

УДК 553.81:552.323.6

## Особенности гидротермального и гипергенного изменения слюдистых кимберлитов

<sup>a, b</sup>Н.Н. Зинчук<sup>a</sup>Западно-Якутский научный центр Академии наук Республики Саха (Якутия)  
678175, Мирный, ул. Тихонова, д. 5, корп. 1. E-mail: nnzinchuk@rambler.ru<sup>b</sup>Вилуйская геологоразведочная экспедиция АК «АЛРОСА» (ПАО)  
678174, Мирный, ул. Вилуйская, д. 7Б*(Статья поступила в редакцию 27 октября 2022 г.)*

На основании комплексного исследования акцессорных и породообразующих минералов кимберлитовых пород трубок Удачная, Нюрбинская и Ботуобинская детально прослежены процессы вторичного минералообразования. Изучены продукты изменения кимберлитовых пород, составлена схема преобразования исходных минералов, определены типоморфные особенности конечных продуктов выветривания, построен профиль коры выветривания кимберлитовых пород Накынского поля. Сравнительное комплексное исследование древних кор выветривания на породах различного химического и минералогического состава позволило проследить особенности их гипергенного изменения и типоморфные признаки элювиальных продуктов, что очень важно для решения ряда прикладных задач. В переотложенных продуктах выветривания различных пород возможно дифференцировать на структурном уровне одни и те же разновидности первичных минералов, а также идентифицировать вторичные слоистые силикаты, различающиеся в последнем случае либо характером заселения октаэдрических позиций в их структуре, либо способом взаимного наложения отдельных силикатных слоев или их политипией. Поэтому переотложенные в древних осадочных толщах продукты различных типов кор выветривания сохраняют структурные и кристаллохимические особенности по отношению к минералам элювиальных толщ, что позволяет проследить пути поступления в бассейны седиментации терригенного (в том числе и алмазоносного) материала.

Ключевые слова: *древние коры выветривания, гипогенные и гипергенные минералы, типоморфизм минералов, алмазоносные толщи.*

DOI: 10.17072/psu.geol.22.1.32

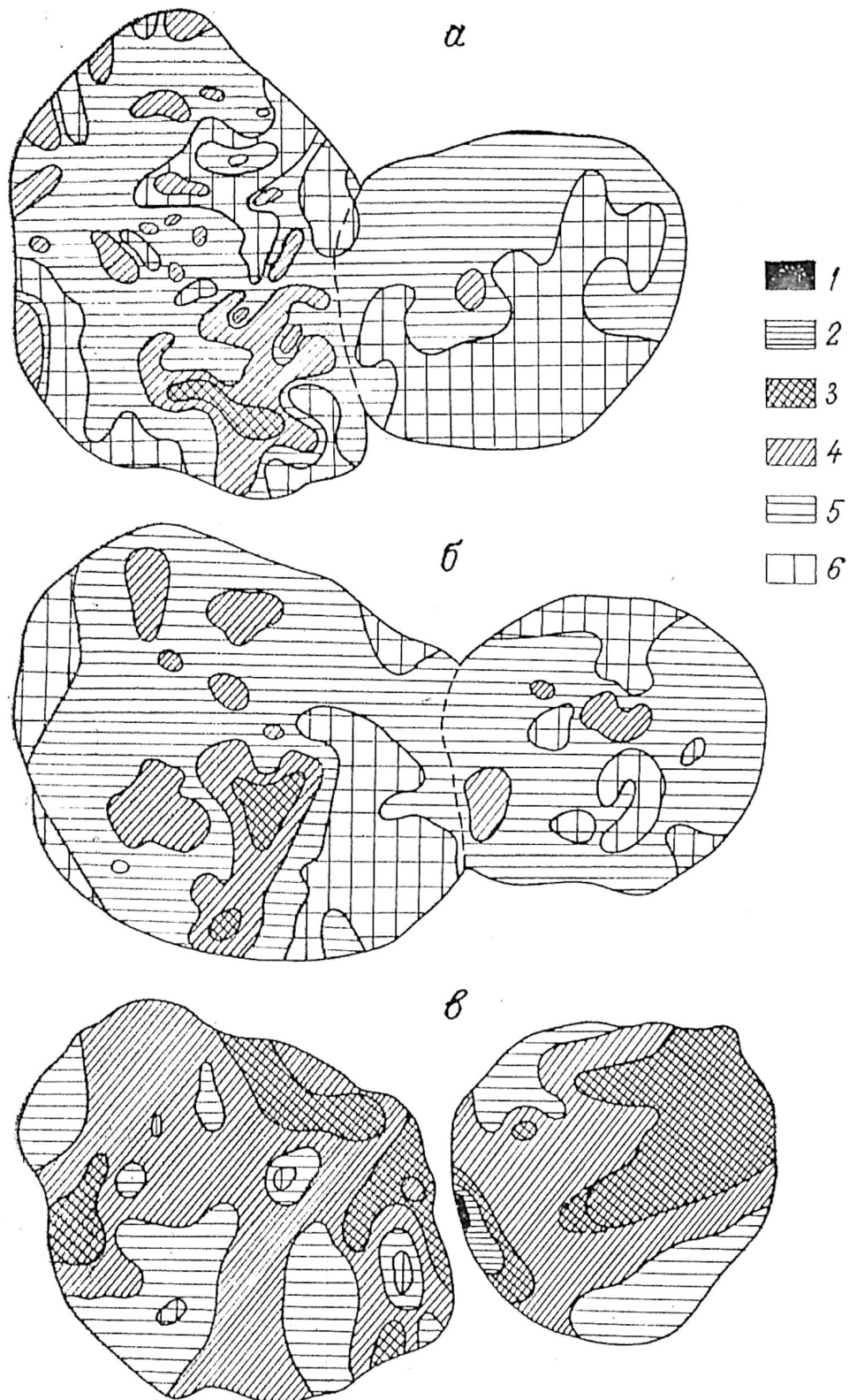
### Введение

Кимберлитовые диатремы алмазоносных провинций древних платформ мира характеризуются (Афанасьев, Зинчук, 1999; Афанасьев и др., 1998, 2000, 2009; Зинчук и др., 1997, 1999, 2002, 2004) большим разнообразием по размеру, морфологии, глубине заложения очагов, содержанию и составу первичных (глубинных) минералов, составу основной массы кимберлитов, степени и характеру переработки последних постмагматическими растворами, содержанию, морфологии и физическим свойствам индикаторных минералов кимберлитов (ИМК) и другим признакам. Часть перечисленных признаков обусловлена проявлением эндогенных факторов, а часть – экзогенных. От глубины формирования магматических очагов, состава пород верхней мантии зависят содержа-

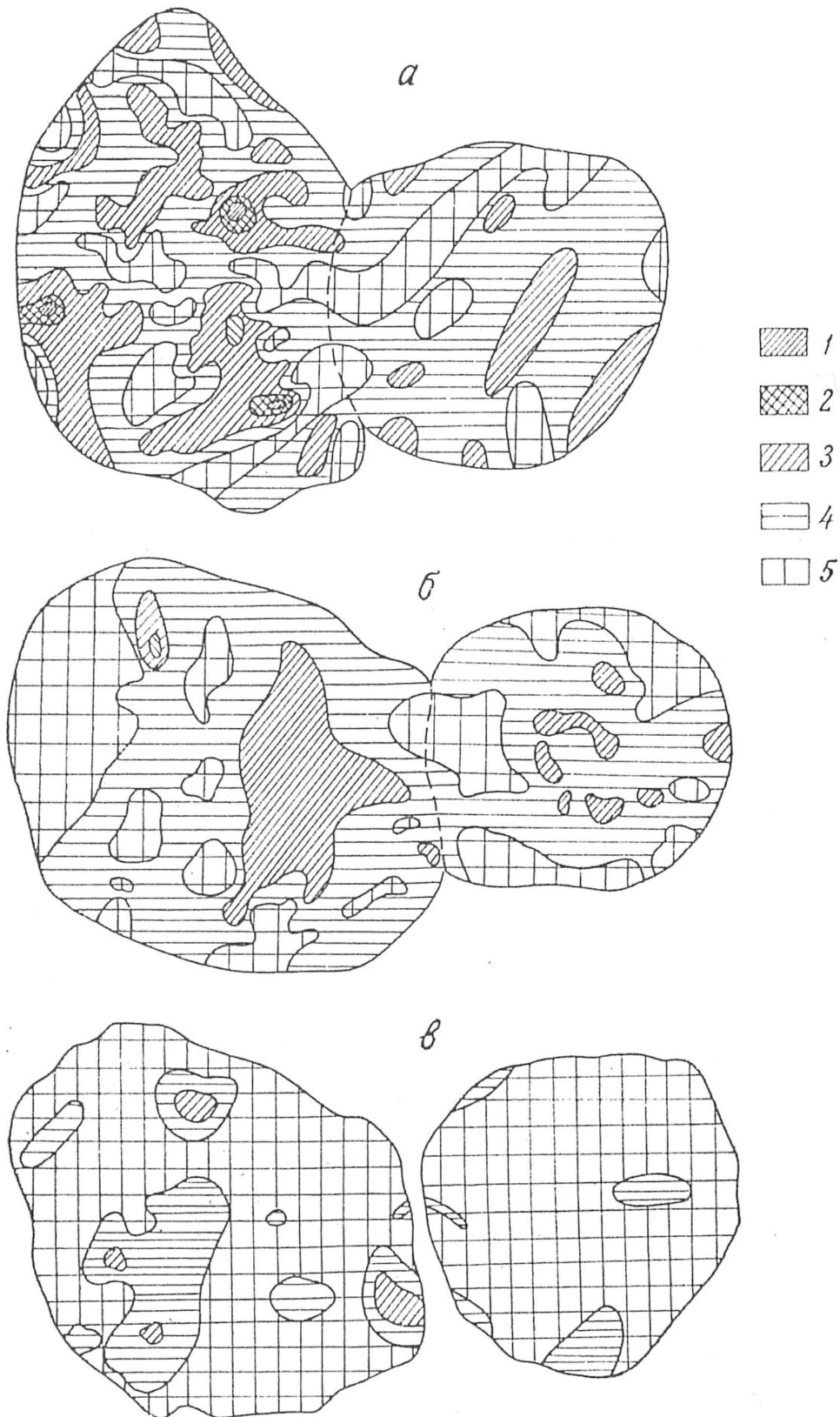
ния инертных компонентов кимберлитов ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{FeO}$ ,  $\text{P}_2\text{O}_5$ , частично  $\text{K}_2\text{O}$  и  $\text{Na}_2\text{O}$ ), ИМК (в том числе алмазов), количество и состав ксенолитов глубинных пород и некоторые другие параметры. Экзогенные факторы, включающие состав и механические свойства вмещающих пород, наличие и степень минерализации захороненных вод, определяют масштабы и направленность вторичных изменений кимберлитов, концентрация подвижных оксидов ( $\text{SiO}_2$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}^+$  и др.), содержание и состав коровых ксенолитов (в определенной степени) – размеры и морфологию кимберлитовых диатрем. Несмотря на то, что каждое кимберлитовое тело представляет собой индивидуальный объект, практически не повторяющийся в природе, между ними есть и общие признаки, характерные для отдельных типов пород. Одними из таких типов пород явля-

ются слюдистые (щелочные) кимберлиты, содержащие более 5%  $K_2O$ , который входит преимущественно в состав флогопита. Щелочность кимберлитов обратна их титанистости и возрастает от менее глубинных популяций к более глубинным (Афанасьев и др., 1980, 2000, 2002). Ранее В.Б. Василенко с соавторами (Василенко и др., 2000; Vasilenko et al., 2002) рассмотрены основные свойства слюдяных кимберлитовых пород Сибирской платформы (СП), включающие: а) типизацию по содержанию  $K_2O$ ; б) распределение пород различной щелочности в кимберлитовых полях; в) распределение пород разной щелочности в диатремах продуктивных кимберлитов; г) анализ причин, определяющих возникновение кимберлитов разной щелочности; д) алмазоносность кимберлитов разной щелочности. Выделение типов щелочных пород исследователями проведено по различным кимберлитовым полям СП, что позволило достоверно выделить четыре типа щелочных кимберлитов: ультраосновной, слюдистый, сублампрофировый и лампрофировый. Ультраосновной (базальтоидный) тип с модой 0,4%  $K_2O$  отличается от остальных минимумом при значении 0,75% оксида калия. Это касается и слюдистых кимберлитов, которым соответствует максимум в границах 0,75–1,17%  $K_2O$ . К сублампрофировому типу отнесены разновидности щелочных пород, лежащие в пределах 1,2–2,2%, а к лампрофировому – все составы с  $K_2O > 2,2\%$ . Нами (Зинчук, 1991, 1992, 2018; Зинчук и др., 1982, 1987, 1999, 2003) рекомендовано для отличия кимберлитов от щелочных пикритов и других видов пород использовать граничные значения  $TiO_2 > 2,5\%$  и  $\Sigma Fe < 10\%$ . Алмазоносность кимберлитов возрастает по мере падения содержания  $TiO_2$  от уровня 2,2%. Щелочные пикрит-кимберлиты с  $TiO_2$  в пределах от 2,2 до 2,8% также содержат (Квасница и др., 1999; Котельников и др., 1996, 2006; Котельников, Зинчук, 1996, 1997) некоторое количество алмазов, резко уменьшающееся в более титанистых разновидностях. Породы Малоботуобинского (МБАР), Далдыно-Алакитского (ДААР) и Верхнемунского (ВМАР) алмазоносных районов характеризуются преобладанием ультраосновных

составов, а в Накынском (НКП) Среднемархинского алмазоносного района (СМАР) и северных кимберлитовых полях преобладают образования с щелочным уклоном (Котельников, Зинчук, 2001<sub>1</sub>, 2001<sub>2</sub>). В кимберлитовых диатремах СП довольно широко распространены слюдистые образования, среди которых доминируют (Лапин и др., 2007; Мацюк, Зинчук, 2001; Симоненко и др., 2008) флогопит и продукты его изменения, нередко являющиеся порообразующими минералами (рис. 1, 2). В кимберлитах присутствуют три генерации флогопита. Первая обычно представлена вкрапленниками таблитчатой и овальной формы, достигающими 5–7 см. Размеры чешуек слюд первой генерации отличаются в различных диатремах. Флогопиты второй генерации образуют в основной массе кимберлитов две группы мелких пластинчатых и чешуйчатых кристаллов: изометричные идиоморфные псевдогексагональные таблички и удлиненные пластинки. Третья генерация представлена чешуйчатым флогопитом с размерами выделений до нескольких миллиметров. Первые две генерации обычно окрашены в коричневый, бурый и зеленовато-бурый цвета, а третья имеет бурую, желтовато-бурую, золотистую или белесую окраску. Для большинства изученных флогопитов из кимберлитов характерна модификация  $1M$ , иногда с примесью  $2M_1$ . Установлены (Харьков и др., 1990, 1991; Serov et al., 2001) структурные и химические отличия. Севернее степень изменения флогопита не столь велика, но и здесь часть его замещена минералами новообразованиями, сохраняющими первичную форму исходного флогопита. Чешуйчатые выделения хлоритов из кимберлитовых пород состоят из пакетов типа  $\delta$  и  $\delta'$  (Зинчук и др., 2005, 2007, 2008; Котельников, Зинчук, 2001, 2003) и имеют различную степень упорядоченности структуры. Особенно сконцентрированы слюдистые выделения в основной массе кимберлитов, где они нередко являются порообразующими компонентами. Поскольку такие выделения в основной массе очень малы, возникают трудности при их изучении и особенно количественном учете.



**Рис. 1.** Схема распределения флогопита в кимберлитах различных опорных горизонтов трубки Удачная. Глубина от поверхности трубки (м): а – 15, б – 115, в – 280; концентрация флогопита (%): 1 – >20, 2 – 16-20, 3 – 12-16, 4 – 8-12, 5 – 4-8, 6 – 0-4



**Рис. 2.** Схема распределения хлорита в кимберлитах различных опорных горизонтов трубки Удачная. Глубина от поверхности (м): а – 15, б – 115, в – 280; концентрация хлорита (%): 1 – 20-25, 2 – 15-20, 3 – 10-15, 4 – 5-10, 5 – 0-5

Для решения последней задачи наиболее приемлем метод пересчета химических анализов на минеральный состав, разработанный раньше (Зинчук и др., 1982, 1987, 1993, 2003, 2013). Наиболее детально слюдистые образования изучены нами (рис. 1а-в, рис. 2а-в) на примере кимберлитовой *трубки Удачная* в ДААР, где кроме комплексной характеристики рассмотрены особенности их распределения как по латерали, так и на разведанную глубину диатремы (до 1 200 м). Закономерности вариации концентрации флогопита и образованного за счет его изменения хлорита изучены по материалам комплексного изучения трех опорных горизонтов, из которых отобраны образцы по сетке эксплуатационных скважин на расстоянии 40×40 м. Опорные горизонты расположены от дневной поверхности на глубинах (в м): 15 – верхний горизонт (рис. 1а, рис. 2а), 55 – средний горизонт (рис. 1б, рис. 2б) и 115 – нижний горизонт (рис. 1в, рис. 2в). По сути, эти опорные горизонты представляют типичный профиль коры выветривания (КВ), отражающий зоны (горизонты): плотных пород (нижний), зоны дезинтеграции (средний), гидролиза и выщелачивания (верхний). Распределение слюдистых образований на разведанную глубину диатремы изучали по керну скважин колонкового бурения.

Кимберлитовая трубка Удачная (Зинчук и др., 1993; Харьков и др., 1990, 1991), состоящая из двух сопряженных тел (восточного и западного), на поверхности имеет в плане форму искаженной восьмерки. Западное тело по площади крупнее восточного. В верхней части (примерно до глубины 250–270 м) оба тела либо контактируют (рис. 1а, рис. 2а), либо разобщены (рис. 1в, рис. 2в). Вмещающими породами с поверхности являются карбонатные отложения нижнего ордовика на глубине среднего и верхнего кембрия. Внутреннее строение обоих тел довольно сложное и неоднозначно интерпретируется различными исследователями (Василенко и др., 2000; Мацюк, Зинчук, 2001). Восточное тело сложено серыми, зеленовато- и темно-серыми кимберлитовыми брекчиями (КБ). Главные породообразующие компоненты – псевдоморфозы по оливину (реже свежий минерал), представленные смесью серпентина и кальцита. Отмечено повышенное (по

сравнению с западным телом) содержание ксенолитов глубинных пород и сравнительно пониженное – ксенолитов осадочных пород. В отдельных участках отмечены многочисленные (35–40%), по сравнению с западным телом, автолиты. Основная масса восточного тела сложена карбонат-серпентиновым агрегатом с мелкими выделениями рудного минерала, перовскита и микролитами кальцита. В отличие от этого, верхние части западного тела выполнены серыми и зеленовато-серыми КБ, интенсивно измененными вторичными процессами. Ксеногенный материал представлен обломками осадочных пород, кристаллических сланцев, реже – ультраосновных разностей. Цемент сложен карбонат-серпентиновым агрегатом с мелкими выделениями рудного минерала, измененных слюдистых образований с многочисленными мелкими псевдоморфозами по оливину, замещенными серпентином и карбонатами. Слюдистые образования присутствуют в кимберлитах диатремы практически на всю разведанную глубину. Значительное количество флогопита выявлено при картировании самого глубокого опорного горизонта, где достигает 20% и более. Для кимберлитов восточного тела отмечено (рис. 1а-в) постепенное уменьшение вверх по разрезу концентрации флогопита, которое не характерно для восточного тела. Установлена зональность с тенденцией убывания содержания минерала к периферии трубки. На верхнем горизонте диатремы концентрация флогопита редко превышает 5%.

Повышенные концентрации слюдистых минералов отмечены в кимберлитовых породах *трубок Нюрбинская и Ботубинская*, находящихся в СМАР СП, расположенных вблизи друг от друга на расстоянии 3 км и приуроченных к Вилуйско-Мархинской зоне разломов северо-восточного простирания (Зинчук, 1991, 1992; Хитров и др., 1987). Вмещающие кимберлитовые трубки породы представлены в НКП осадочными образованиями верхнего кембрия мархинской свиты и согласно залегающими на них породами нижнего ордовика олдондинской свиты. Разрез позднекембрийской толщи сложен преимущественно доломитами, в меньшей степени отмечаются известняки. Характерно также наличие тонковолокнистых пестро-

цветных и красноцветных доломитистых мергелей и аргиллитов. Осадочные образования нижнего ордовика относятся к комплексу биогенных, хемогенных и терригенных глинисто-карбонатных отложений шельфовых эпиконтинентальных морей с нормальной соленостью, накапливавшихся в условиях приливно-отливной аридной зоны. Разрезы сложены тремя ассоциациями литогенетических типов, характерных для дна мелководной равнины: волнисто- и горизонтально-слоистыми известковистыми или доломитистыми мергелями, глинистыми доломитами выровненных понижений; разнообразными известняками пологих возвышенных частей; волнисто-слоистыми аргиллитами центральных застойных частей понижений. Все литогенетические типы и их ассоциации ритмично переслаиваются, слагая пачки, пласты, слои и прослойки, что свидетельствует о существовании значительных фациальных переходов.

Перекрывающие кимберлитовые трубки породы представлены (Зинчук и др., 2013) нижнеюрскими терригенно-карбонатными образованиями мощностью до 70 м. Они сложены песками, слабо литифицированными песчаниками, аргиллитами, алевролитами с линзами и прослойками известняков. В нижней части толщи прослеживается мало-мощный горизонт, выполненный гравелитами. Последние состоят из неплохо отсортированных обломков выветрелых карбонатных пород, сцементированных глинисто-песчаным материалом. В структуре кимберлитовой трубки Ботуобинская выделяются (Зинчук, Бардухинов, 2021; Харьков и др., 1990, 1991) все элементы строения таковой: подводный канал (дайкообразное тело), диатрема и кратер. Все встреченные типы пород в данной трубке можно разделить на следующие фации кимберлитового магматизма: породы гипабисальной (субвулканической) фации представлены порфиоровыми кимберлитами (ПК), к жерловой отнесены автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ), а кратерная фация выполнена кимберлитовыми туфобрекчиями (КТБ). Порфиоровые кимберлиты образуют дайкообразное тело северо-восточного простирания. Макроскопически – это породы зеленого, голубовато-серого цвета различной тональности, сред-

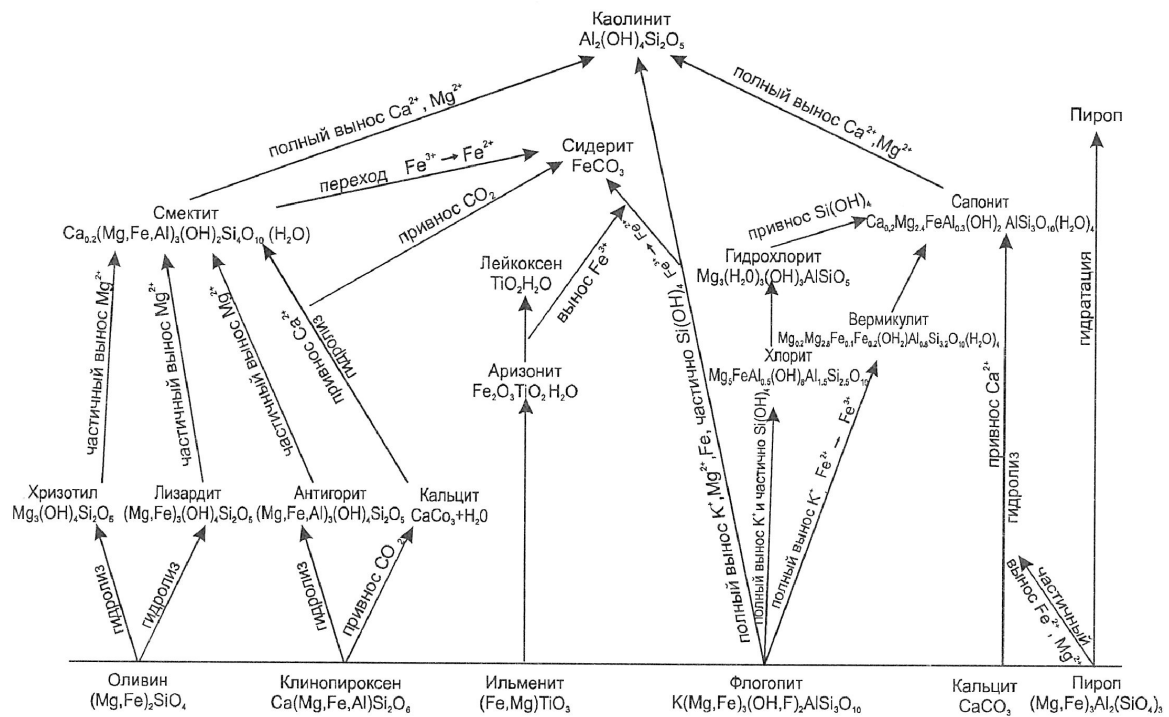
ней крепости и плотности. Структура их – средне-крупнопорфировая, текстура – массивная. Содержание ксеногенного материала варьирует в пределах 5–7% от объема породы, преобладают обломки пород кристаллического фундамента (гнейсы, кристаллические сланцы). Основная масса сложена зеленовато-серым мелко-тонкозернистым агрегатом серпентина. Порфиоровые выделения представлены псевдоморфозами серпентин-карбоната по оливину I и II генерации (по содержанию вторые преобладают), а также лейстами хлоритизированного флогопита и редкими зернами пироба и пикроильменита. АКБ характеризуются максимальным распространением. Структура пород – порфиоровая, текстура – брекчиевая. Обломочный материал представлен в основном обломками вмещающих пород нижнего палеозоя, реже встречаются породы кристаллического фундамента. Отмечаются единичные обломки ПК ранней фазы внедрения. Связующая масса брекчий характеризуется мелкозернистым строением и гетерогенным составом. В верхних горизонтах преобладает кальцит, хлорит и глинистые образования. С глубиной увеличивается доля серпентина и появляются лейсты флогопита. Среди ИМК встречаются зерна пироба и хромшпинелидов, а также единичные зерна пикроильменита. В целом содержание тяжелых минералов в АКБ также, как и в ПК, очень низкое. Автолиты представлены округлыми, изометричными или эллипсоидными обособлениями с концентрической зональностью. Широко распространены автолиты ядерного типа, ядрами которых служат псевдоморфозы по оливину или обломки ксеногенного материала. КТБ кратерной фации имеют распространение в северо-восточной части трубки и прослеживаются до глубины 250 м. Данные породы являются производными АКБ, для них характерно повышенное содержание (до 70%) ксеногенного материала в виде обломков вмещающих пород. Текстура – брекчиевая, структура – литокристаллокластическая, псефитовая. Цементирующая масса – брекчий гибридная, наряду с кимберлитовым материалом отмечается примесь глинистого и терригенного компонента за счет дезинтеграции ксенолитов.

*Трубка Нюрбинская* эродирована на уровне диатремовой части и представлена лишь двумя морфологическими элементами – дайкой и диатремой. Вся диатрема полностью сложена АКБ и характеризуется повышенным содержанием ксенолитов метаморфических пород фундамента. Ксенолиты осадочных отложений содержатся в меньшем количестве. Отмечаются единичные включения мантийных пород. Связующая масса представлена тонко-мелкозернистым глинисто-карбонатным агрегатом. Автолитовая текстура цемента в верхних горизонтах брекчий проявлена не четко, но с глубиной она приобретает более выраженный характер. Автолиты имеют ядерное строение и состоят из ядра (псевдоморфозы по оливину или обломки ксенолитов) и концентрически-зональной оболочки. Размер автолитов находится в прямой зависимости от величины ядра. Помимо автолитов в северо-восточной части трубки фиксируется ксеногенный материал в виде многочисленных обломков слюдястых порфировых кимберлитов. Верхние горизонты обеих трубок в определенной степени затронуты гипергенными процессами.

Породообразующие минералы, возникновение которых происходило в постмагматическую стадию становления кимберлитовых диатрем и в процессе их выветривания, относятся к карбонатам и силикатам. По отношению к процессам выветривания их можно разделить на исходные (материнские) и новообразованные (инфильтрационные). В первую группу входят все минералы материнской породы, независимо от их генезиса, т.е. минералы, возникшие до начала выветривания (первичные и вторичные минералы кимберлитов, а также ксенолиты). Среди силикатов к исходным минералам относятся слюды и образовавшийся по ним хлорит, частично кварц, серпентин и тальк, а также относящиеся сугубо к ксенолитам полевые шпаты. К новообразованным минералам, которые определяют характер коры выветривания (КВ), относятся силикаты, представленные смектитом и каолинитом, а также большинство пелитоморфного кварца и халцедон. Среди экзогенных образований отмечаются гидроксиды железа и сидерит, по-

следний возник в процессе инфильтрации поверхностных растворов.

Анализ минерального состава КВ кимберлитовых трубок Нюрбинская и Ботуобинская показывает (рис. 3) ряд общих закономерностей в ее развитии. Прежде всего, отмечается общность исходных вторичных образований, возникших еще до начала выветривания. Для обеих трубок свойственно обогащение отдельных участков дисептохлоритом, содержание которого по разрезам скважин является сравнительно постоянным и исчисляется десятками процентов. Вместе с тем слюда в КВ кимберлитов фиксируется довольно редко и содержится в небольших количествах, зато встречается тальк. Серпентин в обеих кимберлитовых телах прослеживается только в нижней части КВ и содержится в сравнительно небольшом количестве. Среди карбонатов встречаются кальцит и доломит, содержание последнего в КВ обеих диатрем несколько повышенное. Кроме этих минералов, которые являются вторичными по отношению к исходному оливиновому кимберлиту, в КВ содержатся полевые шпаты, вынесенные из фундамента и не успевшие разрушиться в процессе выветривания и предшествующего ему гидротермального изменения. Породы обеих трубок также обогащены вторичным мелкозернистым (до пелитоморфного) кварцем. Обычно он ассоциирует со смектитом или каолинитом, содержание которых довольно значительное и не сопровождается интенсивным обохриванием. Сидерит в КВ образует систему прожилков, а также встречается в виде выделений, что свидетельствует о его гипергенном происхождении. Все перечисленные особенности состава КВ двух кимберлитовых трубок указывают на сходность постмагматических преобразований в процессе становления этих тел, а также на сходные условия их выветривания, главным фактором которого является климат и гидродинамический режим. Сложность строения профиля КВ кимберлитов заключается в том, что, в отличие от кристаллических массивов, породы которых более или менее однородны, в случае трубок взрыва имеем дело с различными по происхождению брекчиями, сложенными самыми различными породами.



**Рис. 3.** Схема преобразования минералов в коре выветривания кимберлитовых пород Накынского поля СП

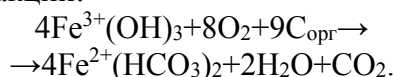
Брекчии возникают на разных этапах формирования кимберлитовой трубки: в процессе продвижения кимберлитовой магмы к поверхности они сложены кимберлитом (автолитовые брекчии), мантийным материалом и обломками вмещающих пород; брекчии, образовавшиеся в процессе сноса обломочного материала в кратер после взрыва (делювий); образовавшиеся в процессе начального (физического) выветривания, выполняющего трубку материала (зона крупной дресвы), представляющую собой сцементированный вторичными продуктами элювий. В связи со взрывом, который обычно проходит на пересечении глубинных разломов, а также возникновением дополнительных, не заполненных кимберлитовой магмой трещин и возникновением брекчий, образовавшаяся по этим довольно пестрым по составу породам КВ лишена обычной для площадного типа зональности. Она не может полностью отвечать и линейному типу однородных пород. Кроме того, на древние КВ нанесли свой отпечаток более поздние, до современных процессов включительно, что в значительной степени изменило первоначальный их вид. В различной степени претерпевают изменения породы трубки под воздействием глубинных эксгаляций, кото-

рые достоверно фиксируются появлением боратов.

Анализируя профиль КВ трубок Нюрбинская и Ботубинская, можно восстановить эволюцию так, как нам представляется. Под влиянием кислородсодержащих осадков сначала по кимберлитам образовалась смектиновая зона и, поскольку дождевые воды богаты кислородом, образовался смектит с окисным железом (нонтронит в случае выветривания серпентиновых кимберлитов и монтмориллонит-нонтронит при изменении хлоритизированных лампрофировых разновидностей, а также богатых ксенолитами пород фундамента). В дальнейшем произошла каолинизация под воздействием уголекислоты, выделявшейся в процессе разложения уголекислых остатков. Каолинизация в этих же условиях могла проходить также непосредственно по хлоритам, вермикулитам или непосредственно по флогопиту. Окисное железо в процессе каолинизации органическими кислотами экстрагируется в смектитах и других минералах, образуя комплексный анион, который окисляется кислородом воздуха с возникновением гидроокислов железа. Окисное железо восстанавливается в процессе окисления углерода углистых



остатков согласно следующей схематической реакции:



Повышенное выделение  $\text{CO}_2$  стабилизирует бикарбонатный ион, в связи с которым закисное железо может мигрировать, тем более что соли  $\text{Fe}^{2+}$  подвергаются гидролизу при более высоком рН, чем окисного. Бикарбонат при падении парциального давления  $\text{CO}_2$  распадается с образованием сидерита:



или, попадая в зону аэрации, окисляясь, подвергается дальнейшему гидролизу:



Для построения схемы процесса выветривания кимберлитовых пород НКП (рис. 3) взято за основу размещение по вертикали породообразующих минералов по разрезам пройденных в различных частях трубок Нюрбинская и Ботуобинская. В процессе выветривания возникают продукты, отвечающие данной физико-химической обстановке, с изменением которой они могут быть некоторое время стабильными (изменяются медленно) или сразу же растворяются, превращаются в другие соединения. С целью выяснения динамики формирования КВ данных кимберлитовых трубок, некоторые минералы этих классов рассмотрены более детально. Как уже отмечалось, главным карбонатным минералом является кальцит, образование которого происходит на всех стадиях формирования и становления кимберлитовых тел. Его присутствие в КВ свидетельствует о рН среды, в которой находились кальцитсодержащие породы. Разрушение кальцита в процессе выветривания пород происходит, главным образом, под воздействием угольной кислоты. Сероводородистая кислота в таких условиях является неустойчивой, вследствие окисления серы превращается в серную кислоту, под воздействием которой кальцит преобразуется в гипс. На разрушение кальцита большое влияние оказывает агрессивная составляющая угольной кислоты, та ее часть, которая расходуется на растворение углекислого кальция по уравнению:

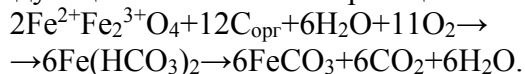


Данный процесс обратим, и поэтому после полного расходования углекислоты

наступает равновесие, а с последующим удалением  $\text{CO}_2$  реакция может пойти в обратном направлении. Этим объясняется появление кальцита в верхних горизонтах КВ, в то время как в нижних частях кальцит отсутствует. Доломит является более устойчивым к кислотам, чем кальцит, в связи с чем он часто фиксируется в зонах, лишенных карбонатов кальция. Доломит в процессе выветривания подвергается гидролизу, и бикарбонат кальция ведет себя аналогично таковому, возникшему при разложении кальцита, а бикарбонат магния в дальнейшем обычно входит в октаэдрические позиции слоистых силикатов (сметитов). Образование в КВ сидерита связано с окислительно-восстановительным потенциалом среды (Еh), в зависимости от которого могут возникать окислы (гидроокислы) железа или карбонаты. Сидерит может образовываться даже в слабокислых условиях, при рН раствора, равном немного больше пяти, в которых существование кальцита невозможно. Подобные условия в ходе выветривания обеспечиваются наличием в перекрывающих породах органического вещества, окисление которого приводит к предохранению поступившего из исходных пород железа от окисления и содействует образованию карбоната.

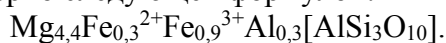
Угольная кислота оказывает влияние на изменение и возникновение главных силикатных минералов КВ, и в первую очередь это касается кандитов. Под ее влиянием на алюминийсодержащие минералы также происходит образование каолинита. Создавая кислые условия, уголекислота содействует полимеризации находящейся в растворе кремниевой кислоты с образованием кварцхалцедоновых агрегатов. Сохранение кварца с каолинитом, а также пропорциональное уменьшение в некоторых пробах хлорита и смектита, указывает на то, что источником кремнекислоты явились магнезиально-железистые слоистые силикаты, которые под воздействием углекислых растворов и органических кислот разрушались с удалением магнезии и отчасти железа, а порода обогащалась кварцем. Относительно небольшая часть глинозема исходных минералов в данных условиях связывалась в каолинит.

Магнетит в окислительной среде неустойчив. Происходит окисление закисного железа с частичным его удалением и образованием маггемита, который не очень стабилен и переходит в стабильный гематит. В условиях болотного выветривания магнетит замещается сидеритом, сохраняя реликты (и магнитные свойства октаэдрических кристаллов) по следующей схематической реакции:



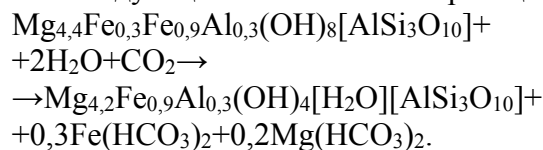
При этом происходит окисление значительного количества органических остатков и восстановление окисного железа.

В условиях гумидного выветривания ильменит и пикроильменит превращаются в полуразрушенную фазу, из которой выносятся часть закисного железа (до 14% его содержания), частично идет окисление (до 25% от его содержания). Магний при этом удерживается в структуре ильменита дольше. Подобного рода образования, сохранившие внешнюю форму, цвет ильменита и содержащие, кроме реликтов исходного минерала, а также гематита и анатаза, принято называть аризонитом. В гидротермальных условиях обычно происходит непосредственное замещение ильменита пелитоморфной кристаллической фазой, представленной рутилом, анатазом или брукином. При этом резко меняется цвет агрегата. В процессе экстракции агрессивными водами из аризонитата всего железа остается зерно пелитоморфного агрегата светло-коричневого цвета – лейкоксен, состоящий из существовавших уже в аризоните полиморфных разновидностей оксида титана и молекул воды. Пикроильменит часто содержит включения слюды. Нередко он бывает окружен перовскитом. Флогопит в основном замещается 14-ангстремовым хлоритом и встречается только в виде реликтов среди хлоритовых чешуй. Флогопиты магматогенного происхождения характеризуются повышенным содержанием глинозема, и поэтому образовавшиеся по ним хлориты содержат алюминий не только в тетраэдрических, но и в октаэдрических позициях с примерно следующей формулой:



Образовавшийся при повышенных температурах дисептохлорит в ходе выветривания, в зависимости от интенсивности прохожде-

ния процесса и наличия дополнительных компонентов, трансформируется в гидрохлорит по следующим схематическим реакциям:



Вследствие присоединения протона к оставшимся гидроксилам «бруситовой прокладки» и превращения их, таким образом, в молекулы воды, гидрохлорит трансформируется в смектит. При этом количество тетраэдрического алюминия не уменьшается. Смектит представлен сапонитом, а при наличии достатка глинозема может образоваться бейделит. При интенсивном химическом выветривании под воздействием углекислоты каолинит образуется непосредственно по хлориту (или даже по флогопиту), а промежуточные фазы не возникают.

Гранаты характеризуются наличием различной толщины келифитовой оболочки, возникшей в процессе взаимодействия магматического расплава с образовавшимся пиропом. Они бывают представлены триоктаэдрической слюдой, но чаще образовавшимися по ней вторичными минералами: серпентином и особенно хлоритом. Последний в процессе выветривания изменяется обычным для данного элювия путем, т.е. так же, как и флогопит. Сам же гранат претерпевает изменения, которые не приводят к резкому изменению его физических свойств и заключаются, прежде всего, в экстракции закисного железа с образованием своего рода канальцев и дальнейшим окислением оставшейся его части, т.е. он остается неизменным.

Оливин в исследуемых трубках замещается, главным образом, серпентином, нередко в сочетании с карбонатами. Вторичные изменения оливина начинаются гидролизом, который для кимберлитовых пород заключается в его серпентинизации с образованием псевдоморфоз, полностью или только в центральной части сложенных лизардитом 1Т. При этом часть железа обособляется с образованием магнетита. Другая часть входит в состав лизардита и в магнетит преобразуется только при хризотилизации последнего. Хризотил нередко возникает с лизардитом, когда эти минералы образуют совместно кайму на краю псевдоморфоз, а также вдоль

различных трещин в исходном оливине или псевдоморфозе по нему. Магнетита особенно много возникает в процессе серпофитизации, когда образуются его конкреции размером в несколько сантиметров, а сам серпофит сложен хризотилом.

В процессе выветривания минералов группы серпентина образуется смектит, октаэдрические позиции которого выполнены теми же катионами, что в исходном минерале, только в других соотношениях. Вынос значительного количества магнезии восполняется в некоторой степени окислившимся железом, а также извлечением содержания кремнезема, в результате чего возникает трёхэтажный слой смектита, нехватка положительного заряда которого компенсируется входением в октаэдры трехзарядных катионов и в первую очередь окислившегося железа. Поскольку серпентиновые минералы (хризотил и лизардит) не содержат тетраэдрического алюминия, то кремнекислородный этаж (сетка), частично унаследовавший их структуру, должен состоять из одних кремнекислородных тетраэдров. Однако в случае повышения щелочности раствора часть алюминия может приобретать тетраэдрическое окружение кислорода и присоединяться к кремнекислородному этажу образующегося смектита. Трёхэтажные слоистые силикаты в процессе гидротермального воздействия и выветривания претерпевают частичные изменения, вследствие которых происходит их трансформация в другие подобного же строения образования. В подтверждение этого, кроме геологических наблюдений, имеется достаточно много экспериментальных данных, свидетельствующих о наибольшей устойчивости к кислотному воздействию кремнекислородных сеток вместе с находившимся в них тетраэдрическим алюминием. Количество последнего в хлоритах определяют путем кислотного выщелачивания, при котором он остается в нерастворимом остатке. То же самое можно отнести и к слюдам (особенно триоктаэдрическим), которые в процессе трансформации в сильно магнезильной среде превращаются в хлориты или вермикулиты со сбережением трёхэтажного алюминий-кремниевого слоя, заряд которого зависит, главным образом, не от замещений в тетраэдрах, а от октаэдриче-

ских позиций. В связи с этим, при изменении среды из кислой на вызванную обычно избытком в растворе кальция нейтральную или слабощелочную деградированные слюды, вермикулит, а также хлориты трансформируются в сапонит и при этом часть количества алюминия остается в тетраэдрическом этаже. Однако сапонит образуется не только за счет трансформации в него слюд или хлоритов, но также в процессе разложения туфов, плагиоклазов, различных пород, в которых имеется много тетраэдрического алюминия и магнезии. Последняя в избытке содержится в КБ и при наличии алюмосиликатов (флогопита) из самих кимберлитов, биотита, плагиоклазов и стекла с вмещающих пород в гидротермальных условиях, и в процессе выветривания при повышенном содержании кальция и натрия возникает сапонит, который может служить поисковым признаком на кимберлитовые тела.

Отмечены существенные различия в направленности и схеме преобразования КВ на терригенно-карбонатных породах нижнего палеозоя (рис. 4), широко развитых рядом с кимберлитовыми диатремами и из-за обобщенности верхних горизонтов трудно различающимися. Подвергшиеся выветриванию исходные породы в таких профилях представлены алевролитами, песчаниками с известково-доломитовым цементом и прослоями карбонатизированных аргиллитов. В рассматриваемых породах в нижних частях профилей выветривания довольно широким распространением пользуются преимущественно диоктаэдрические слоистые силикаты политипных модификаций  $1M$  и  $2M_1$  ( $1M \gg 2M_1$ ). С ними ассоциируются следующие аутигенные минералы: триоктаэдрический хлорит с небольшой примесью хлорит-монтмориллонитового смешанослойного образования (ХМСО) с преобладанием неразбухающих пакетов, т.е. с тенденцией к упорядоченному чередованию их с подчиненными – разбухающими. Реликтовые минералы представлены кварцем, микроклином, санидином, альбитом, олигоклазом, пиритом и магнетитом. В средней зоне (рис. 4) гидрослюда  $1M$  как менее устойчивая фаза по сравнению с модификацией  $2M_1$  частично переходит в монтмориллонит-гидрослюдистое смешано-

слоиное образование (МГСО), в котором подчиненные – неразбухающие слои неупорядоченно чередуются с преобладающими – разбухающими. Полную деструкцию претерпевает хлорит, а постпиритная  $H_2SO_4$  приводит (Зинчук, 1991, 1992) к возникновению метастабильных фаз: ярозита, алунита, алюминита, базальюминита и гипса. В верхней зоне (рис. 4) в кислой среде из остаточных продуктов разложения первичных минералов синтезируется каолинит. При этом за счет трансформации МГСО, характеризующегося наименьшей стабильностью в рассматриваемой зоне, кристаллизуется каолинит I генерации с полубеспорядочной структурой, наследуемой от весьма разупорядоченного минерала-предшественника. Из продуктов разложения кислых плагиоклазов возникает также каолинит II генерации с относительно несовершенной структурой. По наиболее устойчивому в профиле выветривания микроклину развивается каолинит III генерации с более упорядоченной структурой. В результате окисления магнетита в верхнем горизонте профиля КВ образуется гематит, гётит и гидрогётит. В то же время гидрослюда  $2M_1$  остается сравнительно стабильной, и в

сравнении с реликтами гидрослюда 1М соотношение их претерпевает инверсию ( $2M_1 > 1M$ ).

Таким образом, проведенными исследованиями впервые апробирована методика минералогического картирования отдельных горизонтов сложно построенных кимберлитовых диатрем, показавшая широкое развитие как в плане, так и на разведанную глубину слюдястых образований. Концентрация флогопита уменьшается вверх по разрезам и в значительной мере контролируется степенью постмагматических и гипергенными преобразованиям пород диатрем. К верхам кимберлитовых трубок увеличивается роль хлорита, образованного за счет трансформации и изменения флогопита. На распределение слюдястых образований влияет как количество алюмосиликатов, так и интенсивность их переработки. В верхних частях диатрем в процессе постмагматического и гипергенного изменения пород за счет уменьшения роли флогопита, увеличивается концентрация хлорита, что следует учитывать при проведении прогнозно-поисковых работ на алмазы на таких территориях.

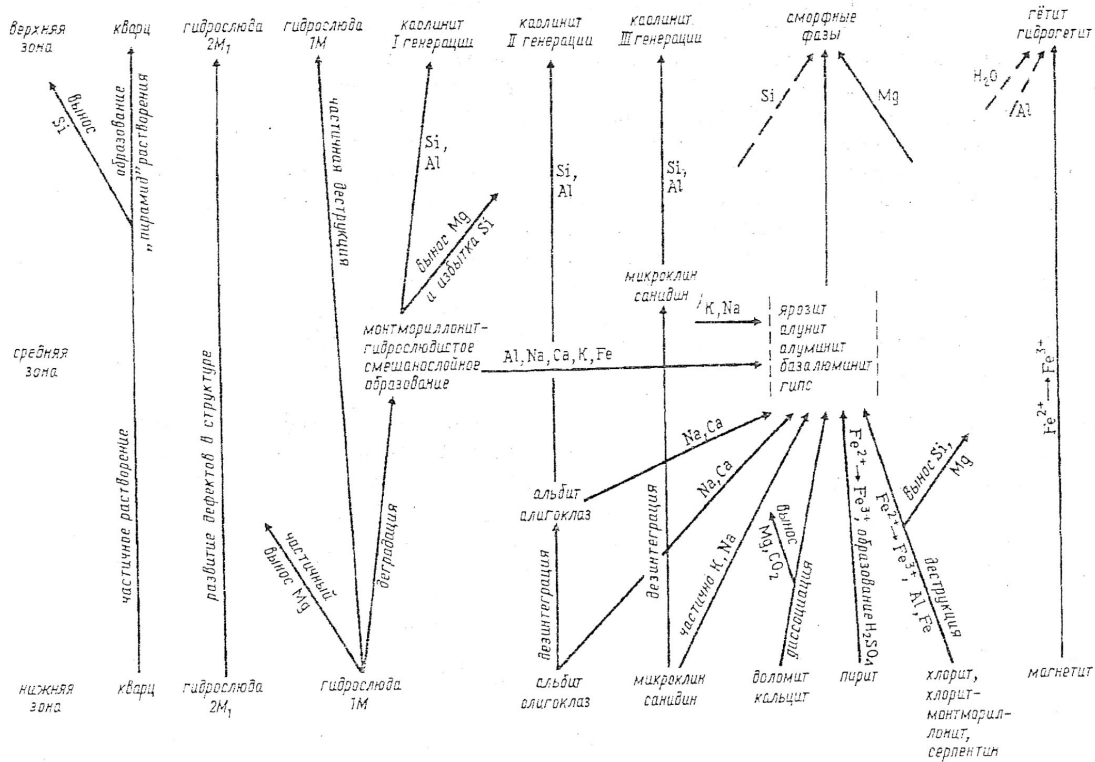


Рис. 4. Схема преобразования минералов в коре выветривания кимберлитовых пород Накынского поля СП

Анализируя результаты комплексного изучения кимберлитов СП, можно отметить несколько типов щелочности алмазоносных пород. В направлении от центра платформы в северном направлении уменьшается роль алмазоносных кимберлитов. В пределах кимберлитовых полей северной части СП щелочные породы представлены магматитами пикритов, а ультраосновные типы – кимберлитами низких уровней продуктивности, что указывает на нахождение областей образования расплавов этих пород вне зоны устойчивости алмаза. В отличие от этого, кимберлиты МБАР, СМАР и ДААР формировались в диапазоне всей области устойчивости алмазов. Проведенными исследованиями обогащенных слюдистыми образованиями пород кимберлитовых диатрем НКП показано, что в верхних их горизонтах доминируют АКБ. Порфиновый кимберлит встречается фрагментарно в виде обломочного материала, что связано с более ранним внедрением. Кимберлитовые брекчии характеризуются переменным составом вкрапленников и связующей матрицы, что отражается на цветовой гамме самих пород и их физико-механическим свойствам. Ксенолиты в кимберлитах НКП представлены преимущественно обломками вмещающей терригенно-карбонатной толщи, реже отмечаются обломки метаморфических и мантийных пород. Распределение ксенолитов в диатремах неравномерное, максимальное их количество приурочено к приконтактовым частям трубок при незначительном увеличении содержания с глубиной. Для пород трубок характерно низкое содержание минералов тяжелой фракции, среди которых доминируют гранаты и аутигенные пирит и гидроокислы железа; в меньшей мере встречаются магнетит, пикроильменит, хромит и хромдиопсид. По химическим данным исследуемые породы из диатрем СП принадлежат одному петрохимическому типу кимберлитов, а установленные вариации концентраций петрогенных оксидов связаны с разной интенсивностью протекания постмагматических и гипергенных процессов на разных глубинах месторождения. Зафиксированные неоднородности в геохимическом поле обусловлены степенью вторичного изменения пород, а также спецификой формирования и становления

трубки. В постмагматическую и гипергенную стадии произошло существенное изменение кимберлитов с широким (до 90%) развитием минералов-новообразований, среди которых преобладают серпентин, карбонаты, флогопит и продукт его изменения – хлорит. Вторичные минералы существенно влияют на изменение физико-механических свойств кимберлитов, что отражается на устойчивости качественно-количественных параметров алмазного сырья. Проведенный корреляционный анализ распределения вторичных минералов с потенциальной алмазоносностью кимберлитов показал обратную зависимость содержания слюды, кварца и доломита с концентрацией полезного компонента в изученных месторождениях. Характерной особенностью алмазов из кимберлитов изученных диатрем является доминирование прозрачных (или полупрозрачных) индивидов октаэдрического и переходного от октаэдрического к ромбододекаэдрическому габитусов I разновидности при заметном содержании алмазов с оболочкой IV разновидности. Отмечено преобладание однородных кристаллов с розово-сиреневым свечением и двухзонным внутренним строением. В кристаллах алмаза отмечена связь примеси азота с кристалломорфологией, причем наиболее обогащены этой примесью плоскогранные октаэдры, что приводит к их хрупкости и сравнительно легкому их растрескиванию на разнообразные осколки.

Отмеченная в результате проведенных исследований последовательность изменения минералогических ассоциаций вверх по разрезам профилей выветривания кимберлитов во многом определяется открытой системой минералообразования. Оптимальный для них диапазон изменения среды обычно располагается при рН от слабощелочной до слабокислой. В слабощелочных условиях, наиболее типичных для затронутых гипергенными процессами (особенно ультраосновных кимберлитов), возникают алюмосиликаты, в которых Al, подобно Si, образует тетраэдры –  $AlO_4$  (сапонит, вермикулит, хлорит, ди- и триоктаэдрические смешанослойные образования). В отличие от этого в нейтральной и слабокислой среде синтезируются силикаты и алюмосиликаты с преобладанием в структуре октаэдрического Al (каолинит, мета- и

гидрогаллузит). При этом рН в условиях углекислотного выветривания снижается с 8 в нижних горизонтах до 4, а сернокислотного – до 1,5–2,5. Различный механизм изменения неслоистых и слоистых минералов в процессе выветривания открывает возможность (в дополнение к дифференциации пород по степени их силификации) отдельно выделять и исследовать среди главнейших двух групп пород (т.е. ультраосновных и основных, с одной стороны, средних и кислых – с другой) также такие важные их различия, как бесслюдястые и слюдястые. Развитие в средних частях профилей выветривания бесслюдястых пород смектитов, а в аналогичных горизонтах слюдястых также и смешанослойных образований (особенно монтмориллонит-гидрослюдястого типа), позволяет надежно идентифицировать тип исходных пород не только в элювии, но и в осадочных толщах, обогащенных продуктами размыва выветрелого материала. Значительную помощь в этом может оказать оценка степени упорядоченности гипергенных минералов, унаследованная от структур гипогенных фаз. Аналогичный механизм преобразования исходных пород в КВ в течение геологической истории Земли в неогее показывает, что происходящие при этом процессы имеют универсальный характер и не зависят ни от возраста образовавшегося элювия, ни от положения выветрелого материала при близком типе пород в различных регионах.

### Библиографический список

- Афанасьев В.П., Елисеев А.П., Надолинный В.А., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Рылов Г.М., Томиленко А.А., Горяинов С.В., Юрьева О.П., Сонин В.М., Чепуров А.И.* Минералогия и некоторые вопросы генезиса алмазов V и VII разновидностей (по классификации Ю.Л. Орлова) // Вестник ВГУ. Геология. 2000. № 10. С. 79–97.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н.* Основные литодинамические типы ореолов индикаторных минералов кимберлитов и обстановки их формирования // Геология рудных месторождений. 1999. Т. 41. № 3. С. 281–288.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Полигенез алмазов в связи с проблемой коренных источников россыпей северо-востока Сибирской платформы // ДАН. 1998. Т. 361. № 3. С. 366–369.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Логвинова А.М.* Особенности распределения россыпных алмазов, связанных с докембрийскими источниками // ЗРМО. 2009. Т. 138. № 2. С. 1–13.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Тычков С.А.* Проблема докембрийской алмазоносности Сибирской платформы // Вестник ВГУ. Геология. 2002. № 1. С. 19–35.
- Афанасьев В.П., Зинчук Н.Н., Харькив А.Д., Соколов В.Н.* Закономерности изменения мантийных минералов в коре выветривания кимберлитовых пород // Сб. Минералогия зоны гипергенеза. М.: Наука. 1980. С. 45–54.
- Афанасьев В.П., Похиленко Н.П., Логвинова А.М., Зинчук Н.Н., Ефимова Э.С., Сафьянников В.И., Красавчиков В.О., Подгорных М.М., Пругов В.П.* Особенности морфологии и состава некоторых хромшпинелидов алмазоносных площадей в связи с проблемой «ложных» индикаторов кимберлитов // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 12. С. 1729–1741.
- Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г.* Геодинамический контроль размещения кимберлитовых полей центральной и северной частей Якутской кимберлитовой провинции (петрохимический аспект) // Вестник ВГУ. Геология. 2000. № 9. С. 37–55.
- 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 // Сб. Геологические аспекты минерально-сырьевой базы Акционерной компании «АЛРОСА»: современное состояние, перспективы, решения. Дополнительные материалы по итогам региональной научно-практической конференции «Актуальные проблемы геологической отрасли АК «АЛРОСА» и научно-методическое обеспечение их решений», посвященной 35-летию ЯНИГП ЦНИГРИ АК «АЛРОСА». Мирный: МГТ. 2003. С. 50–84.
- Зинчук Н.Н.* Особенности алмазоносности разных фаз внедрения кимберлитов // Отечественная геология. 2017. № 1. С. 105–114.
- Зинчук Н.Н.* Сравнительная характеристика вещественного состава коры выветривания кимберлитовых пород Сибирской и Восточно-Европейской платформ // Геология и геофизика. 1992. Т. 33. № 7. С. 99–109.
- Зинчук Н.Н.* Особенности минералов слюд в кимберлитах // Вестник ВГУ. Геология. 2018. № 2. С. 29–39.
- Зинчук Н.Н., Бардухинов Л.Д.* О специфике изучения алмаза при прогнозно-поисковых рабо-

тах (на примере Сибирской платформы) // Руды и металлы. 2021. № 3. С. 59–75.

*Зинчук Н.Н., Борис Е.И., Яныгин Ю.Т.* Особенности минерации алмаза в древних осадочных толщах (на примере верхнепалеозойских отложений Сибирской платформы). Мирный: МГТ. 2004. 172 с.

*Зинчук Н.Н., Зинчук М.Н., Котельников Д.Д., Жухлистов А.П., Шлыков В.Г.,* Структурно-кристаллохимические преобразования слоистых минералов на разных стадиях гипергенного изменения кимберлитов // Известия вузов. Геология и разведка. 2002. № 1. С. 47–60.

*Зинчук Н.Н., Зуев В.М., Коптиль В.И., Чёрный С.Д.* Стратегия ведения и результаты алмазопроисковых работ // Горный вестник. 1997. № 3. С. 53–57.

*Зинчук Н.Н., Коптиль В.И., Борис Е.И., Липашова А.Н.* Типоморфизм алмазов из россыпей Сибирской платформы как основа поисков алмазных месторождений // Руды и металлы. 1999. № 3. С. 18–30.

*Зинчук Н.Н., Котельников Д.Д., Гориков А.И.* Идентификация и генезис лизардит-сапонитового смешанослойного образования в кимберлитах одной из трубок Южной Африки // Литология и полезные ископаемые. 2003. № 1. С. 87–96.

*Зинчук Н.Н., Котельников Д.Д., Соколов В.Н.* Изменение минерального состава и структурных особенностей кимберлитов Якутии в процессе выветривания // Геология и геофизика. 1982. № 2. С. 42–53.

*Зинчук Н.Н., Мельник Ю.М., Серенко В.П.* Апокимберлитовые породы // Геология и геофизика. 1987. Т. 28. № 10. С. 66–72.

*Зинчук Н.Н., Савко А.Д., Крайнов А.В.* Кимберлиты в истории Земли. Труды НИИ геологии ВГУ. Учебное пособие. Воронеж: Изд-во ВГУ. 2013. Вып. 68. 100 с.

*Зинчук Н.Н., Савко А.Д., Шевырев Л.Т.* Историческая минерация в 3-х томах: Т. 1. Введение в историческую минерацию. Воронеж: Изд-во ВГУ. 2005. 590 с.

*Зинчук Н.Н., Савко А.Д., Шевырев Л.Т.* Историческая минерация в 3-х томах: Т. 2. Историческая минерация древних платформ. Воронеж: Изд-во ВГУ. 2007. 570 с.

*Зинчук Н.Н., Савко А.Д., Шевырев Л.Т.* Историческая минерация в 3-х томах: Т. 3. Историческая минерация подвижных суперпоясов. Воронеж: Изд-во ВГУ. 2008. 622 с.

*Зинчук Н.Н., Спецус З.В., Зуенко В.В., Зуев В.М.* Кимберлитовая трубка Удачная. Вещественный состав и условия формирования. Новосибирск: Изд-во НГУ. 1993. 147 с.

*Квасница В.Н., Зинчук Н.Н., Коптиль В.И.* Типоморфизм микрокристаллов алмаза. М.: Недра-Бизнесцентр. 1999. 224 с.

*Котельников Д.Д., Домбровская Ж.В., Зинчук Н.Н.* Основные закономерности выветривания силикатных пород различного химического и минералогического типа // Литология и полезные ископаемые. 1995. № 6. С. 594–601.

*Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н.* Геологическая интерпретация результатов изучения глинистых минералов в осадочном чехле земной коры // Вестник ВГУ. Геология. 2001. № 12. С. 45–51.

*Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н.* Об аномалиях общей схемы преобразования разбухающих глинистых минералов при погружении содержащих их отложений в стратисферу // Вестник ВГУ. Геология. 2003. № 2. С. 57–68.

*Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н.* Особенности глинистых минералов в отложениях различных осадочных формаций // Известия вузов. Геология и разведка. 1997. № 2. С. 53–63.

*Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н.* Типоморфные особенности и палеогеографическое значение слюдяных минералов // Известия вузов. Геология и разведка. 1996. № 1. С. 53–61.

*Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н.* Условия накопления и постседиментационного преобразования глинистых минералов в отложениях терригенной формации // Бюл. МОИП. Отд. геол. 2001. Т. 76, № 1. С. 45–53.

*Котельников Д.Д., Зинчук Н.Н., Кузьмин В.А.* Морфогенетические разновидности каолинита в корях выветривания и осадочном чехле земной коры. Статья I. Механизм образования каолинита в корях выветривания различных петрохимических типов пород // Известия вузов. Геология и разведка. 2006. № 5. С. 19–25.

*Латин А.В., Толстов А.В., Василенко В.Б.* Петрохимические особенности кимберлитов Средне-Мархинского района в связи с проблемой геохимической неоднородности кимберлитов // Геохимия. 2007. № 12. С. 1292–1304.

*Мацюк С.С., Зинчук Н.Н.* Оптическая спектроскопия минералов верхней мантии. М.: Недра-Бизнесцентр. 2001. 428 с.

*Симоненко В.И., Толстов А.В., Васильева В.И.* Новый подход к геохимическим поискам кимберлитов на закрытых территориях // Разведка и охрана недр. 2008. № 4–5. С. 108–112.

*Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Богатых М.М., Романов Н.Н.* Модель кимберлитовой трубки Якутской алмазоносной провинции // Советская геология. 1990. № 1. С. 23–29.

*Харькив А.Д., Зуенко В.В., Зинчук Н.Н., Крючков А.И., Уханов А.В., Богатых М.М.* Петрохимия кимберлитов. М.: Недра. 1991. 304 с.

Хитров В.Г., Зинчук Н.Н., Котельников Д.Д. Применение кластер-анализа для выяснения закономерностей выветривания пород различного состава // ДАН СССР. 1987. Т. 296. № 5. С. 1228–1233.

Grakhanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V. The age of predictable primary diamond sources in the northeastern Siberian platform // *Doklady Earth Sciences*. 2015. Vol. 465. no 2. P. 1297–1301. DOI: 10.1134/S1028334X15120193.

Serov I.V., Garanin V.K., Zinchuk N.N., Rotman A.Ya. Mantle sources of the kimberlite volcanism of the Siberian platform // *Petrology*. 2001. V. 9. № 6. P. 576–588.

Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Krasavchikov V.O., Kuznetsova L.G., Khlestov V.V., Volkova N.I. Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry // *Journal of Geochemical Exploration*. 2002. V. 76. № 2. P. 93–112. DOI: 10.1016/S0375-6742(02)00219-4.

## Specific Features of Hydrothermal and Hypergene Alterations of Micaceous Kimberlites

<sup>a, b</sup>N.N. Zinchuk

<sup>a</sup>West Yakutia Scientific Center Academy of Sciences of the Republic of Sakha (Yakutia) 5/1 Tikhonova Str., Mirnyy 678175, Russia. E-mail: nnzinchuk@rambler.ru

<sup>b</sup>Vilyuyskaya Geological Exploration Expedition PJSC «ALROSA» 7B Vilyuyskaya Str., Mirnyy 678174, Russia

Basing on complex research of accessory and rock-forming minerals of kimberlite rocks of pipes Udachnaya, Nyurbinskaya and Botuobinskaya, the processes of secondary mineral formation have been determined in details. The products of kimberlite rocks alteration have been studied, the scheme of initial minerals transformation has been constructed, typomorphic features of final weathering products have been revealed, the profile of kimberlite rocks' weathering crust of Nakyn field has been established. It was shown that saponite in Yakutian kimberlite pipes has a hydrothermal origin that make it possible to use it during prospecting of kimberlite bodies under certain conditions. Complex comparative investigation of ancient weathering crusts of rocks of various chemical and mineralogical composition allowed tracing specific features of their hypergene alteration and typomorphic indications of eluvial products that is very important for solving a number of applied tasks. It is possible to differentiate at the structural level the same varieties of primary minerals in redeposited weathering products of various rocks, as well as identify secondary stratified silicates, differing in the last case either by character of octahedral positions' occupation in their structure, either by the way of mutual superposition of individual silicate layers or by their polytypic character. That is why redeposited in ancient sedimentary thick layers products of various types of weathering crusts preserve structural and chrystallochemical features in relation to the minerals of eluvial strata, allowing tracing the ways of terrigenous material transport into sedimentation basins (including diamondiferous material).

Key words: *ancient weathering crusts; hypogene and hypergene minerals; typomorphism of minerals; diamondiferous strata.*

### References

Afanasyev V.P., Eliseev A.P., Nadolinnyi V.A., Zinchuk N.N., Koptil' V.I., Rylov G.M., Tomilenko A.A., Goryainov S.V., Yureva O.P., Sonin V.M., Chepurov A.I. 2000. Mineralogiya i nekotorye voprosy genezisaalmazov V i VII raznovidnostey (po klassifikatsii Yu.L.Orlova) [Mineralogy and some questions of the V and VII diamonds types (by Y.L.Orlov classification) provenance], *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. Seriya: Geologiya, pp. 79–97. (in Russian)

Afanasyev V.P., Zinchuk N.N. 1999. Osnovnye litodinamicheskie tipy oreolov indikatornykh mineralov kimberlitov i obstanovki ikh formirovaniya [Main lithodynamic types of dissemination aureoles of index kimberlite minerals and environments of

their formation]. *Geologiya rudnykh mestorozhdeniy*, pp. 281–288. (in Russian)

Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Koptil V.I. 1998. Poligenezalmazov v svyazi s problemoy korennykh istochnikov rossypey severo-vostoka Sibirskoy platformy [Polygenesis of diamonds in connection with the problem of the source rocks of placers in the northeast of the Siberian platform]. *Doklady Akademii Nauk*, pp. 366–369. (in Russian)

Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Logvinova A.N. 2009. Osobennosti raspredeleniya rossypnykhalmazov, svyazannykh s dokembriiskimi istochnikami [Distribution of placer diamonds related to precambrian sources]. *Zapiski RMO*, pp. 1–13. (in Russian)

Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Tychkov S.A. 2002. Problema dokembriiskoy almazonosnosti Sibirskoy platformy [Problems of precambrian dia-



mondiferousness of the Siberian platform]. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. Seriya: Geologiya, pp. 19–35. (in Russian).

*Afanasyev V.P., Zinchuk N.N., Kharkiv A.D., Sokolov V.N.* 1980. Zakonomernosti izmeneniya mantiinykh mineralov v kore vyvetrivaniya kimberlitovykh porod [Patterns of changes in mantle minerals in the weathering crust of kimberlite rocks]. In: *Minerageniya zony gipergeneza*. Moskva, Nauka, pp. 45–54. (in Russian)

*Afanasyev V.P., Pokhilenko N.P., Logvinova A.M., Zinchuk N.N., Efimova E.S., Safyannikov V.I., Krasavchikov V.O., Podgornykh M.M., Prugov V.P.* 2000. Osobennosti morfologii i sostava nekotorykh khromshpinelidov almazonosnykh ploshchadey v svyazi s problemoy «lozhnykh» indikatorov kimberlitov [New morphogenetic type of Cr-spinel in diamondiferous areas in connection with the problem of false kimberlite indicators]. *Geologiya i Geofizika*, pp. 1729–1741. (in Russian)

*Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Kuznetsova L.G.* 2000. Geodinamicheskiy kontrol razmeshcheniya kimberlitovykh poley tsentralnoy i severnoy chastey Yakutskoy kimberlitovoy provintsii (petrokhimicheskiy aspekt) [Geodynamic control of the placement of kimberlite fields in the central and northern parts of the Yakutiya kimberlite province (petrochemical aspect)]. *Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta*. Seriya: Geologiya, pp. 37–55. (in Russian)

*Egorov K.N., Zinchuk N.N., Mishenin S.G., Serov V.P., Sekerin A.P., Galenko V.P., Denisenko E.P., Baryshev A.S., Menshagin Yu.V., Koshkarev D.A.* 2003. Perspektivy korennoy i rossypnoy almazonosnosti yugo-zapadnoy chasti Sibirskoy platformy [Perspectives of primary and placer diamonds potential of southwestern part of Siberian platform]. *Geological aspects of the mineral resource base of the Joint-Stock Company «ALROSA»: current state, prospects, solutions*. Mirnyy, MGT, pp. 50–84. (in Russian)

*Zinchuk N.N.* 2017. Osobennosti almazonosnosti raznykh faz vnedreniya kimberlitov [Specific features of diamond potential of different kimberlite intrusion phases]. *Otechestvennaya Geologiya*, pp. 105–114. (in Russian)

*Zinchuk N.N.* 1992. Sravnitel'naya kharakteristika veshchestvennogo sostava kory vyvetrivaniya kimberlitovykh porod Sibirskoy i Vostochno-Evropeskoj platformy [Comparative characteristics of weathering crust composition of kimberlite rocks on the Siberian and East-European platforms]. *Geologiya i Geofizika*, pp. 99–109. (in Russian)

*Zinchuk N.N.* 2018. Osobennosti mineralov slyud v kimberlitakh [Features of micaceous formations in kimberlite]. *Vestnik Voronezhskogo*

*Gosudarstvennogo Universiteta*. Seriya: Geologiya, pp. 29–39. (in Russian).

*Zinchuk N.N., Bardukhinov L.D.* 2021. O spetsifike izucheniya almaza pri prognozno-poiskovykh rabotakh (na primere Sibirskoy platformy) [Diamond study features in forecasting and prospecting (Siberian platform)]. *Rudy i metally*, pp. 59–75. (in Russian)

*Zinchuk N.N., Boris E.I., Yanygin Yu.T.* 2004. Osobennosti mineragenii almaza v drevnikh osadochnykh tolshchakh (na primere verkhnepaleozoiskikh otlozheniy Sibirskoy platformy) [Features of diamond minerageny in ancient sedimentary strata (on the example of Upper Paleozoic deposits of the Siberian Platform)]. *Mirnyy. MGT*, p. 172. (in Russian)

*Zinchuk N.N., Zinchuk M.N., Kotelnikov D.D., Zhukhlistov A.P., Shlykov V.G.* 2002. Strukturno-kristallokhimicheskie preobrazovaniya sloistykh mineralov na raznykh stadiyakh gipergennogo izmeneniya kimberlitov [Structural-crystallochemical transformations of layered minerals at different stages of hypergene alteration of kimberlites]. *Izvestiya vuzov. Geologiya i Razvedka*, pp. 47–60. (in Russian)

*Zinchuk N.N., Zuev V.M., Koptil V.I., Chernyy S.D.* 1997. Strategiya vedeniya i rezultaty almazoposkovykh rabot [Strategy of conducting and results of diamond prospecting]. *Gornyy vestnik*, pp. 53–57. (in Russian)

*Zinchuk N.N., Koptil V.I., Boris E.I., Lipashova A.N.* 1999. Tipomorfizm almazov iz rossypey Sibirskoy platformy kak osnova poiskov almaznykh mestorozhdeniy [Typomorphism of diamonds from placers of the Siberian platform as a basis for diamond prospecting]. *Rudy i metally*, pp. 18–30. (in Russian)

*Zinchuk N.N., Kotel'nikov D.D., Gorshkov A.I.* 2003. Identifikatsiya i genesis lizardit-saponitovogo smeshanosloynogo obrazovaniya v kimberlitakh odnoy iz trubok Yuzhnoy Afriki [Identification and genesis of the mixed-layer lizardite-saponite phase in a kimberlite pipe, South Africa]. *Litologiya i Poleznye Iskopaemye*, pp. 87–96. (in Russian)

*Zinchuk N.N., Kotel'nikov D.D., Sokolov V.N.* 1982. Izmenenie mineralnogo sostava i strukturnykh osobennostey kimberlitov Yakutii v protsesse vyvetrivaniya [Changes in the mineral composition and structural features of Yakutian kimberlites during weathering]. *Geologiya i Geofizika*, pp. 42–53. (in Russian)

*Zinchuk N.N., Melnik Yu.M., Serenko V.P.* 1987. Apokimberlitovye porody [Apokimberlite rocks]. *Geologiya i Geofizika*, pp. 66–72. (in Russian)

*Zinchuk N.N., Savko A.D., Kraynov A.V.* 2013. Kimberlity v istorii Zemli [Kimberlites in the history

of the Earth]. Trudy NII geologii VGU, V. 68, p. 100. (in Russian)

Zinchuk N.N., Savko A.D., Shevyrev L.T. 2005. Istoricheskaya minerageniya. T. 1. Vvedenie v istoricheskuyu minerageniyu [Historical minerageny. Vol. 1. Introduction to the historical minerageny]. Voronezh, VGU, p. 590. (in Russian)

Zinchuk N.N., Savko A.D., Shevyrev L.T. 2007. Istoricheskaya minerageniya. T. 2. Istoricheskaya minerageniya drevnikh platform [Historical minerageny. Vol. 2. Historical mineralogy of ancient platforms]. Voronezh, VSU, p. 570. (in Russian)

Zinchuk N.N., Savko A.D., Shevyrev L.T. 2008. Istoricheskaya minerageniya. T. 3. Istoricheskaya minerageniya podvizhnykh superpoyasov [Historical minerageny. Vol. 3. Historical minerageny of the mobile super-belts]. Voronezh, VSU, p. 622. (in Russian)

Zinchuk N.N., Spetsius Z.V., Zuenko V.V., Zuev V.M. 1993. Kimberlitovaya trubka Udachnaya. Veshchestvennyy sostav i usloviya formirovaniya [Kimberlite pipe Udachnaya. Material composition and conditions of formation]. Novosibirsk, NSU, p. 147. (in Russian)

Kvasnitsa V.N., Zinchuk N.N., Koptil V.I. 1999. Tipomorfizm mikrokristallov almaza [Typomorphism of diamond microcrystals]. Moskva, Nedra-Biznestsentr, p. 224. (in Russian)

Kotelnikov D.D., Dombrovskaya Zh.V., Zinchuk N.N. 1995. Osnovnye zakonomernosti vyvetrivaniya silikatnykh porod razlichnogo khimicheskogo i mineralogicheskogo tipa [The main patterns of weathering of silicate rocks of various chemical and mineralogical types]. Litologiya i poleznye iskopaemye, pp. 594–601. (in Russian)

Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. 2001. Geologicheskaya interpretatsiya rezultatov izucheniya glinistykh mineralov v osadochnom chekhle zemnoy kory [Geological interpretation of the clay minerals study results in the earth crust sedimentary cover]. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Geologiya, pp. 45–51. (in Russian)

Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. 2003. Ob anomalnykh obshchey skhemy preobrazovaniya razbukhayushchikh glinistykh mineralov pri pogruzhenii soderzhashchikh ikh otlozheniy v stratisferu [About anomalies of general transformation scheme of swelling argillaceous minerals during submersion of containing them sediments into stratisphere]. Vestnik Voronezhskogo Gosudarstvennogo Universiteta. Seriya: Geologiya, pp. 57–68. (in Russian)

Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. 1997. Osobennosti glinistykh mineralov v otlozheniyakh razlichnykh osadochnykh formatsiy [Features of clay minerals in sediments of various sedimentary for-

mations]. Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka, pp. 53–63. (in Russian)

Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. 1996. Tipomorfnye osobennosti i paleogeograficheskoe znachenie slyudistykh mineralov [Typomorphic features and paleogeographic significance of mica minerals]. Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka, pp. 53–61. (in Russian)

Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N. 2001. Usloviya nakopleniya i postsedimentacionnogo preobrazovaniya glinistykh mineralov v otlozheniyakh terrigennoy formatsii [Conditions of accumulation and post-sedimentation transformation of clay minerals in the deposits of the terrigenous formation]. Bulletin of Moscow society of naturalists. Geological series, pp. 45–53. (in Russian)

Kotelnikov D.D., Zinchuk N.N., Kuzmin V.A. 2006. Morfogeneticheskie raznovidnosti kaolinita v korakh vyvetrivaniya i osadochnom chekhle zemnoy kory. Statya I. Mekhanizm obrazovaniya kaolinita v korakh vyvetrivaniya razlichnykh petrokhimicheskikh tipov porod [Morphological and genetic kaolinite varieties in the weathering crusts and mantle of the earth's crust. Article I. Mechanism of kaolinite formation in the weathering crusts of different petrochemical rock types]. Izvestiya vuzov. Geologiya i razvedka, pp. 19–25. (in Russian)

Lapin A.V., Tolstov A.V., Vasilenko V.B. 2007. Petrogeokhimicheskie osobennosti kimberlitov Sredne-Markhinskogo rayona v svyazi s problemoy geokhimicheskoy neodnorodnosti kimberlitov [Petrogeochemical characteristics of the kimberlites from the Middle Markha region with application to the problem of the geochemical heterogeneity of kimberlites]. Geokhimiya, pp. 1292–1304. (in Russian)

Matsyuk S.S., Zinchuk N.N. 2001. Opticheskaya spektroskopiya mineralov verkhney mantii [Optical spectroscopy of the upper mantle minerals]. Moskva, Nedra-Biznestsentr, p. 428. (in Russian)

Simonenko V.I., Tolstov A.V., Vasilyeva V.I. 2008. Novyy podkhod k geokhimicheskim poiskam kimberlitov na zakrytykh territoriyakh [New approach to geochemical prospecting for kimberlite at the overburden areas]. Razvedka i okhrana neдр, pp. 108–112. (in Russian)

Kharkiv A.D., Zinchuk N.N., Bogatykh M.M. 1990. Model kimberlitovoy trubki Yakutskoy almazonosnoy provintsii [Model of a kimberlite pipe of the Yakutsk diamondiferous province]. Sovetskaya geologiya, pp. 23–29. (in Russian)

Kharkiv A.D., Zuenko V.V., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I., Ukhanov A.V., Bogatykh M.M. 1991. Petrokhimiya kimberlitov [Petrochemistry of kimberlites]. Moskva, Nedra, p. 304. (in Russian)

*Khitrov V.G., Zinchuk N.N., Kotelnikov D.D.* 1987. Primenenie klaster-analiza dlya vyyasneniya zakonornostey vyvetrivaniya porod razlichnogo sostava [Application of cluster analysis to clarify the patterns of weathering of rocks of different composition]. Doklady AN USSR, pp. 1228–1233. (in Russian)

*Grakhanov S.A., Zinchuk N.N., Sobolev N.V.* 2015. The age of predictable primary diamond sources in the northeastern Siberian platform. Doklady Earth Sciences, pp. 1297–1301. doi: 10.1134/S1028334X15120193.

*Serov I.V., Garanin V.K., Zinchuk N.N., Rotman A.Ya.* 2001. Mantle sources of the kimberlite volcanism of the Siberian platform. Petrology, pp. 576–588.

*Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Krasavchikov V.O., Kuznetsova L.G., Khlestov V.V., Volkova N.I.* 2002. Diamond potential estimation based on kimberlite major element chemistry. Journal of Geochemical Exploration, pp. 93–112. doi: 10.1016/S0375-6742(02)00219-4.