбонатизации некоторых минералов и пород) и позднюю гидротермальную, выполняющую пустотно-трещинные образования. Следовательно, кальцит с полным основанием можно отнести к сквозным, но полигенным минералам кимберлитового процесса, всестороннее исследование которых может дать новую информацию о природе и специфике этого процесса на различных этапах его эволюции. В пустотно-жилковых образованиях из кимберлитов установлено большое количество кальцитсодержащих ассоциаций, в том числе: кальцит+пирит ± (сепиолит); кальцит+пирротин ± (сепиолит); кальцит+пирит+пирротин ± (сепиолит); кальцит+(сепиолит)+(тальк); кальцит+целестин+пирит ± серпентин ± сепиолит; кальцит+целестин+ кварц ± (сепиолит); кальцит+целестин ± (сепиолит); кальцит+серпентин+кварц ± (сепиолит); кальцит+серпентин ± (сепиолит); кальцит+ халькопирит +серпентин+(сепиолит); кальцит+ доломит+ серпентин + (сидерит); кальцит+ пирит+ сфалерит+ (сепиолит); кальцит+магнетит+пирит; кальцит+магнетит+ серпентин; кальцит+арагонит ± магнетит; кальцит+гетит+магнетит; кальцит+пироаурит+пирит+магнетит. Наиболее устойчивыми и часто встречающимися являются ассоциации: кальцит+пирит±(сепиолит), кальцит+пирит+пирротин±(сепиолит); кальцит+пирит+пирротин±(сепиолит); кальцит + (сепиолит), кальцит+целестин+пирит± серпентин±(сепиолит) и кальцит+магнетит+серпентин. Редки кальцитсодержащие ассоциации с халькопиритом и сфалеритом. Сепиолит, тальк и сидерит – более поздние минералы этих

ассоциаций и не связаны единым процессом минералообразования с кальцитом и сосуществующими с ним минералами, то есть не являются парагенетическими. Помимо органического вещества, в кристаллах кальцита рентгеновскими методами и методами ИК-спектроскопии диагностированы включения серовато-зеленого серпентина таблитчатого облика, кристаллы и сростки пирита, пирротина, магнетита, игольчато-пластинчатый целестин, а в агрегатном кальците – сростки и двойники кристаллов сфалерита. Особый интерес представляют кальцитсодержащие ассоциации из “плавающих рифов” – крупных мегаксенолитов вмещающих карбонатных пород в кимберлитах. В результате исследований в пустотно-трещинных образованиях этого мегаксенолита нами были установлены следующие кальцитсодержащие ассоциации: кальцит (ранний-I)+опал+ халцедон+кварц±пирит; кальцит-I±опал+кварц; кальцит-I+кварц+кальцит (поздний-II); кальцит-I+магнетит+кальцит-II; кальцит-II+магнетит+арагонит; опал+кварц+кальцит-II±пирит; кальцит-II+флюорит (последний первоначально был принят нами за кальцит-II, так как визуально практически ничем не отличался от крупных обломков этого минерала в разрушенном взрывом мегаксенолите). В ряде кимберлитовых трубок значительную долю пород составляет *доломит*. По имеющимся данным, образование доломита по времени охватывает достаточно широкий интервал: от начала процессов метасоматоза верхнемантийных пород (наличие включений доломита в титан-клиногумите и К-рихтерите) до заключительных стадий гидротермальных процессов в пустотно-трещинных образованиях остывающего “кимберлитового” расплава. Согласно классическим представлениям о закономерностях кристаллизации доломита в природе, своеобразными катализаторами доломитообразования в кимберлитах могут быть различные соли и сульфаты. В первую очередь 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. Менее распространенным карбонатом в кимберлитах является арагонит.

В целом по изучению карбонатов из гидротермальных пустотно-трещинных образований в кимберлитах Сибирской платформы (СП) можно сделать один из основных выводов: различные ассоциации сосуществующих минеральных фаз следует рассматривать в качестве устойчивых и закономерных парагенетических ассоциаций, отражающих общий характер физико-химических процессов данной стадии гидротермального минералообразования при формировании кимберлитов. Из числа изученных карбонатов наиболее информативным в генетическом отношении является кальцит и, в первую очередь, его рентгенолюминесцентные характеристики. Присутствие TR-центров излучения в кальцитах из пустотно-трещинных образований в кимберлитах однозначно свидетельствует о том, что даже на заключительном

этапе гидротермального процесса этот минерал сохраняет информацию о составе глубинного водно-силикатно-карбонатного флюида. Каких-либо структурно-химических признаков, обусловленных геохимической специализацией вмещающих карбонатных пород, в изученных кальцитах, пока не установлено. По полученным данным анализа форм выделений кальцитсодержащих ассоциаций, в кимберлитах наиболее поздними являются прожилки кальцита (часто - мономинеральные).

Одним из весьма интересных вторичных минералов является *пироаурит*, установленный [3-7] в кимберлитах многих трубок в виде прожилков и гнезд волокнистого и кристаллического облика, и ассоциирующий с кальцитом, магнетитом и серпифитом. Во включениях ультраосновных пород этой же трубки был позднее диагностирован пластинчатый пироаурит. Комплексное исследование вещественного состава разрабатываемых месторождений алмазов СП позволило получить новые данные об особенностях распределения и генезиса рассматриваемого минерала (рис. 3). Различные кимберлитовые трубки характеризуются специфическими особенностями вторичного минералообразования. Это, в значительной степени, связано с геологическим строением месторождений,

их составом, влиянием вмещающих пород, гидрогеологическими условиями и др. Так, например, в разрезе глубоких горизонтов трубки Мир наблюдается довольно частая смена петрографических типов пород, но при этом четкой закономерности в распределении по типам кимберлитов всего изученного разреза трубки (до 1200 м) как реликтовых, так и вторичных минералов не отмечено. Вместе с тем, анализ смены вниз по разрезу прожилковой минерализации показал, что нередко вместо исчезнувших новообразований появляются другие. Например, гипс установлен в верхней части трубки (до глубины примерно 625 м), на средних горизонтах (615-660 м) отмечается целестин, ассоциирующий, как правило, с ограненным кальцитом, а на более глубоких горизонтах часто встречается галит в ассоциации с ангидритом и реже - гипсом.

Здесь же на глубоких горизонтах довольно характерным прожилковым минералом кимберлитов трубки Мир является пироаурит. Часто голубоватые и голубовато-зеленые выделения последнего наблюдаются в прожилках (мощностью до 3-5 см) вместе с галитом. Волокнистые агрегаты пироаурита в таких случаях выросли на стенках трещин и впоследствии были сцементированы галитом. Длина уплощенных воло-

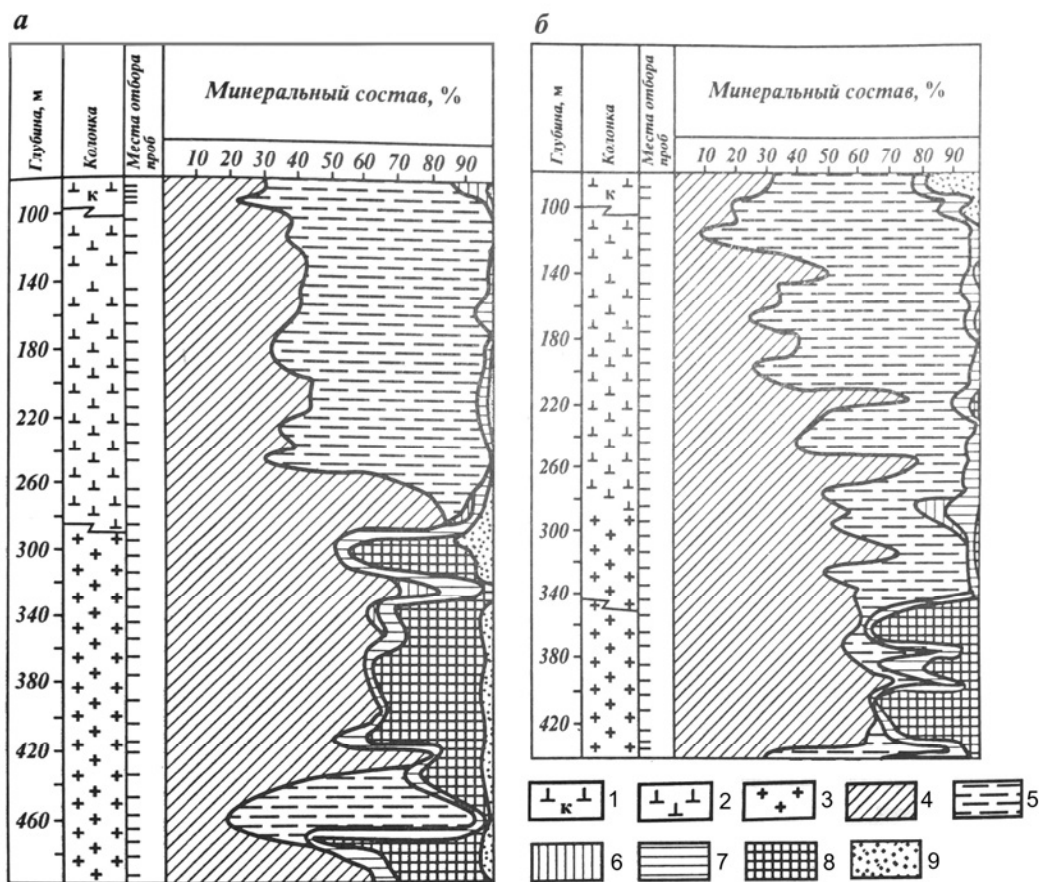


Рис.3. Распределение преобладающих вторичных минералов в основной массе кимберлитов трубки Сытыканская, вскрытых скважинами 98 (а) и 112 (б): 1 – 3 – петрографическая колонка: 1 – выветрелые кимберлиты, 2 – кимберлитовые брекчии с массивной текстурой цемента, 3 – кимберлитовые брекчии; 4 – 9 – Минеральный состав: 4 – серпентин, 5 – серпентин, 5 – кальцит, 6 – доломит, 7 – измененный флогопит и хлорит, 8 – пироаурит, 9 – прочие минералы.

кон минерала здесь достигает 0,5 см. Не все волокна расположены перпендикулярно к субстрату, часть из них находится под небольшим углом, другие залегают почти параллельно стенкам, хотя их “корни” перпендикулярны к основанию. Изучение таких участков в штуфах позволяет предполагать, что до того как отложилась соль, произошло вдоль трещин смещение блоков и загибание волокнистых агрегатов пирроаурита, образовавшихся раньше.

Следует отметить, что указанные агрегаты в ассоциации с галитом нередко обохрены. При этом иногда гидроокислы железа цементируют волокна пирроаурита. В этих случаях на плоскости трещин параллельно расположены лейстовидно-волокнистые выделения пирроаурита синевато-зеленого цвета, который в отдельных участках переходит в белую асбестовидную разность минерала. Волокна последнего обычно параллельны друг другу в плоскости стенки трещин, на которых спорадически встречаются конусовидные выделения гидроокислов железа. Нередко минерал вместе с серпентином слагает крупные (до 6 см) зеленовато-серые жеоды. В ряде разрезов отмечено зональное строение псевдоморфоз серпентина. Так, иногда центральная часть таких выделений имеет темно-зеленую густую окраску, а периферическая – более светлую (чаще всего серовато-зеленую). Внутри обеих зон таких псевдоморфоз отмечены мелкие (до 3-5 мм) выделения пирроаурита. Последний часто встречается и среди жильных образований в серпофитизированных кимберлитовых брекчиях, где ассоциирует с галитом, кальцитом и ангидритом. Пирроаурит здесь образует полусферы, которые покрыты бесцветными более поздними минералами.

Существенные концентрации пирроаурита отмечены нами также при изучении состава кимберлитовых тел Далдыно-Алаkitского района (трубки Сытыканская, Удачная, Юбилейная и другие). Заметно повышенные концентрации этого минерала зафиксированы в породах трубки Сытыканская [10, 11]. Пирроаурит в отдельных горизонтах кимберлитов данной трубки выполняет многочисленные прожилки, линзочки и пустоты различной формы и размеров, иногда достигающие до 3-4 см в поперечнике. Минерал характеризуется голубоватой и голубовато-зеленой окраской, изменяющейся в зависимости от степени измененности и его парагенезисов (с кальцитом, серпентином и другими новообразованиями). В отдельных интервалах (300-500 м) кимберлит разбит многочисленными тонкими (волосовидными) прожилками и микропрожилками, выполненными пирроауритом 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. Пирроаурит здесь имеет тонкочешуйчатое строение. Фиксируются также прожилки голубоватого пирроаурита, ассоциирующего с тонкозернистым магнетитом и буроватым серпентином. Магнетит обычно в этих образцах выполняет цен-

тральную часть прожилков (или пустот) и нередко покрыт буроватыми гидроокислами железа.

Довольно часто в кимберлитах глубоких горизонтов трубки встречаются концентрически зональные стяжения (до 3 см в поперечнике), сложенные пирроауритом, серпентином и кальцитом, а иногда – только пирроауритом и кальцитом. В основной массе кимберлитовых брекчий отдельных горизонтов трубки Сытыканская существенно увеличивается (до 40%) концентрация пирроаурита, что придает породе в целом голубоватый оттенок и макроскопически отличает от других типов кимберлитов. В кимберлитовых породах трубок Удачная и Юбилейная пирроаурит также отмечен в парагенетической ассоциации с кальцитом и серпентином. В этих телах минерал встречается в виде отдельных голубовато-зеленых ромбических кристаллов, а также сферических и волокнистых образований. Последние иногда образуют маломощные прожилки и мелкие жеоды. Наибольшие концентрации пирроаурита отмечены в кимберлитовых породах восточного тела трубки Удачная, где он нередко образует мелкие серовато-коричневые прожилки, мелкочешуйчатые выделения на поверхности в грязно-серых измененных кимберлитах, а в отдельных участках им обогащена основная масса пород. Образование пирроаурита происходит из углекислых растворов магния, при взаимодействии их с растворимыми солями окисного железа. Наиболее вероятной формой окисного железа в растворе является сульфатная. Пирроаурит является неустойчивым минералом и при разрушении замещается гидроокислами железа. Разрушение жильного пирроаурита часто происходит уже на значительных глубинах. Поэтому в верхних горизонтах разрабатываемых месторождений неизменный пирроаурит встречается сравнительно редко. Следовательно, пирроаурит имеет широкое распространение в кимберлитовых породах СП, причем наиболее характерна пирроауритизация для глубоких горизонтов месторождений, где минерал нередко является порообразующим компонентом. Учитывая большую роль минерала в процессе технологической отработки месторождений, вопросам изучения пирроауритизации кимберлитовых тел следует уделять пристальное внимание, что может быть достигнуто при комплексном изучении вещественного состава (особенно при использовании современных физических методов исследований). Остальные карбонаты (шортит, стронцианит, гидромагнезит, хантит) встречаются в кимберлитовых породах СП в резко подчиненном количестве.

В кимберлитах Алаkit-Мархинского (АМКП), Далдынского (ДКП), Верхне-Мунского (ВМКП) и других полей часто фиксируется *магнетит* в количестве от долей процента до 2-3, реже 5%, образующийся в период становления кимберлитовых тел и на последующих этапах их эволюции. По данным рентгеновских исследований, особенностью рассматриваемого магнетита является разная степень развития по нему *маггемита*, или  $\gamma\text{-Fe}_2\text{O}_3$  ( $d=0,252, 0,2087$  и

0,1606 нм). Минералы когерентно связаны друг с другом и имеют сходные структуру и состав. Маггемит в кимберлитах представляет промежуточную стадию процесса гипергенного окисления магнетита в гематит. В соответствии с этим у маггемита значение  $a=0,8340$ , тогда как у магнетита оно составляет 0,8397 нм [9-11, 21]. Указанные изменения дифракционной картины свидетельствуют о начале структурных преобразований исходного минерала.

В целом по данным изучения кимберлитов из ряда трубок основных алмазоносных районов СП можно констатировать, что магнетит в них по степени окисленности представляет ряд, в пределах которого условно могут быть выделены три группы: 1 - магнетит в крупных выделениях с хорошей степенью окристаллизованности и с отсутствием признаков перехода в маггемит (трубки Невидимка, Молодежная и др.); 2 - мелкокристаллические разновидности магнетита, встречающиеся либо в виде гнезд и линзовидных скопленений, либо в виде зерен, равномерно распределенных в породе; в) пылевидные разновидности магнетита, почти равномерно пропитывающего кимберлитовую породу.

Во многих кимберлитовых трубках среди вторичных новообразований встречаются кварц и его разновидность халцедон, которые детально изучены на примере трубки Удачная и могут влиять на надежность процессов извлечения алмазов из кимберлитов. Повышенные концентрации кварца приурочены не только к самым верхним горизонтам трубки (особенно к сильно выветрелым частям западного тела), но и к приконтактовым зонам на более глубоких горизонтах. Кварц часто встречается вместе с кальцитом и другими вторичными минералами, образуя щетки, жилы и прожилки. Нередко кристаллы кварца на кварц-опал-халцедоновой подложке можно наблюдать непосредственно на измененной в различной степени кимберлитовой породе. Размеры кварцевых индивидов самые разнообразные.

Характерной особенностью большинства изученных кристаллов кварца является скульптурированность всех граней, обусловленная, скорее всего, процессами растворения, а также наличием многочисленных включений пирита, марказита, гётита и других вторичных минералов. В кимберлитовых породах трубки Удачная кварц встречается как бесцветный, так и окрашенный в различные оттенки бурого, серого и фиолетового цветов. Бурые и серые цвета минерала аллохроматические и обусловлены механическими примесями гидроксидов железа (бурые) или микровключениями сульфидов железа (серые). Во всех случаях больше окрашены головки кристаллов. Присутствие среди кварцев из кимберлитов значительного числа окрашенных в аметистовый цвет образцов позволяет нам с полным основанием отнести их к низкотемпературным образованиям, которыми является большинство природных аметистов. На низкотемпературный характер кристаллизации кварца в кимберлитах этой трубки указывает также присут-

ствие во многих изученных кристалликах включений гётита - минерала, обычно образующегося при температурах ниже 200°C. Эти данные хорошо согласуются и с некоторыми результатами исследований температур гомогенизации газовой-жидких включений в кальците из этого же месторождения, по которым верхний температурный интервал кристаллизации кальцита обычно не превышает 350°C.

Для халцедона не свойственно образование кристаллов. Нередко агрегаты этого минерала встречаются в виде псевдоморфоз по другим, не содержащим кремнезема минералам, что наблюдается в верхней части кимберлитовой трубки Удачная. Обычно из халцедона начинают свой рост кристаллы кварца, головки которых образуют друзы. В случае образования псевдоморфоз самые мелкие (пелитоморфные) частицы халцедона расположены на поверхности первых. Довольно часто выделения кварца из трубки Удачная обволакиваются вязким битумом или его тонкой пленкой. Пленки битумов имеются и на стыках отдельных шестоватых агрегатов или нередко густым слоем покрывают кварцы.

К широко распространенным минералам кимберлитовых пород относится *флогопит*, а при его содержании более 15-20 % объема выделяется слюдястый или лампрофировый тип кимберлитов. В кимберлитах установлено три генерации флогопита. Первая представлена вкрапленниками, которые образовались, по видимому, в протоматический (подкорковый) этап кристаллизации кимберлитовых минералов. Возможно, часть вкрапленников флогопита образовалась при метасоматическом замещении других протоматических минералов кимберлитовой породы, например, граната в условиях верхней мантии.

Флогопит второй генерации образует в основной массе кимберлитов мелкие пластинчатые и чешуйчатые кристаллы с хорошо сформировавшейся огранкой (часто с характерным флюидальным расположением). Эта генерация минерала связана с заключительным этапом кристаллизации кимберлитового расплава в условиях земной коры в трубках и жилах. Третья генерация представлена чешуйчатым флогопитом метасоматического происхождения, образовавшимся при воздействии остаточных постмагматических растворов на консолидированные кимберлитовые породы. Метасоматический флогопит в алмазоносных регионах образуется также по ксенолитам осадочных пород. Кроме того, он входит в состав определенного типа ксенолитов глубинных пород, встречающихся в кимберлитовом материале. Наиболее часто флогопит является породообразующим минералом ильменит-гранатовых гипербазитов, пироксенитов, реже - перидотитов, иногда образует почти мономинеральные породы - глиммериты. Судя по характеру структур и по взаимоотношениям с другими минералами ксенолитов, минерал в ряде случаев является первичным, возникшим в условиях равновесия с пиропом. Этот вывод не противоречит и результатам экспериментальных работ, согласно которым флогопит устойчив



при высоких давлениях вплоть до 66 кбар. В условиях автометаморфизма кимберлитов флогопит, как и в других типах ультраосновных пород, подвергается различным изменениям, в том числе вермикулитизации и хлоритизации. Особенно интенсивно флогопит изменен в кимберлитах Малоботубинского (МБАР), Далдыно-Алакитского (ДААР) и Средне-Мархинского (СМАР) алмазоносных районов. Здесь в ряде трубок флогопит превращен либо в желтовато-бурый, серовато-зеленый или белесый вермикулит, либо в буровато-зеленый хлорит. В кимберлитах более северных районов степень изменения флогопита не столь велика, но и здесь в ряде трубок и жил значительная часть этого минерала превращена в вермикулит и хлорит. С глубиной степень вторичного изменения флогопитов снижается.

В целом в кимберлитовых породах СП доля слюдястых образований обычно не превышает 10% (в африканских трубках их содержание нередко достигает 40% объема породы). Довольно часто в кимберлитах наблюдается сонахождение триоктаэдрических слюд с оксидами железа. Часто триоктаэдрические слюдястые образования приурочены к приконтактовым с карбонатами участкам, а также к мелким и маломощным кимберлитовым жилам, главным минералом которых является кальцит. В отношении изменения слюд установлено три варианта: а) полное замещение исходного минерала другими компонентами (например, карбонатами); б) преобразование в другие силикаты слоистого строения (хлоритизация, вермикулитизация, смектитизация); в) постепенное разрушение, сопровождаемое последовательным выщелачиванием оснований с конечным образованием каолинита. Образование промежуточных форм (типа гидробиотита) нельзя приравнивать к вермикулитизации триоктаэдрических слюд, поскольку последняя проходит в гидротермальных условиях и, как правило, по всему объему подвергшейся данному процессу породы с образованием устойчивой фазы (а значит и среды, в которой она находится). Флогопит в восстановительной обстановке преобразуется в хлорит от  $Fe^{2+}$ -Mg- до практически Mg-типа, а в окислительной - в вермикулит и последующие продукты преобразования последнего. В большинстве случаев вторичные минералы отмечаются в виде отдельных ассоциаций, сложенных двумя или тремя минералами.

Наиболее распространены в кимберлитах [7, 10] следующие ассоциации вторичных минералов: серпентин-карбонат-магнетит; серпентин-хлорит; серпентин-брусит-доломит; кальцит-оксиды-гидроксиды железа; кальцит-сульфиды железа; кальцит-кварц-сепиолит; кальцит-пироаурит; кальцит-гипс и гидромагнетит-эпсомит. Большинство перечисленных ассоциаций парагенетические. Входящие в их состав минералы возникли из пересыщенных водных растворов непосредственно на месте (в кимберлитах), замещая исходные минералы, либо отложились по трещинам. Выпадение последних произошло за счет растворимых в воде солей. Преобладающая часть вторичных

минералов в кимберлитах возникла в процессе гидролиза силикатов и других солей магния. В зависимости от конкретных условий на каждом отдельном участке трубок по исходным магнезиальным силикатам возникли вторичные минералы, образование которых происходило либо без выноса вещества из материнской породы, либо с выносом (частично или полностью) магния или кремнекислоты. Обилие воды в системе способствовало появлению серпентина, брусита и других богатых водой минералов.

В кимберлитовых породах СП определенную роль во вторичном минералообразовании сыграл сероводород, связавший железо в сульфиды и тем самым заблокировавший образование не свойственных кимберлитам карбонатов железа. Сероводород в некоторых случаях послужил источником возникновения серной кислоты, сыгравшей большую роль в процессе вторичного минералообразования. Однако образование гипса происходило не только в результате воздействия серной кислоты на карбонатные породы, но и при выпадении этого минерала из раствора сульфата кальция в связи с его пересыщением из-за испарения или вымерзания воды. Исследованиями показано [7, 11, 13], что среда вторичного минералообразования была сравнительно бедна  $CO_2$ , в связи с чем возникли основные водные карбонаты (пироаурит и гидромагнетит). Углекислота в первую очередь расходовалась на образование карбонатов кальция и кальций-магневых минералов. Чисто магнезиальные безводные карбонаты в целом для кимберлитов не характерны. Излишек в системе минералообразования магния определил, в определенной мере, образование более богатых им слоистых силикатов (серпентина вместо талька), а также гидроксидов (брусита). Повышенные Ca-Mg отношения во многих случаях способствовали образованию вместе с доломитом карбоната кальция, представленного арагонитом, возникновение которого здесь энергетически более выгодно, чем кальцита.

В процессе многолетних исследований установлены отличия в минеральном составе новообразований не только в разных трубках, но и в плане отдельных тел или блоков одной и той же трубки. Так, в кимберлитах западного тела трубки Удачная вторичные процессы проявились более интенсивно, отчего породы здесь иногда полностью переработаны. Вторичные преобразования пород восточного тела выражены слабо, что подчеркивается неполной серпентинизацией оливина в отдельных блоках, меньшим содержанием других вторичных минералов и сравнительно небольшим приконтактовым изменением. По-разному ведут себя вторичные минералы и на разведанную глубину коренных месторождений алмазов (см. рис. 2 и 3). В одних случаях (трубка Удачная) пока не установлены четкие закономерности смены ассоциаций, как породообразующих компонентов, так и минералов-примесей.

Однако установлена неравномерность серпентинизации оливина, связанная с чередованием в разрезах блоков пород с различной трещиноватостью. Это привело к слабому замещению реликтовых минералов

в одних блоках и более интенсивной их серпентинизации - в других. Процессы наложенной карбонизации привели к образованию блоков плотных кимберлитов (см. рис. 2, 3). В других случаях установлены довольно четкие закономерности в распределении, как породообразующих новообразований основной массы пород, так и прожилковой гидротермальной минерализации. Это позволяет использовать отмеченные особенности в распределении минералов-новообразований для типизации кимберлитовых пород. В большинстве случаев на СП слагающие трубки породы сильно изменены и в них в первичном виде сохранилось незначительное количество некоторых породообразующих и акцессорных минералов, а структуры и текстуры носят реликтовый характер. Меняется состав кимберлитовых пород в процессе их гипергенного изменения, что приводит к присутствию в КВ кимберлитов минералов различного происхождения: 1 - минералы, относящиеся только к ксенолитам фундамента или трапфов (полевые шпаты); 2 - минералы гидротермального происхождения (серпентины, хлориты и тальк); 3 - экзогенные минералы (смектиты, каолинит, большинство мелкозернистого кварца и халцедон, гидроксиды железа и сидерит).

Таким образом, проведенными исследованиями разработан комплекс методов для идентификации, количественного подсчета и картирования постмагматических и гипергенных минералов кимберлитовых пород. Полученные данные по типоморфизму вторичных минералов и их ассоциаций в кимберлитовых породах показали, что процессы вторичного минералообразования проходили в большом интервале температур и вызванного их спадом изменения реакции среды от щелочной до кислой с последующей нейтрализацией. Это зафиксировалось как в особенностях распространения, так и в формах растворения, нарастания и возникновения новых генераций вторичных минералов. Их большинство возникло в процессе гидролиза силикатов и других солей магния. В зависимости от конкретных условий минералообразования, на каждом определенном участке диатрем по исходным магнезиальным силикатам возникли вторичные минералы, образование которых происходило либо без выноса вещества из материнской породы, либо с выносом (частично или полностью) магния или кремнекислоты.

Обилие воды в системе способствовало образованию серпентина, брусита и других богатых водой минералов. Определенную роль во вторичном минералообразовании в кимберлитах СП сыграл сероводород, которым обогащены нижнепалеозойские толщи, вмещающие диатремы. Сероводород связывал железо в сульфиды и тем самым блокировал образование не свойственных кимберлитам карбонатов железа. Серо-

водород в ряде случаев послужил источником возникновения серной кислоты, которая воздействуя на карбонаты способствовала образованию гипса и других новообразований. Среды минералообразования были сравнительно бедны  $\text{CO}_2$ , в связи с чем возникли основные водные карбонаты (пироаурит и гидромагнетит). Углекислота расходовалась также на образование карбонатов кальция и кальций-магниевого новообразований. Излишек в системе минералообразования магния определил в некоторой степени образование более богатых им слоистых силикатов (серпентина вместо талька) и гидроксидов (брусита). Установлены отличия в минеральном составе новообразований не только в разных трубках, но также в плане отдельных тел или блоков одной и той же диатремы.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Бобривич, А. П. Петрография и минералогия кимберлитовых пород Якутии / А. П. Бобривич, И. П. Илупин, И. Т. Козлов и др. – М.: Недра, 1964. – 190 с.
2. Василенко, В. Б. Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии / В. Б. Василенко, Н. Н. Зинчук, Л. Г. Кузнецова. - Новосибирск: Наука. 1997. – 574 с.
3. Звягин, Б. Б. Высоковольтная электронография в исследовании слоистых минералов / Б. Б. Звягин, З. В. Врублевская, А. П. Жухлисто и др. – М.: Наука. 1979. – 224 с.
4. Зинчук, Н. Н. Распределение вторичных минералов в кимберлитовых породах Якутии / Н. Н. Зинчук // Изв. АН СССР. Сер. геол. 1990. № 5. – С.70-83.
5. Зинчук, Н. Н. Коры выветривания и вторичные изменения кимберлитов Сибирской платформы (в связи с проблемой поисков и разработок алмазных месторождений) / Н. Н. Зинчук. - Новосибирск: НГУ. 1994. – 240 с.
6. Зинчук, Н. Н. Влияние вторичных минералов на облик и состав кимберлитовых породах / Н. Н. Зинчук // Геология и геофизика. 1998. Т.39. №-12. – С.1704-1715.
7. Зинчук, Н. Н. Постмагматические минералы кимберлитов / Н. Н. Зинчук. – М.: Недра.2000. – 538 с.
8. Зинчук, Н. Н. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы / Н. Н. Зинчук, В. И. Коптиль. -М.: Недра. 2003. – 603 с.
9. Зинчук, Н. Н. Древние коры выветривания и поиски алмазных месторождений / Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников, Е. И. Борис. – М.: Недра. 1983. – 196 с.
10. Зинчук, Н. Н. Апокимберлитовые породы / Н. Н. Зинчук, Ю. М. Мельник, В. П. Серенко // Геология и геофизика. 1987. № 10. – С.66-72.
11. Зинчук, Н. Н. Вторичные минералы кимберлитов / Н. Н. Зинчук, А. Д. Харьков, Ю. М. Мельник, Н. П. Мовчан. - Киев: Наукова думка. 1987. – 282 с.
12. Хитров, В. Г. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава / В. Г. Хитров, Н. Н. Зинчук, Д. Д. Котельников // ДАН СССР. 1987. Т.296. №-5. – С. 1228-1233.
13. Зинчук Н.Н. Кимберлиты в истории Земли. Учебное пособие / Н. Н. Зинчук, А. Д. Савко, А. В. Крайнов / Труды НИИ геологии ВГУ. – Выпуск 68. – Воронеж: Воронежский государственный университет, 2013. – 99 с.

Западно-Якутский научный центр (ЗЯНЦ) АН Республики Саха (Якутия), Мирный  
Зинчук Николай Николаевич, председатель, д. г.-м. н., профессор, академик АН РС (Я), заслуженный геолог России

West Yakut scientific center (WYSC) AS Republic of Sakha (Yakutia). Zinchuk N. N., chairman, doctor of the Mineralogical and Geological Sciences, Professor, Academician of Academy of Science RS (Y), Celebrated Geologist of Russia