

## НОВЫЕ ДАННЫЕ О КИМБЕРЛИТОВОМ МАГМАТИЗМЕ ЮГО-ЗАПАДА АНГОЛЫ

**К.Н. Егоров, Е.Ф. Романько\*, В.Т. Подвысоцкий\*,  
С.М. Саблуков\*\*, В.К. Гаранин\*\*\*, Д.Б. Дьяконов\***

*Институт земной коры СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Лермонтова, 128, Россия*

*\*ВО „Зарубежгеология“, 119002, Москва, Калюшин пер., 10, Россия*

*\*\* Центральный научно-исследовательский геолого-разведочный институт цветных и благородных металлов РАН,  
113545, Москва, Варшавское шоссе, 129Б, Россия*

*\*\*\* Московский государственный университет, 119992, Москва, Воробьевы горы, Россия*

Приводятся первые сведения о геологии и вещественном составе кимберлитов Юго-Западной Анголы, на территории которой вскрыты и изучены девять кимберлитовых трубок. На севере рассматриваемого региона расположены трубки Чихолонго и Шикватите, на юге — куст из четырех трубок Галанже-I—IV и в центральной части — трубки Очинжау, Палуэ и Виньяти.

Кимберлиты по всем вещественно-индикационным параметрам относятся к классическим кимберлитам: содержат мантийные включения ультрабазитов, эклогитов, полный спектр барофильных минералов, в том числе алмазной фации глубинности, а также алмазы. Кимберлитовые трубки сложены петрографически разнообразными типами пород — туфопесчаниками, туфобрекчиями, кимберлитовыми брекчиями, автолитовыми кимберлитовыми брекчиями, а также массивными порфировыми кимберлитами. В целом по особенностям минералого-петрографического и петрогеохимического составов изученные кимберлиты наиболее близки кимберлитам группы I Южной Африки и кимберлитам Fe-Ti серии Архангельской алмазносной провинции.

При сопоставлении минералогических особенностей кимберлитов юго-запада Анголы намечается закономерное увеличение доли мантийного (в том числе алмазносного) материала глубинных фаций в кимберлитовых трубках в направлении с юга на север. Алмазносные кимберлиты северной группы трубок структурно локализованы в крупных деструктивных зонах северо-восточного простирания, а неалмазносные кимберлитовые трубки центральной и южной групп — к субмеридиональным разломам.

*Кимберлиты, алмазы, барофильные минералы, петрохимический состав, редкоземельные элементы, Ангола.*

### NEW DATA ON KIMBERLITE MAGMATISM IN SOUTHWESTERN ANGOLA

**K.N. Egorov, E.F. Roman'ko, V.T. Podvysotsky, S.M. Sablukov, V.K. Garanin, and D.B. D'yakonov**

First data on the geologic and geochemical compositions of kimberlites from nine kimberlite pipes of southwestern Angola are presented. In the north of the study area, there are the Chikolongo and Chicuatite kimberlite pipes; in the south, a bunch of four Galange pipes (I–IV); and in the central part, the Ochinjau, Palue, and Viniaty pipes.

By geochemical parameters, these rocks are referred to as classical kimberlites: They bear mantle inclusions of ultrabasites, eclogites, various barophilic minerals (including ones of diamond facies), and diamonds. The kimberlite pipes are composed of petrographically diverse rocks: tuffstones, tuff breccias, kimberlite breccias, autolith kimberlite breccias, and massive porphyric kimberlites. In mineralogical, petrographic, and geochemical compositions the studied kimberlites are most similar to group I kimberlites of South Africa and Fe-Ti-kimberlites of the Arkhangel'sk diamondiferous province.

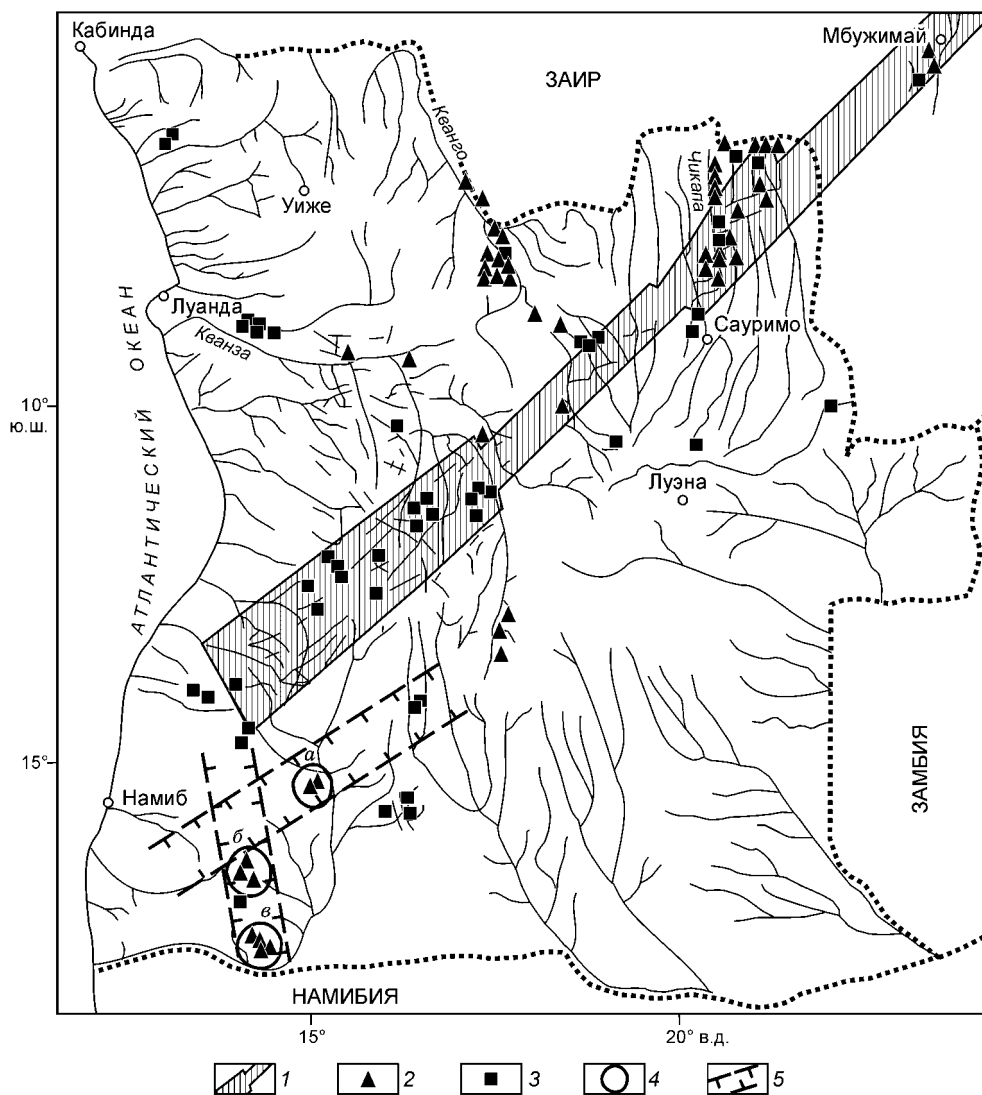
Comparison of the mineralogical compositions of kimberlites from southwestern Angola showed that the portion of mantle (including diamondiferous) material of depth facies in kimberlite pipes regularly increases in the S-N direction. The northern diamond-bearing kimberlite pipes are localized in large destructive zones of NE strike, and the central and southern diamond-free pipes, in faults of N-S strike.

*Kimberlites, diamonds, barophilic minerals, geochemical composition, rare-earth elements, Angola*

### ВВЕДЕНИЕ

При общей уникальности запасов природных алмазов африканского континента более пятой их части сконцентрированы в северо-восточной части Анголы, где наибольший интерес представляет алмазносная субпровинция Лунда-Норте. Сведения о кимберлитовом магматизме и его алмазносности в юго-западной части Анголы практически отсутствуют [Зуев и др., 1988; Романько и др., 2005]. Информация о кимберлитовых телах ограничивается значками на мелкомасштабных геологических картах, составленных в ходе алмазопоисковых работ португальскими и южно-африканскими геологами в 1970-е годы.

В настоящей работе представлены результаты впервые выполненного комплексного изучения кимберлитов юго-запада Анголы. Исследования проводились геологической группой Всероссийского



**Рис. 1. Схема размещения кимберлитовых трубок Анголы (по данным [Зуев и др., 1988], с дополнениями).**

1 — зона максимальной концентрации трубчатых тел кимберлитов и карбонатов; 2 — кимберлиты; 3 — карбонаты; 4 — группы кимберлитовых трубок Юго-Западной Анголы: *а* — северная, *б* — центральная, *в* — южная; 5 — зоны крупнейших разрывных нарушений.

внешнеэкономического объединения „Зарубежгеология“ в 2001—2004 гг. в рамках соглашений о сотрудничестве со СПЭЙД БИЗНЕС Лимитед, РАЛТ Ю.А.Р.Л. и Геологическим институтом Анголы. В результате этих работ на территории юго-западной части Анголы вскрыты и изучены девять кимберлитовых трубок (рис. 1). На севере рассматриваемого региона расположены тр. Чихолонго и Шикватите, на юге — куст из четырех трубок Галанже-І—ІV и в центральной части территории — трубки Очинжау, Палуэ и Виньяти.

#### РЕГИОНАЛЬНАЯ ГЕОЛОГИЯ

Все девять кимберлитовых тел приурочены к Южно-Ангольскому щиту и размещаются по обрамлению наложенной кайнозойской впадины Кунене, которая структурно контролируется системой погребенных меридиональных нарушений в породах фундамента щита. Эти разломы имеют древнее заложение и связаны с формированием раннепротерозойского интрузивного массива Кунене. К этим разломам меридиональной ориентировки приурочены южная (Галанже-І—ІV) и центральная (Очинжау, Палуэ, Виньяти) группы кимберлитовых трубок. Структурами локализации кимберлитовых трубок север-

ной группы (Шикватите, Чихолонго) являются протяженные зоны разрывных нарушений северо-восточного простирания (см. рис. 1).

Кимберлитовые трубки Виньяти и Палуэ прорывают раннепротерозойские граниты и сиениты комплекса Кибала, диатремы Чихолонго, Шикватите и Очинжау — раннепротерозойские анортозиты комплекса Кунене, тр. Галанже-I—IV — архейские образования комплекса основания Южно-Ангольского шита.

По геолого-геофизическим данным тр. Шикватите имеет каплевидную форму с раздувом в северной части тела; размеры трубки  $480 \times 80$  м, в районе раздува 240 м. Трубка Чихолонго представляет собой овал, вытянутый в меридиональном направлении, с размерами  $240 \times 90$  м. По морфологии тр. Очинжау, Палуэ схожи с эллипсами, имеющими размеры  $220 \times 80$  и  $570 \times 140$  м соответственно. По геолого-геофизическим данным тр. Галанже-I имеет округлую форму с размерами  $64 \times 64$  м. Трубки Галанже-II, III представляют собой два сближенных тела, соединенных на уровне эрозионного среза узкой (20 м) перемычкой вмещающих пород. Размеры тр. Галанже-II —  $130 \times 70$  м, тр. Галанже-III —  $150 \times 100$  м. Трубка Галанже-IV имеет сложную форму и меридиональную ориентировку по длинной оси; размеры тела составляют  $140 \times 40$  м.

Присутствие в кимберлитовых трубках юго-запада Анголы реликтов кратерных отложений свидетельствует о небольшом эрозионном срезе диатрем. Наиболее широко реликты вулканогенно-осадочных отложений развиты в кимберлитовых трубках Чихолонго и Палуэ.

K-Ag датирование флогопита из основной массы кимберлита тр. Шикватите, проведенное в лаборатории изотопной геологии и геохронологии ИГЕМ РАН (г. Москва), показало возраст  $372 \pm 8$  млн лет. При расчете возраста использовались константы:  $\lambda_k = 0.581 \cdot 10^{-10}$  год<sup>-1</sup>,  $\lambda_\beta = 4.962 \cdot 10^{-10}$  год<sup>-1</sup>,  $^{40}\text{K} = 0.01167$  (ат. %). Возраст остальных кимберлитовых трубок радиологическими методами не определен.

#### ПЕТРОГРАФИЯ КИМБЕРЛИТОВ

Изученные кимберлитовые трубки по геологическому строению одно- (Шикватите, Галанже-II—IV), двух- и трехфазные (Виньяти, Чихолонго, Очинжау), которые сложены несколькими разновидностями пород — туфопесчаниками, туфобрекчиями, кимберлитовыми брекчиями, автолитовыми кимберлитовыми брекчиями и массивным кимберлитом.

#### СЕВЕРНАЯ ГРУППА ТРУБОК

**Трубка Чихолонго** сложена преимущественно среднепорфировым кимберлитом с содержанием ксеногенного материала менее 5 %. Среди ксенолитов встречаются обломки анортозитов, песчаников, известняков, редко гранатовых перидотитов, пироксенитов.

Порфировые выделения размером от 2—3 до 8—10 мм представлены псевдоморфозами по оливину (25—30 %), диопсидом (до 5 %), а также пикроильменитом и пиропом (до 2 %). Псевдоморфозы по оливину 1- и 2-й генераций выполнены агрегатом сапонита, серпентина, карбоната с примесью оксидов железа. Мелкочешуйчатая основная масса сложена хлоритом, сапонитом, тальком, гидрослюдами и редкими зернами перовскита, карбоната, оксидно-рудных фаз.

В западной части тр. Чихолонго сохранились реликты кратерных отложений, выполненных косо-слоистым туфопесчаником. Терригенный материал алевропесчаной размерности в туфопесчанике представлен кварцем (25—35 %), полевыми шпатами, главным образом микроклином (5—10 %), обломками осадочных пород, преимущественно алевролитами на железистом цементе (2—5 %). Кимберлитовый материал в породе установлен в виде карбонатных псевдоморфоз по оливину (10—15 %), измененного флогопита (1—2 %), рудных минералов (1—2 %), зерен граната и единичных обломков глубинных включений с клинопироксеном, а также обломков кимберлитов (2—5 %). Цемент породы (35—40 %) по составу железисто-карбонатно-глинистый; по структурному типу — контактово-поровый, участками базально-поровый. Терригенный материал имеет низкую сортировку и слабую окатанность обломков.

Под туфопесчаниками вскрыта крупнообломочная туфобрекчия характерного красного цвета. Количество угловатых обломков песчаников, известняков, кварцитов, реже анортозитов размером от 0.5—1 см до отдельных глыб величиной 7 м превышает 30 %. В туфобрекчии присутствуют мелкопорфировые автолиты (до 5 %) изометричной формы размером 8—10 мм. Псевдоморфозы по вкрапленникам оливина (10—15 %) выполнены тонкопластинчатым сапонитом. Цемент брекчии железисто-песчано-глинистый.

**Трубка Шикватите** выполнена в основном среднеобломочной кимберлитовой брекчией, на отдельных участках диатремы встречаются небольшие блоки мелкопорфирового кимберлита. Содержание ксенолитов в брекчии превышает 30—40 % от объема породы; практически все они представлены обломками анортозитов, замещенных в разной степени анальцимом, натролитом, пектолитом. Среди мантийных включений присутствуют существенно измененные гранатовые перидотиты, ильменитовые

пироксениты. В брекчии отмечаются редкие обломки мелкопорфирового кимберлита размером до 2.5 см. Вкрапленники в количестве 40—50 % представлены псевдоморфозами 1-й генерации — крупными зернами овальной формы размером 1—7 мм. Мелкие (0.01—0.8 мм) зерна замещенного оливина 2-й генерации образуют сростки с зернами перовскита. Оливин 1- и 2-й генераций замещен агрегатом минералов: цеолитами (натролитом, пектолитом), хлоритом, тальком, лимонитом, карбонатом, редко серпентином. Вкрапленники флогопита в породе встречаются редко, они гидратизированы.

Связующая масса кимберлитовой брекчии представлена преимущественно агрегатом серпентина с участием тонкочешуйчатых слюдистых минералов, оксидно-рудных фаз и мелкозернистого карбоната, образующего скопления и тонкие прожилки.

#### ЦЕНТРАЛЬНАЯ ГРУППА ТРУБОК

**Трубка Очинжау** сложена в основном голубовато-серой мелкообломочной брекчией с обломками анортозитов и песчаников до 10—15 %. Вкрапленники псевдоморфоз по оливину 1-й генерации, выполненные карбонатом, серпентином, слюдистыми минералами, оксидами железа составляют 15—20 %. Основная масса брекчии представлена чешуйчатым агрегатом слюдистых минералов и карбоната с микрокристаллами перовскита, оксидно-рудных фаз, флогопита.

В краевых частях трубки брекчия обогащается несортированным мелкозернистым терригенным материалом, состоящим из кварца (5—10 %) и полевых шпатов (5—7 %). Размеры зерен 0.01—0.6 мм, форма угловатая, таблитчатая; окатанных зерен не отмечается. С глубиной кимберлитовая брекчия переходит в автолитовую, содержащую до 30 % автолитовых обособлений изометричной формы размером 0.5—3 см.

**Трубка Виньяти** представлена кимберлитовой брекчией и мелкопорфировым кимберлитом, для которых характерно проявление поздних гидротермальных процессов — окварцевания (развитие пленок и прожилков халцедона) и гематит-магнетитизации. На отдельных участках трубки брекчия наиболее интенсивно окварцована и хлоритизирована так, что структура породы полностью затушевана: о кимберлитовой природе брекчии свидетельствуют порфировые выделения пироба и пикроильменита. Содержание ксенолитов в кимберлитовой брекчии 15—20 %; обломки пород представлены гранитоидами, песчаниками, кислыми эффузивами, реже гранатовыми перидотитами. Количество небольших обломков мелкопорфирового кимберлита не превышает 5 %. Псевдоморфозы по оливину 1-й генерации в брекчии и порфировом кимберлите сложены хлоритом, кварцем и оксидами железа. Содержание псевдоморфоз по оливину 1-й генерации в брекчии 10—15 %, в массивном кимберлите — 25—30 %. Основная масса в изученных разновидностях пород представлена полиминеральным агрегатом хлорита, кварца и рудной пыли. Общее количество вторичного кварца в кимберлитовой брекчии и массивном кимберлите достигает 45—50 %.

**Трубка Палуэ** с поверхности сложена глыбовыми брекчиями вмещающих сиенитов, угловатые обломки которых сцементированы глинистым песчаником с кимберлитовым материалом. Кроме того, на отдельных участках трубки отмечаются субгоризонтальные прослои и линзы эпикластических отложений: разнозернистого песчаника, содержащего мелкие фрагменты кимберлита, зерна пироба, пикроильменита, измененные таблички флогопита. Породы кратерной фации перекрывают туфобрекцию кимберлитов, вскрытую на глубине более 4 м. Туфобрекчия зеленовато-розовой окраски содержит от 40 до 80 % обломков красно-розовых сиенитов. Включения измененных гранатовых перидотитов единичны. В глинистом цементе туфобрекчии отмечаются лейсты хлорита, вермикулита, редкие зерна пироба в келифитовых каймах и хромдиопсида.

#### ЮЖНАЯ ГРУППА ТРУБОК

**Трубка Галанже-I** выполнена с поверхности измененной и выветрелой туфобрекчией. Ксеногенный материал в брекчии представлен гранитогнейсами, сланцами, кислыми эффузивами. Ксенолиты размером от нескольких сантиметров до 0.5—0.6 м имеют форму от угловатой до овальной. Встречаются редкие мантийные включения флогопитовых пироксенитов, единичные обломки мелкопорфирового слюдистого кимберлита размером до 10 см. Псевдоморфозы по оливину 1-й генерации (<10 %) выполнены микрочешуйчатым агрегатом сапонита. Мелкие зерна (0.01—0.8 мм) полностью замещенного сапонитом оливина 2-й генерации составляют около 25 % и часто находятся в сростании с лейкоксенизированным перовскитом. В основной тонкочешуйчатой глинистой массе отмечаются редкие зерна рудных минералов, лейсты флогопита.

**Трубка Галанже-II** представлена зеленовато-серым среднемелкопорфировым кимберлитом с редкими обломками гранитогнейсов. Примечательной особенностью кимберлита является высокое содержание мантийных включений, выполненных гранатовыми пироксенитами и перидотитами. Псевдоморфозы по оливину 1-й генерации (10—15 %) замещены серпентином, сапонитом, а также карбонатом. Вкрапленники флогопита (1—2 %) образуют зерна овальной формы размером 0.3—1.5 мм.

Псевдоморфозы по оливины 2-й генерации (20—25 %) выполнены тонкопластинчатым агрегатом сапонита с карбонатом. Следует отметить, что отдельные образцы кимберлита содержат высокое количество карбонатных псевдоморфоз по оливины (до 70—80 %), хотя трубка залегает среди гранитогнейсов. Кроме того, в кимберлите интенсивно развита наложенная карбонатная минерализация в виде ветвящихся маломощных прожилков. Основная масса породы сложена гидрослюдистым агрегатом и содержит мелкие зерна перовскита, карбоната, лейсты измененного флогопита, тонкораспыленный лейкоксен.

**Трубка Галанже-III** сложена выветрелой кимберлитовой брекчией с обломками гранитогнейсов, сланцев и реже песчаников. Мантийные включения представлены редкими пироповыми серпентинитами, порфиновые вкрапленники (<10 %) — полностью замещенными сапонитом зернами оливина 1-й генерации. Содержание вкрапленников флогопита 5—10 %. Основная масса породы — это чешуйчатый агрегат сапонита с мелкими зернами лейкоксенизированного перовскита, реже окисленного рудного минерала.

**Трубка Галанже-IV** представлена сильно выветрелой, почти полностью глинизированной и карбонатизированной кимберлитовой брекчией с обломками гранитогнейсов, биотитовых сланцев, песчаников, кислых эффузивов. Мантийные включения и обломки кимберлитов ранних фаз внедрения не встречены.

Оливин 1-й генерации (5—10 %), полностью замещенный сапонитом, образует крупные (от 1—4 до 10 мм) вкрапленники округлой, неправильной, со следами резорбции формы. Вкрапленники флогопита (3—5 %) представлены овальными табличками размером 0.3—1.5 мм. Иногда он формирует сростки с клинопироксеном и измененным оливином. Псевдоморфозы сапонита по оливины 2-й генерации (30—35 %) характеризуются небольшими размерами (0.1—1 мм), идиоморфной формой. Основная масса породы гидрослюдистая, с редкими зернами перовскита, карбоната, апатита и лейстами измененного флогопита.

#### ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЙ СОСТАВ КИМБЕРЛИТОВ

Большинство изученных кимберлитов в различной степени преобразованы гидротермально-метасоматическими и гипергенными процессами. Интенсивное окварцевание кимберлитов тр. Виньяти полностью искажило не только первичный химический состав породы, но и концентрации малоподвижных в условиях гипергенеза элементов (табл. 1). В этой связи для исследования петрогеохимического состава кимберлитов юго-запада Анголы выбирались образцы с минимальной степенью вторичных изменений, а также с наименьшей засоренностью ксеногенным материалом. В тр. Шикватите кимберлиты содержат обилие мелких (менее 1—2 мм) обломков анортозитов, замещенных цеолитами. Поэтому тщательно очищенные от ксенолитов пробы кимберлитов тр. Шикватите все же сохраняют следы контаминации коровым материалом (см. табл. 1). Кимберлиты отличаются повышенным количеством оксидов  $Al_2O_3$  (9.85—10.9 мас.%) и  $Na_2O$  (1.15—1.97 мас.%), при этом всегда  $Na_2O > K_2O$ .

Петрохимической особенностью изученных кимберлитов являются пониженные количества  $MgO$  и повышенные —  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ . В координатах индексов контаминации коровым материалом (С.І.) и аккумуляции Fe-Ti оксидов (ІІм.І.) все фигуративные точки составов кимберлитов расположены вне полей слюдяных и базальтоидных кимберлитов Южной Африки (рис. 2). Высокие значения С.І. (1.4—3.1) в изученных кимберлитах определены, прежде всего, активным выносом  $MgO$  в процессе замещения породы сапонитом, тальком, хлоритом, цеолитами. Наибольшие количества  $MgO$  отмечаются в образцах кимберлитов тр. Чихолонго, Шикватите, содержащих серпентин (см. табл. 1).

На диаграмме  $CaO—MgO$  (рис. 3, а) кимберлиты не образуют четкий тренд, характерный для кимберлитов Якутии, в основном из-за контаминации коровым материалом и активного выноса  $MgO$  из породы. Пониженные количества  $MgO$  имеют не только карбонатизированные кимберлиты тр. Очинжау и Галанже-II, но и кимберлиты с очень низким содержанием карбонатных минералов (см. табл. 1).

Высокие величины индекса ІІм.І. (0.38—1.05) кимберлитов обусловлены повышенными содержаниями перовскита, ильменита и других Fe-Ti оксидных минералов основной массы. Кимберлиты тр. Очинжау, обр. 2938/25 тр. Галанже-I, а также

С.І. 6  
4  
2  
0

Слюдяные кимберлиты  
Группа ІА  
Группа ІВ  
Айликиты

0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0 ІІм.І.

1 2 3 4

**Рис. 2.** Диаграмма С.І.—ІІм.І. по У. Тейлору и др. [Taylor et al., 1994] для кимберлитов юго-запада Анголы.

Трубки: 1 — Галанже, 2 — Шикватите, 3 — Чихолонго, 4 — Очинжау. Поля групп ІА и ІВ соответствуют базальтоидным типам кимберлитов Южной Африки.

Химический состав (мас.%) кимберлитов Юго-Западной Анголы

Таблица 1.

Компонент	тр. Шикватите		тр. Чихолонго				тр. Очичжау		тр. Виньяти		тр. Галанже-1		тр. Галанже-II		тр. Галанже-III	тр. Галанже-IV				
	401/42	401/35	401/280	401/302	452/55	452/47.5	452/104	454/60	454/130	Ш-301	Ш-320	7329/26	7329/31	2310	2938/22	2938/25	2937/11	6224	2315	2935/12
SiO <sub>2</sub>	35.78	30.68	35.42	34.67	35.78	35.48	42.08	41.46	46.49	37.44	31.98	81.45	90.28	50.37	53.16	43.38	30.56	30.94	43.57	31.87
TiO <sub>2</sub>	2.38	4.62	1.52	1.53	2.70	2.40	1.82	2.54	1.41	5.24	4.01	0.74	0.24	1.62	1.42	5.34	2.42	1.97	1.75	1.64
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.22	10.50	10.90	9.85	5.08	5.73	5.75	5.03	4.45	6.57	5.70	2.52	1.20	7.67	6.95	5.12	4.10	3.89	5.55	3.30
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	3.90	6.07	3.24	3.31	5.40	6.95	6.30	6.30	4.73	11.20	8.62	5.81	3.02	6.35	5.02	10.24	5.95	6.39	7.32	5.38
FeO	5.12	5.66	4.88	5.01	4.28	2.55	2.32	1.90	1.42	1.80	1.62	1.50	1.55	0.75	1.42	1.22	1.06	0.65	0.32	1.34
MnO	0.10	0.12	0.10	0.10	0.12	0.10	0.10	0.06	0.10	0.21	0.18	0.02	0.03	0.08	0.10	0.15	0.13	0.12	0.12	0.09
MgO	21.83	17.13	22.12	20.79	24.94	23.80	18.87	18.48	17.23	14.60	12.30	1.37	0.62	13.80	14.96	15.23	14.31	16.95	20.48	16.53
CaO	6.36	9.14	7.08	8.78	8.20	6.56	5.98	5.48	7.15	9.13	17.36	0.56	0.17	3.19	3.30	3.49	18.48	14.33	3.04	16.24
Na <sub>2</sub> O	1.35	1.97	1.15	1.83	0.22	0.38	0.84	0.20	0.81	0.41	0.50	0.03	0.04	1.19	0.94	0.08	0.17	0.21	1.19	0.26
K <sub>2</sub> O	0.62	0.59	0.58	0.52	0.43	0.27	1.40	1.38	1.34	1.53	1.31	0.27	0.29	3.06	2.38	0.68	0.54	0.92	0.60	0.47
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.24	0.25	0.20	0.27	0.45	0.44	0.30	0.26	0.30	0.90	0.82	0.14	0.11	0.47	0.46	1.30	0.58	0.51	0.36	0.35
H <sub>2</sub> O <sup>-</sup>	2.08	1.84	2.75	2.66	2.28	4.50	6.00	9.06	6.03	5.75	3.83	2.63	0.78	7.18	4.93	6.97	4.53	6.30	9.62	2.85
H <sub>2</sub> O <sup>+</sup>	8.85	7.12	8.94	7.98	7.90	7.80	6.18	4.52	4.90	4.92	5.17	2.83	1.52	3.45	4.80	6.42	5.17	3.94	4.97	6.74
CO <sub>2</sub>	0.77	3.42	0.88	1.63	2.53	1.84	1.65	2.56	3.47	0.11	6.16	He обн.	0.11	0.17	He обн.	He обн.	11.66	12.27	0.12	12.76
S <sub>общ.</sub>	He обн.	<0.10	He обн.	0.54	He обн.	<0.10	He обн.	<0.10	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	He обн.	<0.05	He обн.	He обн.	He обн.	<0.05	<0.05	He обн.
Сумма	99.60	99.68	99.76	99.66	100.31	99.56	99.59	99.59	99.83	99.81	99.56	99.87	99.96	99.33	99.84	99.62	99.66	99.47	99.28	99.82

Примечание. Анализы выполнены в химической лаборатории ИЭК СО РАН (г. Иркутск), аналитик М.Н. Смагунова.

обр. 401/35 тр. Шикватите по значению индекса  $Im.I$  близки айликитам (см. рис. 2). По соотношению  $TiO_2-K_2O$  изученные кимберлиты попадают в поле кимберлитов I группы Южной Африки, кроме образцов тр. Галанже-I, которые соответствуют кимберлитам II группы (см. рис. 3, б). По уровню концентрации оксида титана кимберлиты относятся к умеренно- (1.41—2.7 мас.%  $TiO_2$ ) и высокотитанистым ( $TiO_2 > 4.0$  мас.%) кимберлитам [Богатиков и др., 2004].

Концентрации элементов-примесей в кимберлитах также зависят от интенсивности метасоматических и гипергенных преобразований пород. В окварцованных кимберлитах тр. Виньяти резко уменьшены концентрации практически всех микроэлементов, кроме Pb, U, Th (табл. 2). Остальные кимберлиты характеризуются умеренными, но неравномерными содержаниями элементов-примесей. Наиболее высокие концентрации Zr (161.58—248.08 г/т), Y (12.84—32.57 г/т),  $\Sigma REE$  (233.54—430.61 г/т) имеют кимберлиты тр. Галанже-I—III, Очинжау и обр. 452/47.5 тр. Чихолонго. В этих же образцах отмечается повышенное количество оксида фосфора (0.36—0.82 мас.%). Других закономерных связей между концентрациями элементов-примесей и химическими составами кимберлитов не наблюдается. Лишь содержания Ta (5.7—14.47 г/т) прямо коррелируют с количествами оксида титана (1.53—4.62 мас.%) в кимберлитах (см. табл. 1, 3).

Кимберлиты трубок Галанже-I—III и Виньяти по величине индикаторного  $Zr/Nb > 2$  (2.27—3.9) относятся к кимберлитам II группы Южной Африки [Taylor et al., 1994]. Кимберлиты тр. Галанже-I отличаются повышенными значениями индикаторных Ba/Nb (16.91), Rb/Nb (1.14), Ba/La (14.86), Ba/Th (92.65) и пониженными La/Yb (26.28), Ce/Y (5.67). По этим геохимическим признакам они наиболее близки кимберлитам накынского и золотицкого типов [Богатиков и др., 2001, 2004]. Следует отметить, что, с одной стороны, для кимберлитов тр. Галанже-I характерна хромит-хромдиопсид-пироповая ассоциация индикаторных минералов, пикроильменит очень редок, с другой — они отличаются более высокой концентрацией  $\Sigma REE$  (305.55 г/т) в сравнении с аномальными кимберлитами [Богатиков и др., 2004].

Кимберлиты трубок Чихолонго и Шикватите характеризуются умеренным

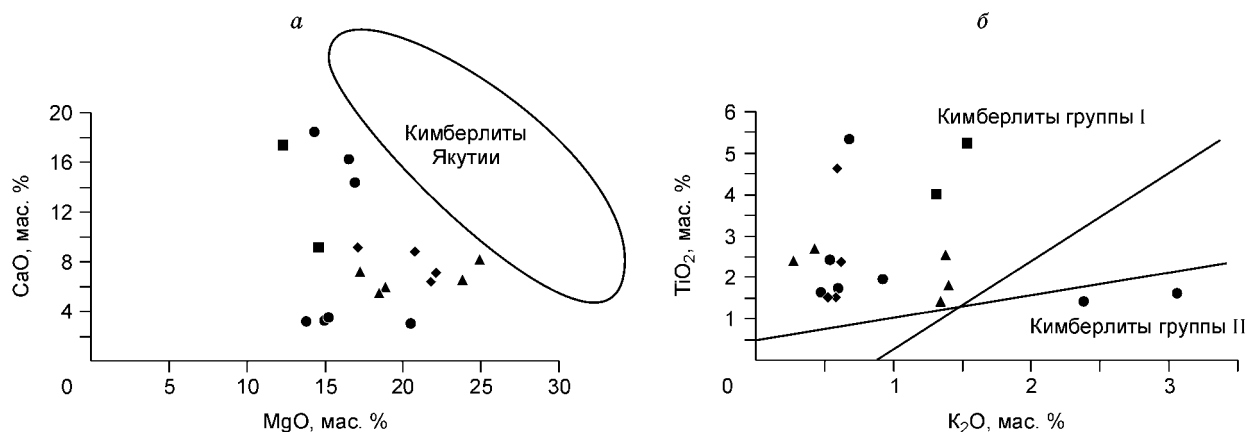
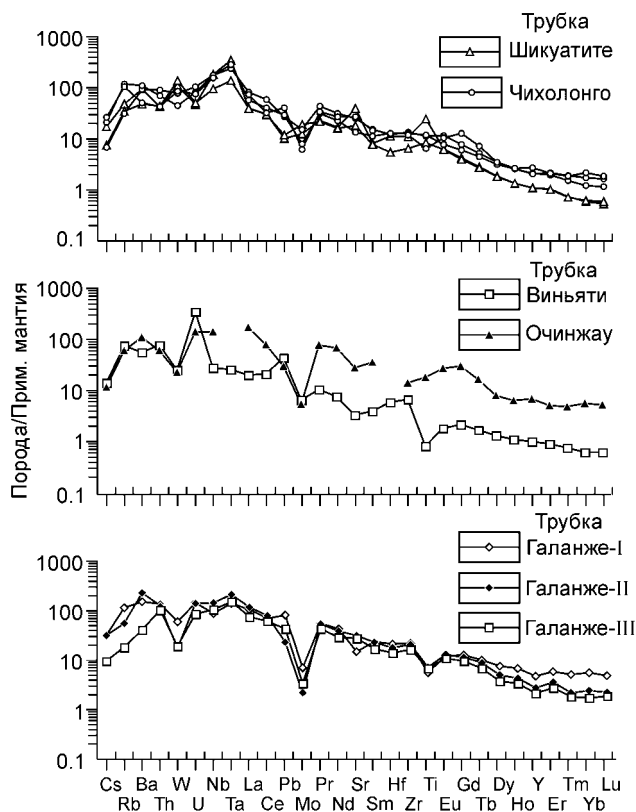


Рис. 3. Соотношение MgO—CaO (а) и K<sub>2</sub>O—TiO<sub>2</sub> (б) в кимберлитах юго-запада Анголы.

Усл. обозн. см. на рис. 2. Поля на части (б), по [Богатиков и др., 2004].

до повышенного содержанием редких щелочей (г/т): Rb (20—75), Cs (0.22—0.68) и щелочноземельных элементов: Sr (286—841), Ba (340—771). Количество высоkozарядных элементов (HFSE) умеренное до пониженного (г/т): Zr (72—151), Hf (1.6—3.9), Nb (67—129); радиоактивные элементы: Th (8.7—11.6) и U (1.8—3.0). Содержание легких и тяжелых редкоземельных элементов варьирует в пределах 117.65—235.01 г/т. Содержание лантаноидов в породах тр. Чихолонго заметно выше, чем в тр. Шикуютите.

На спайдер-диаграмме (рис. 4) кимберлитов тр. Шикуютите отмечаются прежде всего отчетливые максимумы содержаний W, Nb, Ta, Mo, Sr, Ti и минимумы Pb, Hf, Zr. Кривая распределения элементов от Ta до Mo во всех образцах имеет крутой наклон из-за низких концентраций La и Ce. В то же время на спайдер-диаграмме отсутствует характерный для кимберлитов пик содержания Gd. Подобное распределение элементов-примесей в кимберлитах тр. Шикуютите (нетипичные максимумы W, Mo, Eu) обусловлен влиянием корового материала. Этот процесс проявлен в той или иной степени во многих кимберлитах юго-запада Анголы, кроме обр. 454/130 тр. Чихолонго и Очинжау.



В окварцованном кимберлите тр. Виньяти резко уменьшены концентрации практически всех микроэлементов, однако линия их распределения симбатна кривой тр. Очинжау (кроме отрезка Nb—Pb).

Характер спайдер-диаграмм кимберлитов трубок Галанже-I—III очень близок между собой и имеет пологий наклон. Для кимберлитов этих трубок отмечаются повышенные концентрации Th, U, Ce, La и пониженные — Nb, Ta, поэтому спектр распределения элементов имеет слабо дифференцированный характер.

В целом кимберлиты юго-запада Анголы по концентрациям HFSE, REE, индикаторным отношениям элементов-примесей проявляют наибольшее сходство с кимберлитами I группы Южной Африки [Taylor et al., 1994] и кимберлитами Fe-Ti серии Архангельской алмазоносной провинции [Архангельская..., 2000].

Рис. 4. Распределение элементов-примесей, нормированных к примитивной мантии [McDonough, Sun, 1995], в кимберлитах юго-запада Анголы.

Таблица 2. Содержание элементов-примесей (г/т) в кимберлитах Юго-Западной Анголы

Элемент	тр. Галанже-I	тр. Галанже-II	тр. Галанже-III	тр. Шикватите		тр. Чихолонго			тр. Виньяти	тр. Очинжау
	2310	6224	2315	401/35	401/302	452/47.5	454/60	454/130	7329/37	Ш-320
Cs	1.01	1.01	0.31	0.56	0.24	0.22	0.68	0.84	0.46	0.38
Rb	72.83	35.24	11.66	31.05	22.08	20.09	75.87	67.57	48.03	38.63
Ba	1075.41	1598.92	287.52	663.30	340.68	641.12	771.64	359.37	391.71	780.80
Th	11.61	10.74	8.75	3.59	3.70	7.67	5.97	3.64	6.68	5.23
W	1.19	0.35	0.39	2.21	2.77	1.54	0.91	1.73	0.51	0.46
U	3.03	2.93	1.83	0.98	1.07	2.20	1.74	1.61	7.19	2.96
Nb	63.61	102.47	75.23	129.91	67.71	126.09	128.25	111.86	20.42	100.74
Ta	5.83	8.74	6.24	14.47	5.70	9.76	11.75	He опр.	1.07	He опр.
La	72.38	80.62	51.51	27.14	27.49	56.21	39.55	50.84	14.17	117.84
Ce	125.18	141.88	108.78	54.18	52.75	105.14	72.21	56.96	38.44	143.14
Pb	15.02	4.29	7.86	1.91	2.19	4.98	5.46	7.45	8.08	5.59
Mo	0.44	0.14	0.22	0.79	1.20	0.96	0.50	0.39	0.42	0.35
Pr	15.36	14.86	11.90	6.32	5.98	11.97	8.62	9.32	2.97	21.75
Nd	58.27	52.81	39.65	23.13	21.86	43.06	31.04	37.04	10.63	93.90
Sr	312.95	663.21	584.62	841.80	385.26	537.89	286.67	572.94	72.92	602.29
Sm	10.57	10.26	7.61	3.67	3.43	6.74	4.99	6.47	1.81	15.97
Hf	6.58	5.54	4.38	3.52	1.69	3.78	3.96	He опр.	1.90	He опр.
Zr	248.08	233.08	184.49	124.63	72.62	151.63	143.34	132.35	77.51	161.58
Ti	7362.86	9334.54	8865.20	31792.00	10976.00	14746.00	15519.00	8452.95	1115.00	24039.95
Eu	2.08	2.22	1.82	1.08	1.05	1.95	1.30	1.75	0.32	4.66
Gd	7.53	6.86	5.70	2.58	2.34	4.62	3.65	7.74	1.34	18.31
Tb	1.10	0.96	0.73	0.31	0.29	0.57	0.48	0.78	0.19	1.81
Dy	5.66	3.68	2.80	1.37	1.34	2.59	2.33	2.56	1.02	6.03
Ho	1.12	0.71	0.56	0.22	0.22	0.42	0.42	0.44	0.19	1.08
Y	22.08	12.84	9.91	5.06	5.04	9.60	9.43	12.26	4.73	32.57
Er	2.81	1.72	1.33	0.51	0.50	0.94	1.05	1.01	0.46	2.52
Tm	0.38	0.16	0.14	0.06	0.05	0.11	0.14	0.14	0.06	0.37
Yb	2.75	1.19	0.87	0.30	0.31	0.60	0.85	1.06	0.32	2.83
Lu	0.36	0.17	0.14	0.04	0.04	0.09	0.12	0.14	0.05	0.40

Примечание. Содержание элементов-примесей определялось методом ICP-MS на „PLASMA QD“ анализаторе, лаборатория ИМГРЭ (г. Москва), аналитик Д.З. Журавлев.

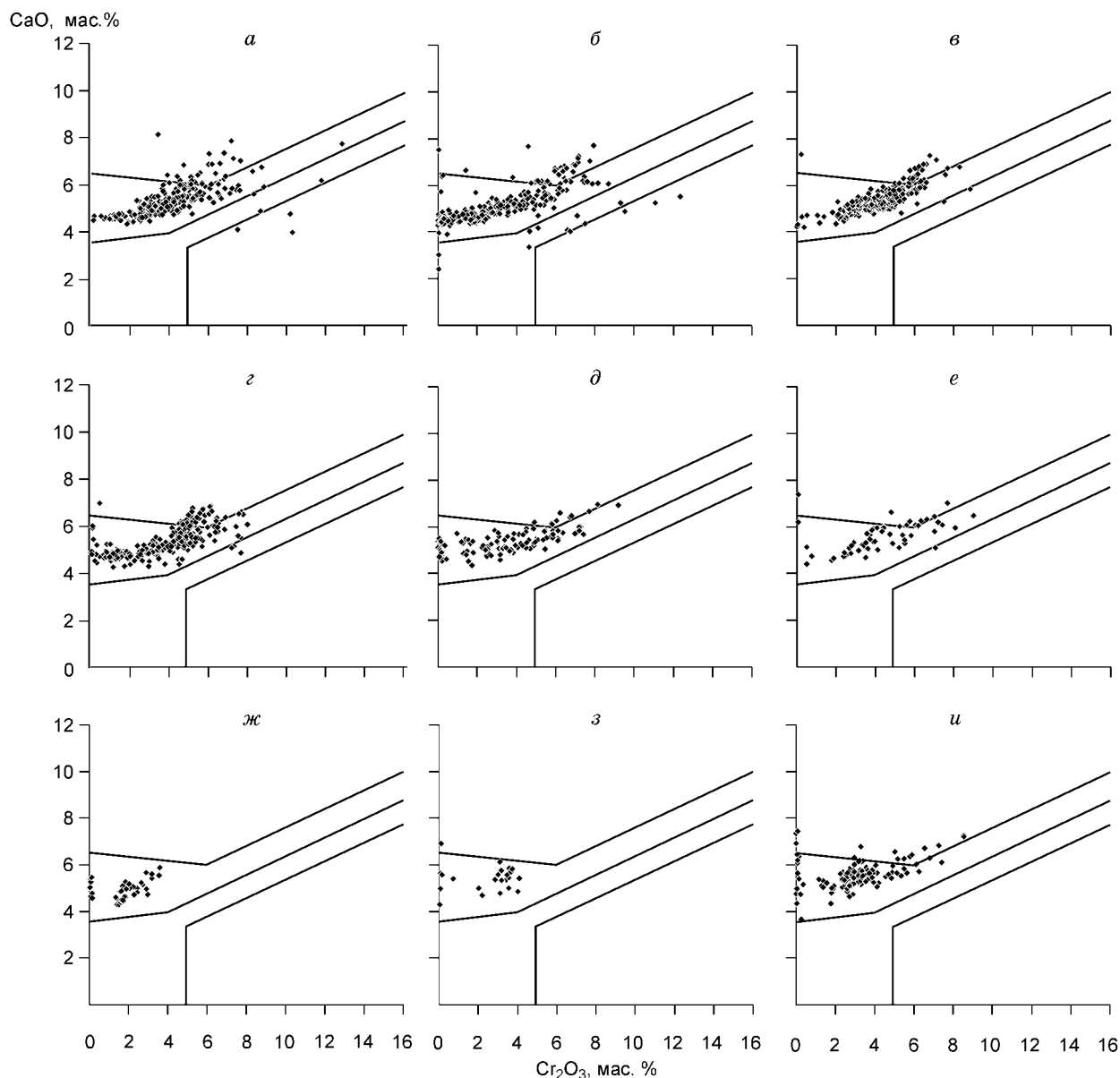
## МИНЕРАЛОГИЯ КИМБЕРЛИТОВ

Кимберлитовые трубки Шикватите и Чихолонго характеризуются высокими концентрациями пиропов и пикроильменита, с резким преобладанием последнего; хромшпинелиды и хромдиопсид встречаются редко. Близкое содержание и соотношение индикаторных минералов имеет тр. Очинжау. В кимберлитовой тр. Палуэ индикаторные минералы представлены в основном пиропами и реже хромшпинелидами; пикроильменит не обнаружен. Трубка Виньяти содержит в близких количествах пиропы и пикроильменит, хромшпинелиды редки. В кимберлитовых трубках Галанже-I—IV концентрации индикаторных минералов резко различны: наиболее высокие в породах тр. Галанже-II, наиболее низкие — тр. Галанже-IV. Хромит-хромдиопсид-пироповая ассоциация с редким пикроильменитом характерна для тр. Галанже-I. Остальным трубкам присуща пироп-пикроильменитовая ассоциация с хромдиопсидом и небольшим количеством хромшпинелидов. Анализы минералов выполнены на микрозонде JXA-50A фирмы „Джеол“ в МГУ по методике, описанной в работе [Гаранин и др., 1984].

### Пироп

**Трубка Шикватите.** Из 295 изученных зерен преобладают пиропы лерцолитового парагенезиса, 5 % из них относятся к верлитовому, 2 % — попадают в область дунит-гарцбургитового, 1 % — в поле алмазного парагенезиса. Около 3 % зерен пиропы относятся к эклогитовому парагенезису. На диаграмме  $Cr_2O_3$ —CaO (рис. 5, а) фигуративные точки составов пиропов из тр. Шикватите образуют два тренда: в





**Рис. 5. Диаграммы  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ — $\text{CaO}$  для гранатов из кимберлитов трубок:**

*а* — Шикутите, *б* — Чихолонго, *в* — Палуэ, *г* — Виньяти, *д* — Очинжау, *е* — Галанже-I, *ж* — Галанже-II, *з* — Галанже-III, *и* — Галанже-IV.

одном случае точки смещаются в область пиропов верлитового парагенезиса, в другом — в поле дунит-гарцбургитового. Максимальное количество  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  составляет 12.8 мас.% (табл. 3), среднее значение — 3.5 мас.% ( $n = 295$ ).

**Трубка Чихолонго.** В выборке из 302 зерен преобладают пиропы лерцолитового парагенезиса (64 %), реже встречаются гранаты верлитового парагенезиса (11 %); около 4 % пиропов относится к дунит-гарцбургитовому (в т. ч. алмазному) парагенезису (см. рис. 5, б). Содержание  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  в наиболее высокохромистом пиропе достигает 12.34 мас.% (см. табл. 3), при среднем содержании 2.5 мас.%. Наиболее распространены низкохромистые гранаты с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  от 0 до 2 мас.% ( $n = 302$ ).

**Трубка Палуэ.** По соотношению  $\text{CaO}$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  большинство ( $n = 221$ ) проанализированных зерен локализируются в области составов лерцолитового парагенезиса, 16 % пиропов относятся к верлитовому, 2 зерна попали в область дунит-гарцбургитового (см. рис. 5, в). Средняя хромистость пиропов в тр. Палуэ достаточно высокая (4.2 мас.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ).

**Трубка Виньяти.** В проанализированной выборке ( $n = 408$ ) присутствуют пиропы различного парагенезиса с широкими вариациями состава по хрому, кальцию и титану (см. рис. 5, г). Существенно

Таблица 3. Представительные микрондовые анализы хромистых пиропов из кимберлитовых трубок Юго-Западной Анголы (мас.%)

Оксид	тр. Чихолонго							тр. Шикватите				
	SiO <sub>2</sub>	39.85	40.17	40.62	40.65	41.37	40.7	41.9	40.35	39.54	40.78	41.43
TiO <sub>2</sub>	0.39	0.28	0.38	0.23	0.08	0.51	0.15	0.11	0.91	0.26	0.22	0.02
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14.30	15.08	16.47	16.60	16	16.94	17.97	14.72	13.32	16.77	16.78	15.87
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	12.34	11.09	9.29	9.52	9.56	8.68	7.48	11.75	12.80	8.82	8.66	10.19
FeO	5.84	6.55	6.42	6.07	6.48	6.85	6.46	6.12	7.01	6.31	6.12	6.05
MnO	0.31	0.28	0.24	0.33	0.27	0.27	0.26	0.22	0.33	0.30	0.28	0.26
MgO	20.51	20.34	20.43	21.00	20.77	19.7	21.09	20.10	17.78	19.91	21.70	21.06
CaO	5.52	5.25	5.24	4.86	4.93	6.05	4.37	6.14	7.74	5.87	4.83	4.71
Сумма	99.06	99.04	99.09	99.26	99.46	99.7	99.68	99.51	99.43	99.02	100.02	99.07
	тр. Шикватите		тр. Виньяти		тр. Очинжау		тр. Галанже-I		тр. Палуэ		тр. Галанже-IV	
SiO <sub>2</sub>	41.60	41.13	40.82	41.28	40.53	40.40	40.22	41.69	41.47	40.75	41.41	40.8
TiO <sub>2</sub>	0.19	0.06	0.11	0.08	0.28	0.82	0.11	0.16	0.22	0.12	0	0.56
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	16.18	18.48	18.25	18.16	17.16	18.07	18.68	18.07	17.03	17.47	16.03	17.46
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	10.29	7.50	7.59	7.14	9.19	7.42	8.09	7.43	8.81	7.58	8.55	7.42
FeO	5.68	6.82	6.2	6.22	6.67	6.49	7.31	6.01	5.59	6.98	6.46	6.39
MnO	0.28	0.37	0.32	0.25	0.08	0.08	0.24	0.28	0.22	0.32	0.47	0.25
MgO	21.19	21.12	20.91	20.79	19.48	20.77	19.83	19.52	20.02	19.42	19.63	20.09
CaO	3.92	4.04	4.87	5.08	6.93	5.69	5.96	6.09	5.73	6.36	7.28	6.11
Сумма	99.33	99.52	99.07	99.1	100.32	99.74	100.44	99.25	99.09	99.0	99.83	99.08

Примечание. Здесь и в табл. 4—6 все железо в виде FeO; концентрация Na<sub>2</sub>O не определялась.

преобладают пиропы лерцолитового парагенезиса, на долю которых приходится 85 % всех проанализированных зерен. Около 10 % пиропов относятся к верлитовому парагенезису, менее 1 % попадают в область дунит-гарцбургитового. Последние являются высокохромистыми (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> более 7 мас.%) пиропами (см. табл. 3) и приближаются к пиропам алмазной ассоциации. Около 4 % пиропов относятся к эклогитовому парагенезису.

**Трубка Очинжау.** Среди проанализированных ( $n = 143$ ) зерен пиропов 15 % относятся к титановой минеральной ассоциации ультраосновного парагенезиса и связаны с пироп-ильменитовыми ультрабазиитами. Они характеризуются красно-оранжевой окраской, низким содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (менее 3.5 мас.%), повышенным — FeO = 7—9 мас.% и высоким — TiO<sub>2</sub> = 0.48—0.8 мас.%. Более половины исследованных пиропов принадлежат хромовой минеральной ассоциации ультраосновного парагенезиса. К ним относятся фиолетовые и малиновые пиропы с содержанием FeO менее 8 мас.% (см. табл. 3).

По соотношению CaO—Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> пиропы титановой и хромовой ассоциаций попадают в область составов лерцолитового парагенезиса, причем 12 % из них являются высокохромистыми (см. рис. 5, д). Пиропы дунит-гарцбургитового парагенезиса отсутствуют; количество гранатов верлитового парагенезиса не превышает 4 %.

Пиропы и пироп-альмандины преимущественно оранжевого цвета относятся к эклогитовой ассоциации и составляют около 30 % проанализированных зерен граната. По особенностям химического состава они относятся к кальциевым пиропам с высоким содержанием FeO (12—15 мас.%), TiO<sub>2</sub> (около 1 мас.%) и пониженной концентрацией Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (менее 0.1 мас.%).

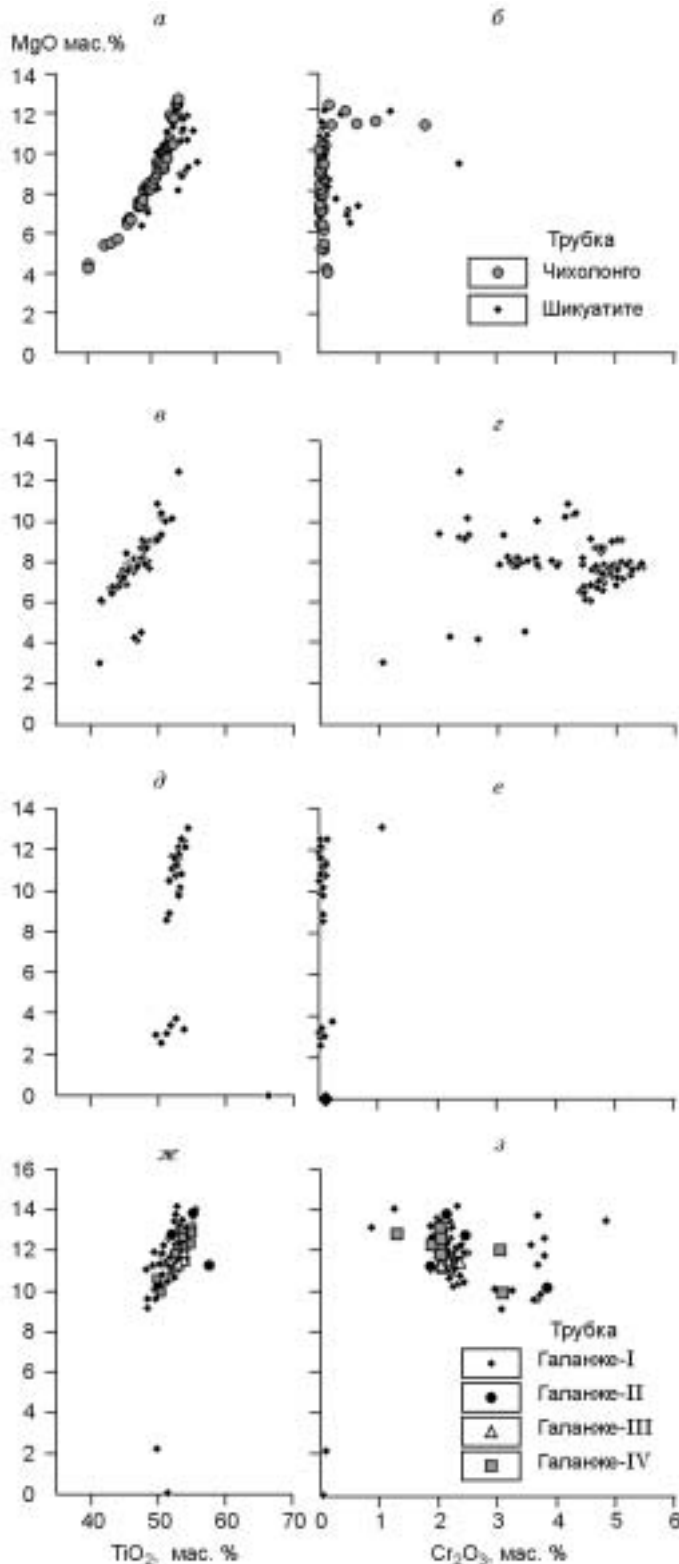
**Трубка Галанже-I.** По химическому составу ( $n = 59$ ) пиропы являются относительно низко- и умеренно-хромистыми и умеренно-кальциевыми. Лишь отдельные зерна характеризуются повышенным содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> — до 7—9 мас.% (см. табл. 3). На диаграмме Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—CaO фигуративные точки состава гранатов ложатся в поля составов лерцолитового и, в меньшей степени, верлитового парагенезиса; одно зерно отвечает дунит-гарцбургитовому парагенезису (см. рис. 5, е). Оно характеризуется высокими содержаниями TiO<sub>2</sub> (>1 мас.%), FeO (>10 мас.%) и связано с пироп-ильменитовыми ультрабазиитами. Большая часть зерен (76 %) относится к умеренно-хромистой разновидности пиропов с количеством Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> менее 5 мас.%.

**Трубка Галанже-II.** По соотношению CaO—Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> все пиропы ( $n = 52$ ) локализируются в области составов пиропов лерцолитового парагенезиса (см. рис. 5, ж) и относятся к умеренно-хромистой разновидности с содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> менее 5 мас.%. Крупные зерна оранжевых гранатов эклогитовой ассоциации встречаются редко. По особенностям химического состава они относятся к кальциевым пироп-аль-

мандинам с высоким содержанием FeO и низким  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  и составляют около 18% изученных зерен граната. Пиропы алмазного парагенезиса не обнаружены.

**Трубка Галанже-III.** По соотношению  $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$  почти все ( $n = 23$ ) проанализированные зерна локализируются в области составов лерцолитового парагенезиса (см. рис. 5, з). Пироп-альмандины оранжевого цвета составляют 26 % проанализированных зерен граната. Пиропы алмазного парагенезиса отсутствуют.

**Трубка Галанже-IV.** По соотношению  $\text{CaO}-\text{Cr}_2\text{O}_3$  76 % ( $n = 75$ ) проанализированных гранатов относятся к хромовым пиропам ультраосновного парагенезиса (см. рис. 5, и). Большинство зерен локализируются в области составов пиропов лерцолитового парагенезиса, часть из которых относятся к высокохромистой разновидности гранатов с содержанием  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  более 5 мас.% (см. табл. 3). Около 6 % зерен попадают в поле составов верлитового парагенезиса. Пиропы дунитгарцбургитового парагенезиса, в том числе алмазной ассоциации, не обнаружены. Желто-оранжевые пироп-альмандины составляют около 4 % проанализированных зерен граната.



### Пикроильменит

**Трубка Шикватите.** Химический состав пикроильменитов ( $n = 40$ ) характеризуется низким содержанием оксидов магния и хрома (рис. 6, а, б). Количество MgO варьирует от 6.4 до 12.17,  $\text{Cr}_2\text{O}_3$  — от 0.02 до 2.5,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  — от 7 до 15 мас.%. Выделяются две группы низкохромистого пикроильменита (табл. 4): с повышенными содержаниями  $\text{TiO}_2$  (51—53 мас.%) и пониженным количеством FeO (32—39 мас.%) и с пониженными содержаниями  $\text{TiO}_2$  (47—50 мас.%) и повышенным количеством FeO (40—44 мас.%). Пикроильмениты первой группы преобладают и составляют около 80 % проанализированных зерен.

**Трубка Чихолонго.** Химический состав пикроильменитов ( $n = 52$ ) очень близок по составу пикроильменитам из кимберлитов тр. Шикватите (см. рис. 6, а, б). Они также образуют по химическому составу две группы (см. табл. 4): с повышенными содержаниями  $\text{TiO}_2$  (50—54 мас.%) и пониженным количеством FeO (30—40 мас.%) и с пониженными содержаниями  $\text{TiO}_2$  (40—49 мас.%) и повышенным количеством FeO (41—53 мас.%). Пикроильмениты первой группы составляют около 60 % проанализированных зерен.

**Рис. 6.** Диаграммы  $\text{TiO}_2-\text{MgO}$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{MgO}$  для пикроильменитов из кимберлитов трубок:

а, б — Шикватите и Чихолонго, в, з — Виньяти, д, е — Очинжау, ж, з — Галанже-I—IV.

Таблица 4. Представительные микрозондовые анализы пикроильменитов из кимберлитовых трубок Юго-Западной Анголы (мас.%)

Оксид	тр. Шикватите						тр. Чихолонго					
	TiO <sub>2</sub>	51.11	51.08	55.66	48.53	48.67	53.87	46.41	48.47	49.17	50.99	52.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.34	0.58	0.65	0.20	0.36	0.85	0.38	0.43	0.53	0.58	1.17	0.68
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.07	0.05	0.11	0.55	0.30	0.22	0.08	0.04	0.06	0.04	0.98	0.18
FeO	39.95	37.84	31.28	44.08	42.05	32.39	45.87	42.03	40.79	38.02	33.10	31.58
MnO	0.29	0.29	0.23	0.19	0.27	0.21	0.23	0.26	0.30	0.28	0.27	0.63
MgO	8.27	9.63	11.94	6.40	7.62	12.17	6.35	7.31	8.23	9.44	11.82	12.62
Сумма	100.03	99.49	99.87	99.96	99.34	99.78	99.32	98.54	99.08	99.35	100.24	99.92
	тр. Виньяти		тр. Очинжау		тр. Галанже-I		тр. Галанже-II		тр. Галанже-III		тр. Галанже-IV	
TiO <sub>2</sub>	44.00	44.87	54.06	52.96	55.31	57.64	53.92	53.88	53.73	52.72	53.30	50.83
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.19	0.18	0.70	0.44	0.27	0.39	0.10	0.13	0.27	0.42	0.47	0.00
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.50	4.65	0.03	0.00	2.11	1.85	2.13	2.15	2.03	4.72	1.84	2.36
FeO	43.26	42.63	32.59	33.50	28.71	29.17	31.21	31.18	30.20	29.34	29.75	32.52
MnO	0.26	0.33	0.22	0.31	0.20	0.19	0.32	0.41	0.37	0.39	0.35	0.29
MgO	6.80	7.28	12.17	11.84	13.83	11.27	11.72	11.53	12.66	11.86	13.27	12.31
Сумма	99.01	99.94	99.77	99.07	100.43	100.51	99.40	99.40	99.30	99.45	99.37	99.22

По соотношению TiO<sub>2</sub>—MgO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—MgO пикроильмениты из кимберлитов трубок Чихолонго и Шикватите сходны с пикроильменитами из алмазосных кимберлитов северо-восточной части Анголы [Харьков и др., 1998] и отличаются только более низким содержанием хрома и магния.

**Трубка Виньяти.** По составу пикроильмениты ( $n = 92$ ) отличаются широкими вариациями содержания оксидов магния (3.02—12.46 мас.%) и титана (36.98—52.07 мас.%). На диаграмме в координатах TiO<sub>2</sub>—MgO и Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>—MgO большинство фигуративных точек составов попадают в область с содержанием TiO<sub>2</sub> от 42 до 48 и MgO от 6.5 до 9 мас.% (см. рис. 6, в, з). Пикроильмениты характеризуются высоким содержанием оксида хрома (2—5.2 мас.% Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) (см. табл. 4).

**Трубка Очинжау.** Пикроильмениты ( $n = 29$ ) характеризуются высоким содержанием MgO (8—12 мас.%) и очень низким — Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0—0.11 мас.%) (см. табл. 4, рис. 6, д, е). Содержание гематитовой компоненты составляет от 3 до 5 %. Низкохромистые пикроильмениты подобного состава известны в эклогитах и вебстеритах. По соотношению TiO<sub>2</sub> и MgO они попадают в область составов высокомагнезиальных пикроильменитов из кимберлитов тр. Мир (Якутия) [Гаранин и др., 1984].

**Трубки Галанже-I—IV** содержат пикроильмениты ( $n = 84$ ) близкого химического состава. Они характеризуются высокими количествами MgO (10—15 мас.%), Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1—4.72 мас.%) и имеют не более 4—9 % гематитового компонента (см. рис. 6, ж, з). Высокохромистый пикроильменит подобного состава известен в метасоматизированных перидотитах [Гаранин, 1989]. Пикроильмениты трубок Галанже-I—IV существенно отличаются от пикроильменитов из трубок Шикватите, Чихолонго, а также алмазосных кимберлитов северо-восточной части Анголы [Харьков и др., 1998] повышенными количествами оксидов магния, хрома и более низким содержанием гематитовой составляющей (см. табл. 4).

Сравнительный анализ составов пикроильменитов из кимберлитовых трубок Юго-Западной Анголы по соотношению содержания оксидов титана, магния и хрома подтверждает вывод Н.В. Соболева [1980] о том, что в пределах одного кимберлитового поля средние составы пикроильменитов близки, тогда как пикроильмениты из разных кимберлитовых полей существенно различаются по составу.

### Хромшпинелид

Типохимизм хромшпинелидов в кимберлитах трубок Шикватите и Чихолонго из-за их низкой концентрации исследовать не удалось.

**Трубка Палуэ.** Общей особенностью химического состава хромшпинелидов ( $n = 104$ ) является узкий спектр по содержанию оксида хрома, преобладание высокохромистых и высокомагнезиальных разновидностей, присутствие в изученной выборке относительно высокожелезистых разновидностей с повышенным содержанием TiO<sub>2</sub> и низким — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, соответствующих по составу феррихромитам (табл. 5). Хромшпинелиды алмазной ассоциации отсутствуют (рис. 7, а, б).

**Трубка Виньяти.** Среди хромшпинелидов ( $n = 18$ ) встречается заметное количество высокохромистых разновидностей, а также присутствуют феррихромиты (см. рис. 7, в, з). В изученной небольшой

Таблица 5.

**Представительные микрозондовые анализы хромшпинелидов  
из кимберлитовых трубок Юго-Западной Анголы (мас.%)**

Оксид	тр. Палуэ						тр. Виньяти					
	TiO <sub>2</sub>	0.77	1.73	0.16	3.60	1.66	2.96	2.16	0.63	1.24	2.51	1.95
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13.21	12.10	12.72	6.48	17.30	9.74	5.58	7.96	4.09	4.54	9.33	10.55
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	55.95	54.22	58.87	51.24	44.99	49.06	60.72	59.06	63.17	61.48	55.16	58.02
FeO	17.17	20.28	16.11	27.62	22.22	24.88	21.55	23.13	22.43	20.93	24.46	19.50
MnO	0.22	0.15	0.15	0.30	0.14	0.35	0.37	0.28	0.36	0.29	0.42	0.27
MgO	11.99	10.50	11.27	9.67	12.74	11.64	9.31	8.84	8.20	9.57	7.94	10.29
Сумма	99.42	99.11	99.30	99.03	99.17	99.42	99.69	99.90	99.49	99.32	99.26	99.27
	тр. Галанже-I						тр. Галанже-II					
TiO <sub>2</sub>	2.84	4.53	1.78	0.13	0.25	3.84	0.88	0.39	0.17	3.16	2.82	2.90
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.27	9.69	1.67	15.22	14.16	11.65	16.50	16.21	15.70	2.87	3.17	2.10
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	53.67	49.76	50.47	51.25	52.14	48.68	47.19	48.72	50.81	53.30	54.83	55.14
FeO	33.93	23.10	33.75	20.97	20.90	21.70	21.99	20.30	18.91	29.13	28.40	29.45
MnO	0.04	0.19	4.44	0.15	0.11	0.20	0.20	0.27	0.28	0.32	0.33	0.03
MgO	7.02	12.14	8.14	12.58	12.16	13.60	12.30	13.01	13.10	10.52	9.87	9.60
Сумма	99.77	99.41	100.25	100.30	99.72	99.72	99.13	99.02	99.06	99.52	99.58	99.43
	тр. Галанже-III						тр. Галанже-IV					
TiO <sub>2</sub>	0.10	0.19	0.59	1.24	3.61	4.45	1.03	0.26	0.90	1.58	0.41	4.81
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	15.75	8.16	16.70	9.74	2.31	8.63	13.70	16.01	9.94	13.16	20.09	3.29
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	51.21	56.88	49.32	47.48	51.51	50.44	48.60	50.54	55.50	53.39	44.49	49.68
FeO	20.21	22.43	19.23	29.17	32.92	22.07	21.59	20.0	20.64	19.15	23.04	29.94
MnO	0.26	0.39	0.24	0.31	0.40	0.30	0.31	0.20	0.20	0.30	0.20	0.62
MgO	12.55	10.81	12.94	10.91	8.09	13.22	13.55	13.50	12.48	12.02	12.28	10.34
Сумма	100.13	99.0	99.17	99.03	99.12	99.11	99.08	100.75	99.66	99.50	100.51	99.03

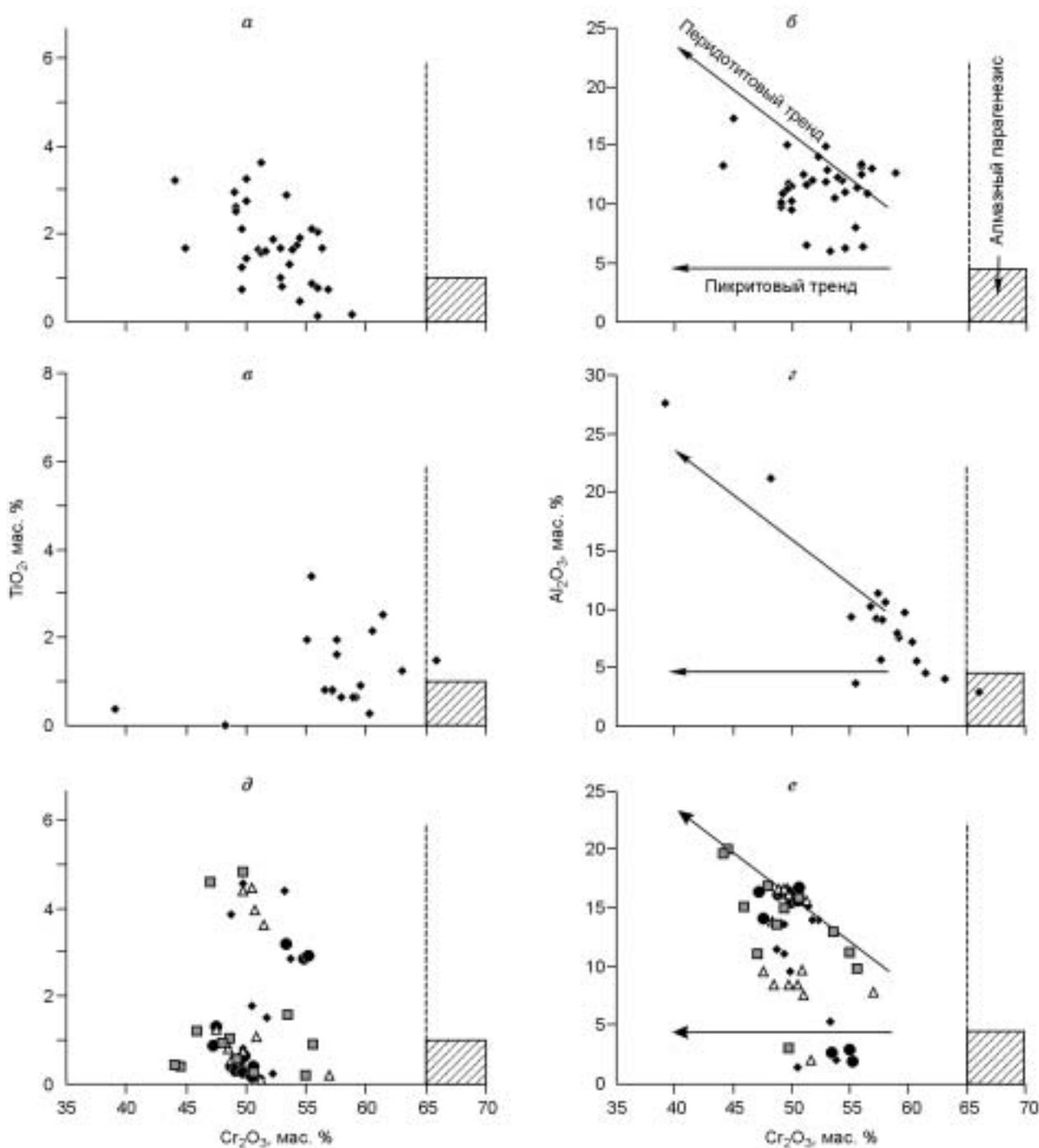
выборке хромшпинелиды алмазной ассоциации отсутствуют, хотя практически все они являются относительно высокохромистыми (см. табл. 5).

**Трубки Галанже-I—IV** содержат аналогичные по химическому составу хромшпинелиды ( $n = 129$ ). Они характеризуются: широкими вариациями содержания алюминия, магния, титана и узкими колебаниями содержания хрома; преобладанием высокомагнезиальных хромитов и магнезиальных алюмохромитов; присутствием высокожелезистых разновидностей с высоким содержанием TiO<sub>2</sub> и низким — Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, соответствующих феррихромитам (см. табл. 5, рис. 7, *д*, *е*). Хромшпинелиды алмазной ассоциации отсутствуют.

### Диопсид

Диопсиды встречаются в виде зерен 0.5—4.0 мм удлиненно-овальной, угловатой формы; зерна с фрагментами кристаллографической огранки мириэдрического облика редки. Иногда диопсиды образуют сростки с пиропом, флогопитом, псевдоморфозами по оливину. Кимберлиты южной группы трубок наиболее обогащены вкрапленниками диопсида от бледно-зеленой до ярко-изумрудной окраски.

Проанализированные зерна диопсида ( $n = 27$ ) из кимберлитов трубок Галанже-I—III характеризуются близким типохимизмом (рис. 8, *а*, *б*). Бледно-зеленые диопсиды отличаются пониженным содержанием (табл. 6) Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (<1 мас.%) и Na<sub>2</sub>O (<1 мас.%). По особенностям состава их можно отнести к хромсодержащим субкальциевым клинопироксенам шпинель-пироксеновой фации глубинности [Саблуков и др., 2000]. Изумрудно-зеленые разновидности характеризуются повышенным содержанием Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и переменными — Na<sub>2</sub>O и Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>. По соотношению этих элементов они принадлежат хромдиопсидам гроспидитовой и коэситовой фаций глубинности. Редкие зерна диопсида имеют высокие содержания Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (более 4 мас.%) и пониженные концентрации Na<sub>2</sub>O, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> и FeO. По соотношению этих компонентов они попадают в область составов диопсидов низкобарической шпинель-пироксеновой фации глубинности. Подобного состава клинопироксены характерны для шпинелевых лерцолитов в ассоциации с пикотитом и хромпикотитом, последние часто встречаются в кимберлитах тр. Галанже-II. По данным расчета давления по Cr-барометру Нимиса—Тейлора [Nimis, Taylor, 2000], клинопироксены трубок

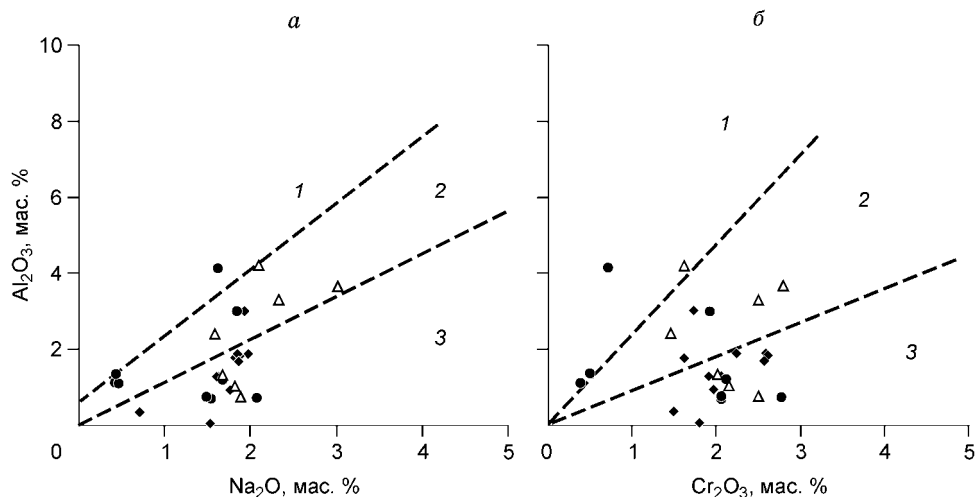


**Рис. 7. Диаграммы  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—TiO}_2$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—Al}_2\text{O}_3$  для хромшпинелидов из кимберлитов трубок:**

*a, б* — Палуэ, *в, г* — Виньяти, *д, е* — Галанже-I—IV. Усл. обозн. см. на рис. 6, ж, з.

Галанже-I, III образовались в интервале 26.8—50.8 кбар. Для клинопироксенов тр. Галанже-II характерен более широкий диапазон значений давления от 13.7 до 53.8 кбар.

В целом по соотношению  $\text{Cr}_2\text{O}_3\text{—FeO}$  и  $\text{MgO—FeO}$  точки составов проанализированных зерен диопсида согласуются с линией тренда клинопироксенов из кимберлитов I группы Южной Африки



**Рис. 8.** Диаграммы  $\text{Na}_2\text{O}-\text{Al}_2\text{O}_3$  (а) и  $\text{Cr}_2\text{O}_3-\text{Al}_2\text{O}_3$  (б) для диопсидов из кимберлитов тр. Галанже-I—III.

1 — шпинель-пироксеновая, 2 — гроспидитовая, 3 — коэзитовая фации глубинности, по [Саблуков и др., 2000]. Усл. обозн. см. на рис. 6, ж, з.

[Гаранин, 1989]. Диопсиды подобного состава генетически связаны с лерцолитами, пироксенитами и ильменитовыми перидотитами.

Изученные хромдиопсиды отличаются от хромдиопсидов из алмазных трубок северо-восточной части Анголы следующими параметрами: более низким содержанием оксида хрома ( $\text{Cr}_2\text{O}_3 < 3$  мас.% против 4.5 мас.% в алмазных телах); более низким содержанием оксида натрия ( $\text{Na}_2\text{O} < 3$  мас.% против 3—6.3 мас.% в алмазных телах).

### Алмазы

Алмазы размером от 1.5 до 4.5 мм и весом от 0.01 до 0.14 карат, представленные целыми кристаллами или их осколками, а также сростками двух и более индивидов, обнаружены в трубках Шикватите и Чихолонго. Среди морфологических типов преобладают кристаллы ромбододекаэдрического габитуса и ромбододекаэдровиды. В тр. Шикватите алмазы представлены ромбододекаэдрами или их осколками. В кимберлитах тр. Чихолонго, напротив, встречаются кристаллы переходного габитуса ряда октаэдр—додэкаэдр и кристаллы неопределенной формы. Кубы и тетрагексаэдровиды не встречены. По классификации Ю.Л. Орлова [1984], все кристаллы относятся к I группе. Значительная их часть обладает нарушенной симметрией, для большинства алмазов характерно сильное уплощение по осям симметрии  $L_3$  и  $L_2$ . Алмазы в основном бесцветные или с незначительным желтым нацветом; окрашенные алмазы пред-

Таблица 6.

**Представительные микрозондовые анализы клинопироксенов из кимберлитовых трубок Юго-Западной Анголы (мас.%)**

Оксид	тр. Галанже-I						тр. Галанже-II			тр. Галанже-III		
	55.09	54.85	53.90	54.22	54.19	54.72	54.35	54.95	54.53	53.37	54.24	54.29
$\text{SiO}_2$	55.09	54.85	53.90	54.22	54.19	54.72	54.35	54.95	54.53	53.37	54.24	54.29
$\text{TiO}_2$	0.28	0.40	0.35	0.37	0.11	0.23	0.09	0.34	0.27	0.51	0.21	0.21
$\text{Al}_2\text{O}_3$	0.93	1.28	1.89	1.84	3.01	1.69	3.00	1.21	0.72	4.20	3.30	3.67
$\text{Cr}_2\text{O}_3$	1.97	1.92	2.60	2.62	1.73	2.57	1.93	2.12	2.78	1.62	2.51	2.80
FeO	2.60	2.64	2.38	2.37	2.50	2.40	2.41	2.64	3.13	1.48	2.39	2.30
MnO	0.09	0.11	0.11	0.07	0.12	0.00	0.02	0.03	0.00	0.01	0.00	0.00
MgO	15.38	15.81	15.40	15.40	15.51	16.05	15.72	16.20	15.45	15.06	15.51	15.02
CaO	21.06	20.86	19.90	19.83	20.29	20.38	20.21	20.39	20.30	21.01	19.40	18.44
$\text{Na}_2\text{O}$	1.76	1.63	1.97	1.87	1.93	1.86	1.84	1.67	2.07	2.10	2.33	3.01
$\text{K}_2\text{O}$	0.10	0.00	0.00	0.01	0.00	0.04	0.04	0.05	0.00	0.05	0.08	0.05
Сумма	99.26	99.50	98.50	98.60	99.39	99.94	99.61	99.60	99.25	99.42	99.98	99.79

ставлены пятью коричневыми кристаллами. Все кристаллы несут следы частичного растворения в виде микробугорков, слагающих шагреньевый рельеф, а также ямки травления треугольного и квадратного сечения.

Таким образом, для алмазоносных кимберлитовых трубок Шикватите и Чихолонго (северная группа трубок) характерны: широкий спектр состава индикаторных минералов по типам парагенетических ассоциаций; присутствие пиропов дунит-гарцбургитового (в том числе алмазного) парагенезиса; наличие пикроильменитов, аналогичных по составу пикроильменитам алмазоносных кимберлитов северо-восточной части Анголы. Содержание высокохромистых и низкокальциевых пиропов положительно коррелирует с алмазностью пород, что подтверждает общие закономерности, ранее установленные Н.В. Соболевым для кимберлитов севера-востока Анголы [Соболев и др., 1990] и Якутии [Sobolev, 1977]. Выявленная связь между наличием пиропов алмазного дунит-гарцбургитового парагенезиса и алмазов на примере кимберлитов юго-запада Анголы еще раз подчеркивает универсальность данного минералогического критерия, используемого для оценки алмазности кимберлитов и лампроитов [Соболев, 1971].

Кимберлитовые трубки центральной группы (Палуэ, Виньяти, Очинжау) в целом характеризуются резким преобладанием минералов хромовой ассоциации над минералами титановой ассоциации ультраосновного парагенезиса. Однако отсутствие пиропов алмазной ассоциации в проанализированной выборке не дает основания говорить о потенциальной продуктивности кимберлитов. Следует отметить, что хромшпинелиды из кимберлитов центральной группы отличаются довольно узким спектром по содержанию  $Cr_2O_3$  и высокой долей среди них высокохромистых разновидностей.

Для кимберлитов трубок южной группы (Галанже-I—IV) отличительными признаками являются: резкое преобладание пиропов лерцолитового парагенезиса, умеренная и средняя их хромистость, узкий спектр хромшпинелидов по содержанию  $Cr_2O_3$  (45—55 мас.%), отсутствие зерен алмазной ассоциации среди пиропов и хромшпинелидов, а также повышенная хромистость и магнезиальность пикроильменитов. Наиболее высокохромистые пиропы (до 9 мас.%  $Cr_2O_3$ ) отмечаются в трубках Галанже-I и IV.

#### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Результаты проведенных комплексных исследований ранее неизвестных кимберлитовых трубок дают основание выделить новую алмазоносную кимберлитовую субпровинцию в пределах юго-западной части Анголы.

Кимберлиты по всем вещественно-индикационным параметрам относятся к классическим кимберлитам: содержат мантийные включения ультрабазитов, эцлогитов, полный спектр барофильных минералов, в том числе алмазной фации глубинности, а также алмазы. Кимберлитовые трубки сложены разнообразными петрографическими типами пород — туфопесчаниками, туфобрекчиями, кимберлитовыми брекчиями, автолитовыми кимберлитовыми брекчиями, а также массивными порфиоровыми кимберлитами. Кимберлиты в различной степени контаминированы материалом прорванных пород, существенно преобразованы гидротермально-метасоматическими и гипергенными процессами. Несмотря на это, породы трубок характеризуются содержанием большинства макро- и микрокомпонентов, типичным для кимберлитов других регионов мира. В целом по особенностям минерало-петрографического и петрогеохимического составов изученные кимберлиты наиболее близки кимберлитам группы I Южной Африки и кимберлитам Fe-Ti серии Архангельской алмазоносной провинции. Впервые для юго-западной части Анголы установлены кимберлиты палеозойского возраста.

При сопоставлении минералогических особенностей кимберлитов юго-запада Анголы намечается закономерное увеличение доли мантийного (в том числе алмазоносного) материала глубинных фаций в кимберлитовых трубках в направлении с юга на север. Аналогичная закономерность наблюдается для кимберлитовых тел северо-восточной части Анголы [Зуев и др., 1988], которые приурочены к зоне глубинных разломов субширотного простирания общей протяженностью до 1600 км. По-видимому, не случайно алмазоносные кимберлиты северной группы трубок Шикватите и Чихолонго структурно локализованы в крупных деструктивных зонах северо-восточного простирания, а неалмазоносные кимберлитовые трубки центральной и южной групп — к субмеридиональным разломам (см. рис. 1).

Авторы выражают глубокую благодарность академику Н.В. Соболеву за ценные и конструктивные замечания в ходе написания статьи.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Архангельская алмазоносная провинция. М., Наука, 2000, 522 с.
- Богатиков О.А., Кононова В.А., Первов В.А., Журавлев Д.З. Источники, геодинамическая обстановка образования и перспективы алмазности кимберлитов окраины Русской плиты: Sr-Nd изотопия и (ICP-MS) геохимия // Петрология, 2001, т. 9, № 3, с. 227—241.
- Богатиков О.А., Кононова В.А., Голубева Ю.Ю., Зинчук Н.Н., Илупин И.П., Ротман А.Я., Левский Л.К., Овчинникова Г.В., Кондрашов И.А. Петрогеохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // Геохимия, 2004, № 9, с. 915—939.



- Гаранин В.К.** Введение в геологию алмазных месторождений. М., Изд-во Моск. ун-та, 1989. 234 с.
- Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Сошкина Л.Т.** Ильменит из кимберлитов. М., Изд-во Моск. ун-та, 1984, 240 с.
- Зуев В.М., Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Манкенда А.** Слабоэродированные кимберлитовые трубки Анголы // Геология и геофизика, 1988 (3), с. 56—62.
- Орлов Ю.Л.** Минералогия алмаза. М., Наука, 1984, 240 с.
- Романько Е.Ф., Егоров К.Н., Подвысоцкий В.Т., Саблуков С.М., Дьяконов Д.Б.** Новый алмазоносный кимберлитовый регион юго-западной части Анголы // Докл. РАН, 2005, т. 403, № 3, с. 361—365.
- Саблуков С.М., Саблукова Л.И., Шавырина М.В.** Мантийные ксенолиты из кимберлитовых месторождений округлых алмазов Зимнебережного района, Архангельская алмазоносная провинция // Петрология, 2000, т. 8, № 5, с. 518—548.
- Соболев Н.В.** О минералогических критериях алмазоносности кимберлитов // Геология и геофизика, 1971 (3), с. 70—80.
- Соболев Н.В.** О значении пикроильменита для локализации кимберлитовых полей // Геология и геофизика, 1980 (10), с. 149—151.
- Соболев Н.В., Манкенда А., Каминский Ф.В., Соболев В.Н.** Гранаты кимберлитов Северо-Восточной Анголы и связь их состава с алмазоносностью // Докл. АН СССР, 1990, № 3, с. 56—62.
- Харьков А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И.** Коренные месторождения алмазов мира. М., Недра, 1998, 567 с.
- McDonough W.F., Sun S.S.** The composition of the Earth // Chem. Geol., 1995, v. 120, p. 223—253.
- Nimis P., Taylor W.R.** Single clinopyroxene thermobarometry for garnet peridotites: Part 1. Calibration and testing of a Cr-in-Cpx barometer and an enstatite-in-Cpx barometer // Contr. Miner. Petrol., 2000, v. 139, № 5, p. 541—554.
- Sobolev N.V.** Deep seated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle. Washington, DC., AGU, 1977, 264 p.
- Taylor W.R., Tompkins L.A., Haggerty S.E.** Comparative geochemistry of West African kimberlites: evidence for a micaceous kimberlite end member of sublithospheric origin // Geochim. Cosmochim. Acta, 1994, v. 58, № 19, p. 4017—4037.

*Рекомендована к печати 7 сентября 2006 г.  
Н.В. Соболевым*

*Поступила в редакцию 10 марта 2005 г.,  
после доработки — 22 августа 2006 г.*