

Статистический анализ составов основной массы разноалмазоносных кимберлитов Якутской алмазоносной провинции

З.В. Специус^{1,*}, А.С. Иванов²

¹Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, Якутск, Россия

²Санкт-Петербургский горный университет, Санкт-Петербург, Россия

*spetsiuszv@gmail.com

Аннотация. Химический состав кимберлитов важен для расшифровки происхождения и оценки их потенциальной алмазоносности. Нами выполнены определения 42 основных и примесных элементов в более чем 100 пробах основной массы кимберлитов из ряда трубок Якутской алмазоносной провинции на ICPMS-спектрометре iCAP 6300 Duo. Результаты анализа составов основной массы кимберлитов обработаны известными статистическими методами. По результатам анализов нам удалось выделить семь групп минералообразующих элементов. Для кимберлитовых трубок с известной алмазоносностью предложено подбирать коэффициенты таким образом, чтобы выполнить построение гистограмм в одинаковом формате, т. е. использовать процентные величины семи групп минералообразующих элементов как специфичные репера. Таким образом, мы демонстрируем, что химизм основной массы кимберлитов специфичен для каждого конкретного кимберлитового тела и, соответственно, может быть использован для оценки их потенциальной алмазоносности.

Ключевые слова: кимберлиты, основная масса, химический состав, статистический анализ, алмазоносность, Якутская алмазоносная провинция.

Благодарности. Авторы благодарят всех коллег, принимавших участие в выполнении лабораторных, аналитических работ и способствовавших проведению данных исследований. Основная часть работы выполнена в рамках НИР НИГП АК «АЛРОСА».

Введение

Коренные месторождения алмазов Западной Якутии представлены кимберлитовыми трубками, которые характеризуются разным уровнем содержания алмазов (от низкого до ураганного), разной морфологией трубочных тел (наряду с изометричными сечениями верхних частей трубок встречаются дайкоподобные тела), а также разным внутренним строением (от простого однофазного выполнения трубок до сложного многофазного). Трубки месторождений могут быть как одноканальные, так и многоканальные (до 3–4 каналов), с характерным кратерным воронкообразным расширением в верхних частях трубок (например, трубка Юбилейная) и субцилиндрические, имеющие с поверхности субвертикальные борта (трубка Интернациональная) [1, 2]. Аналогичные особенности внутреннего строения и разнообразие морфологии характерно также и для зарубежных месторождений Канады и Южной Африки [3–5].

Кимберлиты – это изверженные породы, которые представляют собой наиболее глубинные магмы, происходящие из мантии (> 150 км), о чем свидетельствует наличие в них алмазов, мегакристов высокобарных минералов и ксенолитов мантийных пород, в том числе алмазосодержащих [1]. В определении кимберлита особо указывается, что эти породы являются ультраосновными [6, 7]. Действительно, содержание SiO₂ в кимберлитах, как правило, не превосходит 40 мас. %. Согласно сводкам по составам кимберлитов, приведенным в монографии Р.Х. Митчелла [7], большинство кимберлитов по содержанию SiO₂ соответствуют интервалу 25–35 мас. %, содержание Al₂O₃ составляет менее 5 мас. %. Более высокие концентрации SiO₂ и Al₂O₃ отражают контаминацию кимберлитов коровым материалом [8, 9]. Подобно всем ультраосновным породам, кимберлиты содержат высокие концентрации MgO – 15–43 мас. %. В определении кимберлита по Р.Х. Митчеллу делается акцент на то, что это

калиевые породы. Тем не менее, концентрация K_2O в них редко превосходит 3 мас. %. Главной фазой, несущей калий в кимберлитах, является флогопит. Поэтому лишь в слюдяных кимберлитах концентрация K_2O может достигать 4 мас. %. Калиевая специфика кимберлитов, прежде всего, отражается в резком преобладании K_2O над Na_2O . Концентрации Na_2O более 0,5 мас. %, как правило, связаны с контаминацией кимберлитов коровым материалом, в первую очередь обломками вмещающих осадочных пород и постмагматическими процессами с вмещающими соленосными толщами [10, 11], однако не исключено, что возможен также и глубинный магматический источник галидов [12]. Высокое отношение K_2O/Na_2O отличает кимберлиты от других ультраосновных пород, в том числе вулканических (коматиитов, пикритов, меймечитов) [6, 11].

Месторождения кимберлитов демонстрируют явную зависимость уровня их алмазности от химического состава выполняющих их пород [1, 13, 14]; максимальные содержания алмазов установлены в пяти трубках: Нюрбинская, Ботуобинская, Майское тело, Интернациональная и Мир, выполненных высокомагнезиальным типом кимберлита. Более детально факторы алмазности кимберлитов будут обсуждены во второй статье, посвященной рассмотрению вещественного состава и детальной минералогии месторождений.

Определение вещественного состава кимберлитов, как и других магматических горных пород, производится путем установления в них процентного содержания химических элементов (их окислов) и породообразующих минералов. Химический и минеральный составы пород взаимосвязаны, но эта связь весьма сложная, особенно для кимберлитов, которые являются гибридными и контаминированными образованиями, поэтому практически невозможно путем пересчета химического состава горной породы получить ее точный минеральный состав, и наоборот [4, 7, 8]. Это объясняется тем, что магматические горные породы близкого химического состава могут иметь различный минеральный состав, так как последний зависит не только от химического состава первоисточника исходной магмы, но также от термодинамических условий формирования кимберлитов, особенностей развития постмагматических процессов и других факторов минералообразования.

Минералогия основной массы (ОМ) кимберлитов экстремально комплексна и вариабель-

на. Помимо этого, породообразующие минералы кимберлитов и, в первую очередь минералы ОМ, имеют довольно сложный состав и содержат различные примесные и редкие элементы, установление которых оптическими методами и даже микрондовым анализом затруднено, а в некоторых случаях практически невозможно [15–18]. Список элементов, которые можно встретить в том или ином количестве в магматических породах и тем более в кимберлитах, довольно обширен, в них содержатся практически все химические элементы. В то же время, углубленные исследования химизма кимберлитов и содержаний элементов в них имеют важное значение для поисковой геологии [2, 8, 13, 19].

Ниже рассмотрены основные закономерности содержания и распределения основных и примесных элементов в ОМ различных кимберлитовых тел Якутской алмазоносной провинции (ЯАП). Термин основная или связующая масса кимберлитовых пород широко используется при рассмотрении вопросов классификации кимберлитов и обсуждении петрографических особенностей разновидностей и фаз внедрения кимберлитов, а также изменчивости кимберлитовых трубок на глубину [1, 8, 18, 20–23].

Следует подчеркнуть, что минеральный и химический состав основной массы кимберлитов в первую очередь отражает заключительный этап эволюции кимберлитового субстрата и приповерхностные условия становления кимберлитового вулканизма [2, 20, 21]. Соответственно, данные по химизму и примесному составу ОМ представляют интерес как с точки зрения эволюции кимберлитового расплава в процессе формирования последовательных фаз внедрения в конкретной кимберлитовой трубке [23, 24], так и в решении практических вопросов установления специфики химизма различных фаз внедрения в отдельных кимберлитовых телах и при геолого-технологической типизации коренных алмазных месторождений [25].

Методика исследований и образцы

В 2018–2020 гг. в НИГП АК «АЛРОСА» был выполнен химический анализ более 100 проб основной массы кимберлитов из ряда трубок Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) различной алмазности, при этом в подавляющем большинстве случаев использовался керновый материал разведочных и эксплуатационных скважин. По каждой пробе было выполнено по два сжигания в индуктивно-связанной плазме (ИСП) плаз-

ме. Измерения элементного состава проводились на спектрометре iCAP 6300 Duo методом атомно-эмиссионной спектроскопии (АЭС) с ИСП с растворением проб в автоклавах. Отбор навески основной массы кимберлитов осуществлялся из материала керновых проб после их дробления, промывки и последующей расситовки из материала ситового класса крупностью $-2,0+1,0$ мм с помощью бинокулярного микроскопа типа Лейка. При этом отбраковывались обломки осадочных и метаморфических пород, а также зерна, содержащие их фрагменты, крупные вкрапленники оливина и псевдоморфоз по нему, а также крупные вкрапленники других минералов, т. е. осуществлялся отбор микрокристаллического материала связующей массы кимберлитов. Основные методические приемы отбора ОМ были разработаны И.П. Илупиным [16] и являются необходимым элементом при исследовании химизма и выяснении геохимических особенностей кимберлитовых пород, что существенно определяет корректность и сравнимость полученных данных [9, 23].

Результаты и обсуждение

Анализ составов ОМ кимберлитов трубок Мир, Интернациональная, Нюрбинская, Майская, Надежда, Таежная, Чукукская, Структурная, Восточно- и Западно-Сюльдюкарская проводился на

основе данных по количественному определению 42 химических элементов. Полученные результаты распределения различных элементов и корреляционные взаимосвязи между ними по данным группового кластерного анализа составов ОМ приведены ниже (рис. 1). Минералообразующие элементы и элементы примеси объединялись, в зависимости от их корреляционных взаимосвязей и соотношений в изученных пробах, на основании больших кластерных расстояний в группы, которые характеризуют основные процессы образования минералов в ОМ кимберлитов. Следует отметить, что статистические методы обработки при исследовании кимберлитов и взаимосвязи их вещественного состава с алмазонасностью, как правило, использовались ранее при изучении состава индикаторных минералов кимберлитов, в первую очередь гранатов [15, 26, 27], для оценки потенциальной алмазонасности. В то же время имеется ряд работ, которые демонстрируют связь петрохимии кимберлитов и алмазонасности [8, 13, 14, 19], но мы не нашли литературных источников, отражающих взаимосвязь редких и примесных элементов состава ОМ кимберлитов и их потенциальной алмазонасности на основании использования статистических методов анализа в отечественных или зарубежных публикациях. Это подчеркивает оригинальность наших

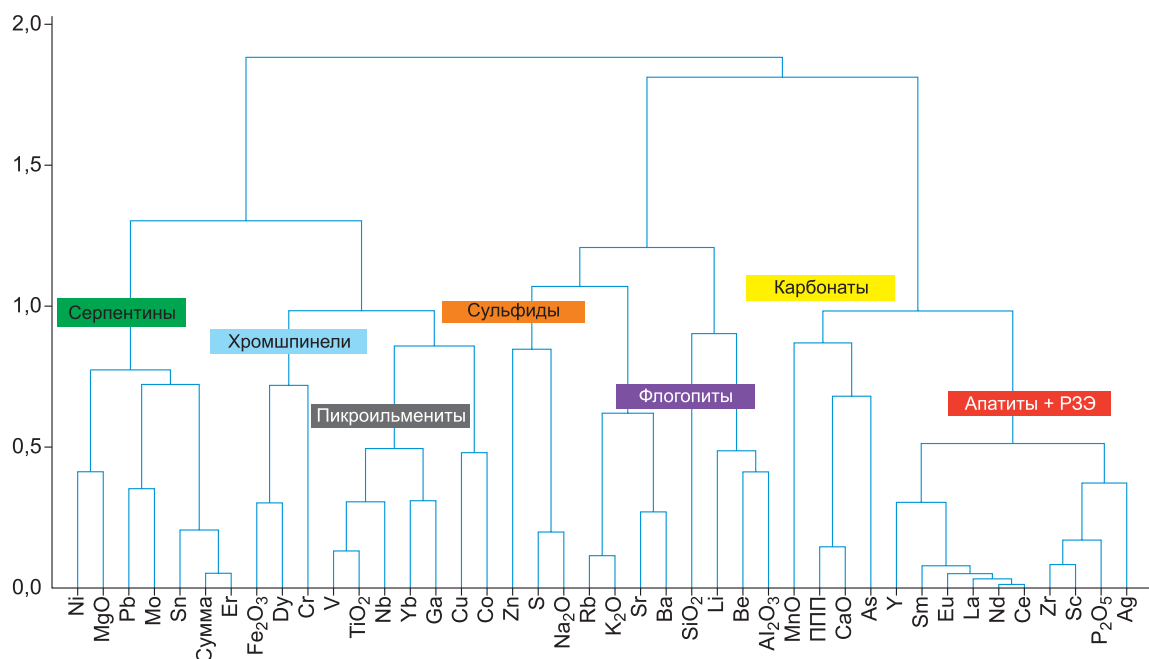


Рис. 1. Диаграмма группового кластерного анализа основной массы кимберлитов с выделенными группами минералообразования.

Fig. 1. Diagram of group cluster analysis of the bulk groundmass of kimberlites with identified mineral-forming groups.

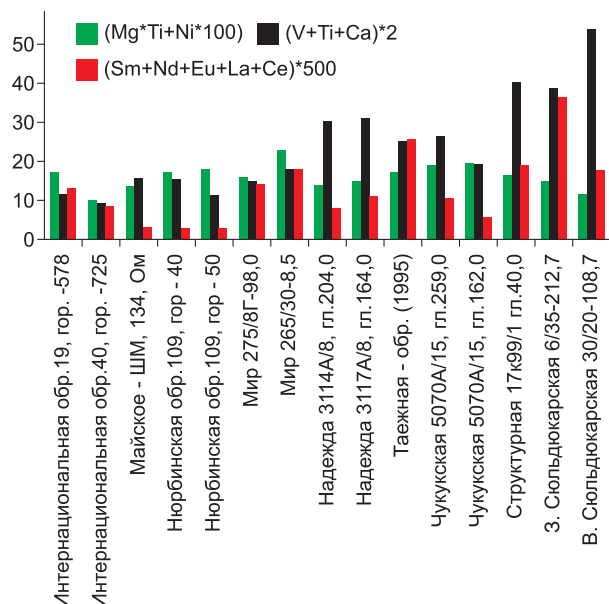


Рис. 2. Реперная диаграмма соотношения кимберлитовых трубок по уровню алмазности и химизму ОМ (распределению реперных групп).

Fig. 2. Reference diagram of correlation of kimberlite pipes in terms of diamond content and bulk groundmass chemistry (distribution of reference groups).

данных и, соответственно, полученных результатов их статистической обработки, что мы и рассмотрим ниже.

В нашей работе за основу (точку опоры) выбраны составы ОМ кимберлита трубки Мир. Первоначально по данным выполненных анализов все идентифицированные элементы были подразделены на три минералообразующие группы, которые отражали взаимосвязи основных, примесных и рассеянных элементов как в процессе глубинного формирования кимберлитов, так и в процессе их постмагматических преобразований. Распределение трех выделенных групп элементов в составах основной массы из 10 кимберлитовых тел ЯАП различной степени алмазности представлено на диаграмме (рис. 2), где все трубки расположены в порядке уменьшения степени их алмазности. Три коэффициента последовательно охватывают совокупности объединенных групповым кластерным анализом химических элементов. Эти совокупности химических элементов для кимберлитов можно назвать когерентно-взаимосвязанными [28]. Коэффициенты подобраны таким образом, чтобы получить одинаковые величины их трех групп, которые соответствуют трем столбцам гистограмм. Эти ве-

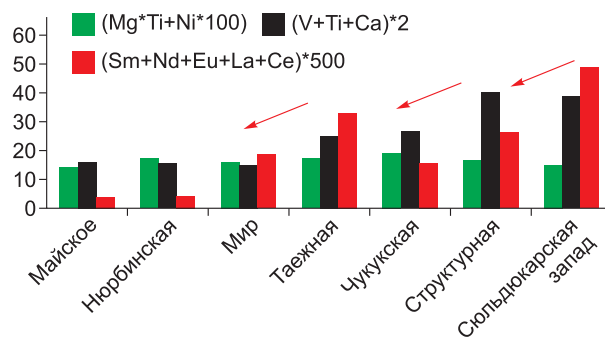


Рис. 3. Реперная диаграмма соотношения выделенных групп в кимберлитах по данным химизма ОМ и уровню алмазности (отмечено стрелками).

Fig. 3. The reference diagram of the identified groups in kimberlites according to the bulk groundmass chemistry and the level of diamond content (marked with arrows).

личины гистограмм можно назвать реперами, которые последовательно соответствуют значениям их кластерных расстояний при групповом анализе составов ОМ кимберлитов.

Предварительные результаты выполненных исследований вариации содержаний и соответствующие диаграммы составов ОМ кимберлитов были обсуждены нами ранее и приведены в трудах X Всероссийской научно-практической конференции 2020 года [29]. Полученные результаты продемонстрированы на соответствующей диаграмме (рис. 3), из которой очевидна корреляция алмазности кимберлитов и распределения в них трех выделенных групп элементов. В частности, для наиболее высокоалмазных кимберлитов характерно пониженное содержание суммы редкоземельных элементов третьей группы, а для низкоалмазных трубок (Чукукская, Надежда, Сюльдюкарская) отмечается повышенное содержание титана и других элементов второй группы.

На предложенных ниже диаграммах состава ОМ кимберлитовых трубок различной алмазности слева в ОМ кимберлитов преобладают химические элементы, которые соответствуют минерализации серпентинов, сульфидов и флогопита, в середине расположены гистограммы химических элементов образующих хромистые шпинели, группу минералов ильменитов, рутилов и перовскитов, затем карбонаты и цирконы и завершают ряд элементы группы РЗЭ и апатитов (рис. 4). При этом достаточно явно прослеживается различие как в микроэлементном составе ОМ кимберлитов из различных трубок, который па-

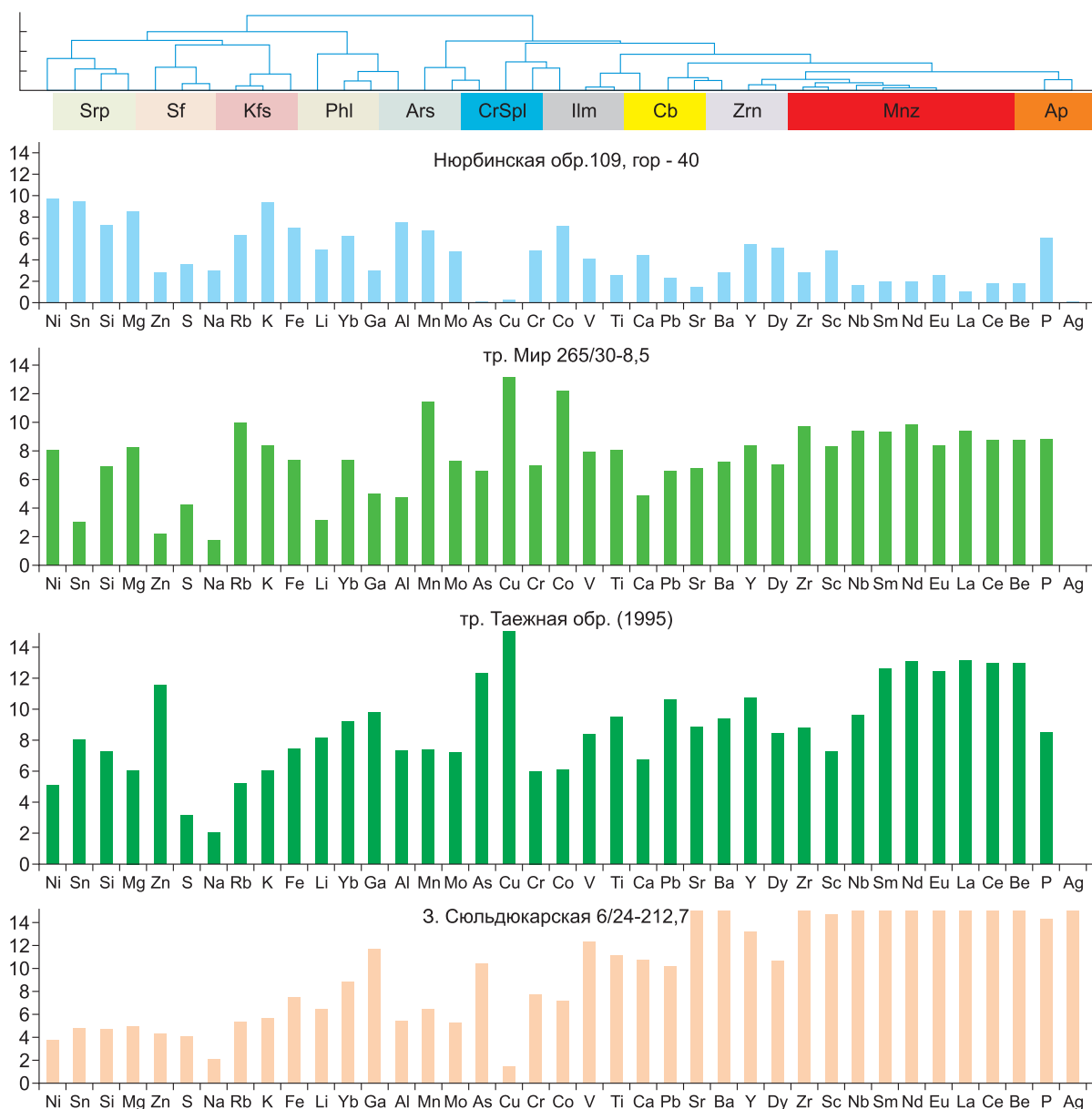


Рис. 4. Диаграммы относительных содержаний химических элементов в ОМ кимберлитовых трубках различной алмазности.

Srp – серпентин, Sf – сульфиды, Kfs – фельшпатоиды, Phl – флогопит, Ars – арсениды, CrSpl – хромшпинелид, Ilm – ильменит, Cb – карбонаты, Zrn – циркон, Mnz – монацит, Ap – апатит.

Fig. 4. Diagrams of relative chemical elements' contents in the bulk groundmass of kimberlite pipes with different diamond potential.

Srp – serpentine, Sf – sulfides, Kfs – feldspathoids, Phl – phlogopite, Ars – arsenides, CrSpl – chrome spinel, Ilm – ilmenite, Cb – carbonates, Zrn – zircon, Mnz – monazite, Ap – apatite.

раллелизуется с алмазностью трубок (правая часть диаграмм), так и в составе основных породообразующих элементов (левая часть диаграмм).

Следует отметить, что ранее среди фондолитов, щелочных и нефелиновых сиенитов, щелочных ультраосновных пород и камафоритов Томторского массива были выделены пять класте-

ров [30] по ассоциации основных и ряда рудных микрокомпонентов: $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O} + \text{Ba}$, $\text{TiO}_2 + \text{Nb} + \text{Zr}$, $\text{FeO}_{\text{tot}} + \text{V} + \text{Zn} + \text{MnO}$, $\text{MgO} + \text{Cr} + \text{Ni}$ и $\text{P}_2\text{O}_5 + \text{Y} + \text{CaO} + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$, которые примерно соответствуют флогопитовой, пикроильменитовой, серпентиновой и карбонат-апатит-РЗЭ группам минералообразования ОМ кимберлитов. Таким

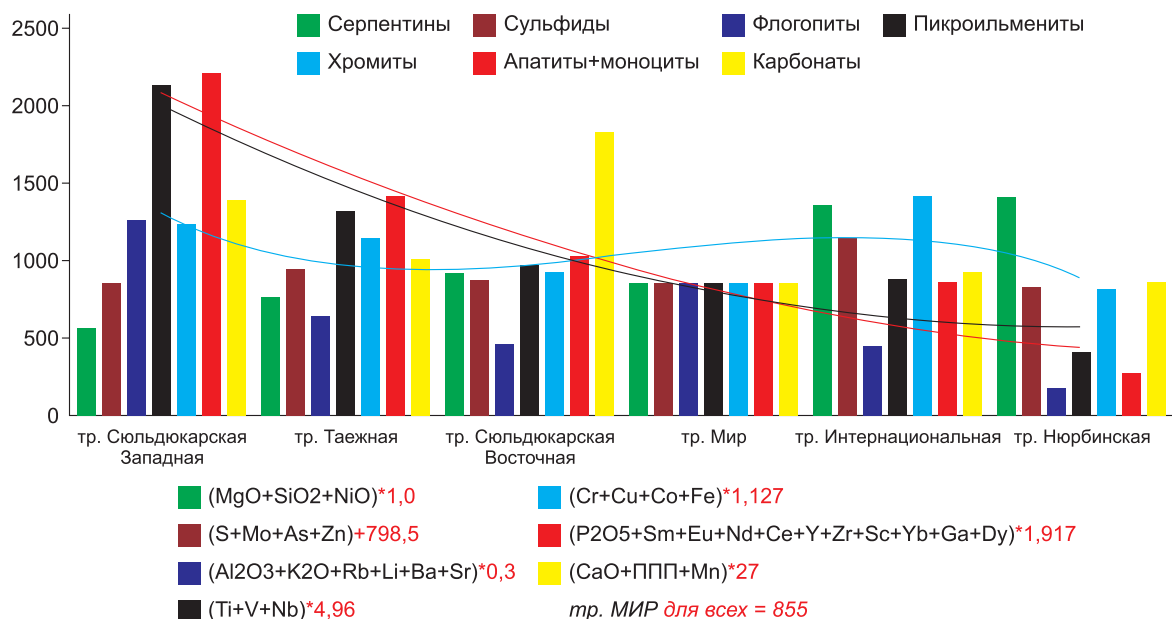


Рис. 5. Гистограммы распределения семи выделенных групп минералообразования в ОМ кимберлитовых трубок ЯАП.

Fig. 5. Distribution histograms of seven identified mineral-forming groups in the **bulk groundmass** of kimberlite pipes in the Yakutian diamondiferous province.

образом, в дальнейшем, методом кластерного анализа можно проводить переходные параллели от алмазоносных кимберлитов ЯАП к комплексам щелочно-ультраосновных пород через убого- и неалмазоносные кимберлиты северо-востока Сибирской платформы.

После дальнейших углубленных обсуждений результатов исследования содержания и распределения широкого комплекса элементов в составе ОМ кимберлитовых пород различных трубок, детализации обработки аналитических данных и рассмотрения возможных практических приложений мы пришли к выводу о необходимости расширения количества выделенных минералогических групп, что позволяет более достоверно отражать процессы кимберлитобразования. В конечном итоге все данные по содержанию 42 элементов в составе ОМ кимберлитов, анализируемые с использованием ICPMS спектрометрии, были объединены в семь минералогических групп, которые приведены на соответствующей диаграмме (рис. 5).

Нами предлагается семь коэффициентов, включающих все анализируемые химические элементы составов ОМ, для сравнения концентраций и распределения элементов в ОМ трубок различной алмазоносности, что позволяет оценивать специфику состава ОМ различных тру-

бок в увязке с их алмазоносностью и характером развития минералообразующих процессов в основной массе кимберлитов. Эти совокупности химических элементов в составах ОМ (семь выделенных групп) для кимберлитов являются когерентно-взаимосвязанными [26]. Коэффициенты групп широкого комплекса химических элементов в составе ОМ кимберлитовых пород из всех трубок ранжированы по распределению элементов в ОМ реперной кимберлитовой трубки Мир, и подобраны таким образом, чтобы получить одинаковые величины всех семи групп, соответствующих столбцам гистограмм (см. рис. 5).

Кимберлитовые трубки на диаграмме расположены слева направо по мере увеличения степени их алмазоносности. Величины гистограмм можно назвать реперами, которые последовательно соответствуют значениям их больших кластерных расстояний при групповом анализе составов ОМ кимберлитов. Для отнесения кимберлита к определенному кимберлитовому полю и предварительной оценки его потенциальной алмазоносности необходимо построить семь гистограмм соответствующих соотношений выделенных специфических групп.

Таким образом, на примере конкретных кимберлитовых трубок нами разработан и предло-

жен программный модуль для построения таких гистограмм. Стоит отметить особенности составов различных кимберлитов, выраженные в соотношениях вычисленных нами и продемонстрированных в форме гистограмм их минералообразующих процессов. Для низкоалмазоносных кимберлитовых тел характерно преобладание пикроильменитовой группы минералообразования над хромитовой, а для высокоалмазоносных кимберлитов эти отношения противоположны. Соответствующие, вычисленные нами особенности ОМ кимберлитов подчеркнуты на рис. 5 трендовыми линиями одинакового цвета этих гистограмм, отражающих процесс минералообразования.

Следует подчеркнуть, что минералообразующие элементы и элементы примеси объединялись, в зависимости от их корреляционных соотношений в изученных пробах, на основании больших кластерных расстояний в группы, которые характеризуют процесс образования минералов в основной массе кимберлитов. Необходимо отметить наличие устойчивой взаимосвязи алмазоносности кимберлитов с макро- и микросоставом их ОМ. Для высокоалмазоносных кимберлитов характерно преобладание в два и более раза сульфидов в основной массе и серпентина, а также преобладание хромитовой группы минералообразования над пикроильменитовой (см. рис. 4). В основной массе этих же кимберлитов в два раза меньше содержание минералов группы апатита и РЗЭ.

Таким образом, несомненно, что наряду с традиционными способами оценки потенциальной алмазоносности кимберлитов на основании составов индикаторных минералов [15, 26, 27, 31] корректное количественное определение основных, примесных и редкоземельных элементов в составе ОМ кимберлитов позволяет не только использовать эти результаты для целей типизации и выявления специфики разновидностей и фаз внедрения кимберлитов, но и для весьма оперативной оценки их потенциальной алмазоносности.

Заключение

Результаты детального исследования химизма основных и примесных элементов в составе основной массы кимберлитов из трубок Якутской провинции с различной алмазоносностью,

их последующая статистическая обработка с петрологической интерпретацией позволяют сделать ряд выводов:

1. Для высокоалмазоносных кимберлитов характерно преобладание почти в два раза хромитовой группы минералообразования над пикроильменитовой. Также для основной массы высокоалмазоносных кимберлитов установлены увеличение доли серпентиновой группы минералообразования и более низкие содержания элементов группы апатита и РЗЭ.

2. Установлено, что каждая трубка характеризуется достаточно специфическими взаимоотношениями выделенных групп элементов, что позволяет рассматривать эти особенности как реперные для различных кимберлитовых тел, что может быть использовано для идентификации коренного источника в процессе проведения поисковых работ.

3. ИСП анализ основной массы дает возможность характеризовать процессы образования минералов в основной массе кимберлитов и сравнивать по полученным химическим анализам кимберлитовые трубки или фазы внедрения кимберлитов в одном теле. Результаты ИСП-анализа основной массы кимберлитовых трубок и отдельных фаз внедрения при использовании предлагаемых нами методических принципов также позволяют осуществлять качественную оценку продуктивности кимберлитовых тел, фаз внедрения или отдельных блоков. Аналогично, использование предлагаемых подходов позволяет относить вновь обнаруженный кимберлит к определенному типу кимберлита или конкретному кимберлитовому полю.

Литература

1. Костровицкий С.И., Спецрус З.В., Яковлев Д.А., Фон-дер-Флаасс Г.С., Суворова Л.Ф., Богуш И.Н. Атлас коренных месторождений алмаза Якутской кимберлитовой провинции / Отв. редактор ак. Н.П. Похиленко. Мирный: типография ООО «МГП», 2015. 480 с.
2. Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М.: Недра, 1998. 555 с.
3. Howarth G.H., Skinner E.M.W. Sub-volcanic development of kimberlite pipes: Evidence from the Lace and Voorspoed (Group II) kimberlites, South Africa // Journal of Volcanology and Geothermal Research. 2013. Vol. 268. P. 1–16.
4. Sparks R.S.J. Kimberlite volcanism // Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2013. Vol. 41.

- P. 497–528, <http://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105252>.
5. *Van Straaten B., Kopylova M.G.* Pyroclastic kimberlite deposits from the Victor Northwest pipe (Ontario, Canada): the transition from phreatomagmatic to magmatic explosivity // *Can J. Earth Sci.* 2013. Vol. 50(10). P. 1059–1068.
 6. *Богатилов О.А., Гоньшакова В.И., Ефремова С.В. и др.* Классификация и номенклатура магматических горных пород. М.: Недра, 1981. 160 с.
 7. *Mitchell R.H.* Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. NY: Plenum Press, 1986. 442 p.
 8. *Василенко В.Б., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г.* Петрохимические модели алмазных месторождений Якутии. Новосибирск: Наука, 1997. 415 с.
 9. *Костровицкий С.И., Морикио Т., Серов И.В., Амиржанов А.А.* Изотопно-геохимическая систематика кимберлитов Сибирской платформы // *Геология и геофизика*. 2007. Т. 48, № 3. С. 350–371.
 10. *Kopylova M., Kostrovitsky S.I., Egorov K.N.* Salts in southern Yakuan kimberlites and the problem of primary alkali kimberlite melts // *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 119. P. 1–16.
 11. *Wedepohl K.H., Muramatsu Y.* The chemical composition of kimberlites compared with the average composition of three basaltic magma types // *Kimberlites, Diatremes, and Diamonds: Their Geology, Petrology, and Geochemistry* / Editors(s): Henry O.A. Meyer; F.R. Boyd. 2013. Vol. 15. P. 45–57.
 12. *Kamenetsky V.S., Maas R., Kamenetsky M.B., Paton C., Phillips D., Golovin A.V., Gornova M.A.* Chlorine from the mantle: Magmatic halides in the Udachnaya-East kimberlite, Siberia // *EPSL*. 2009. Vol. 285 (1-2). P. 96–104.
 13. *Василенко В.Б., Кузнецова Л.Г., Толстов А.В., Минин В.А.* Оценка потенциальной алмазоносности неизмененных кимберлитов на основе популяционных моделей их составов // *Геохимия*. 2012. №12. С. 1098–1118.
 14. *Милашев В.А.* Петрохимия кимберлитов Якутии и факторы их алмазоносности. Л.: Недра, 1965. 160 с.
 15. *Иванов А.С.* Статистический анализ индикаторных минералов кимберлитов // *Труды XIII Всероссийской (с международным участием) Ферсмановской сессии. КНЦ РАН. Апатиты*, 2017. С. 172–181.
 16. *Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францесон Е.В.* Геохимия кимберлитов. М.: Недра, 1978. 352 с.
 17. *Специус З.В., Иванов А.С.* Примесные элементы в пиропсах по данным микронзондовых анализов // *Материалы IX Всероссийской научно-практической конференции*. Якутск, 2019. С. 173–178.
 18. *Hayman P.C., Cas R.A.F., Johnson M.* Difficulties in distinguishing coherent from fragmental kimberlite: a case study of the Muskhox pipe (Northern Slave Province, Nunavut, Canada) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2008. Vol. 174. P. 139–151.
 19. *Василенко В.Б., Толстов А.В., Кузнецова Л.Г., Минин В.А.* Петрохимические критерии оценки алмазоносности кимберлитовых месторождений Якутии // *Геохимия*. 2010. № 2. С. 1–10.
 20. *Зинчук Н.Н., Специус З.В., Зуенко В.В., Зуев В.М.* Кимберлитовая трубка Удачная. Вещественный состав и условия формирования. Новосибирск: Изд-во Новосибирского ун-та, 1993. 147 с.
 21. *Корнилова В.П., Никишов К.Н., Ковальский В.В., Зольников Г.В.* Атлас текстур и структур кимберлитовых пород. М.: Наука, 1983. 157 с.
 22. *Webb K.J., Hetman C.M.* Magmaclasts in Kimberlite // 11th International Kimberlite Conference. Extended Abstracts. 2017. No. 11IKC-4572.
 23. *Spetsius Z.V., Aminov A.V., Ivanov A.S.* Petrology of the Yubileynaya kimberlite pipe: application to the kimberlites variation with the depth // *Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis. Proceedings in Earth and Environmental Sciences. GSLSpecPub*, 2021. P. 211–230, https://doi.org/10.1007/978-3-030-69670-2_13.
 24. *Специус З.В.* Эволюция состава кимберлитов и проблема алмазоносности // *Ультраосновные магмы и их металлогения*. Владивосток, 1987. С. 137–148.
 25. *Специус З.В., Безбородов С.М., Баландин С.В.* Геолого-технологическая модель коренного алмазного месторождения // *Прогнозирование и поиски коренных алмазных месторождений. Международная научно-практическая конференция*. Симферополь; Судак, 1999. С. 332–336.
 26. *Герни Д.Д., Мур Р.О.* Геохимическая корреляция между минералами кимберлитов и алмазами Кратона Калахари // *Геология и геофизика*. 1994. № 5. С. 12–24.
 27. *Dawson J.B., Stephens W.E.* Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths // *J. Geol.* 1975. Vol. 83. P. 589–607.
 28. *Поротов Г.С.* Основы статистической обработки материалов разведки месторождений. Л.: Изд. ЛГИ, 1985. 97 с.
 29. *Специус З.В., Иванов А., Буруева М.В.* Геохимический образ кимберлитовых тел по данным анализа составов основной массы кимберлитов методом плазменной спектроскопии (ИСП-АЭС) // *Материалы X Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Геология и минерально-сырьевые ресурсы Северо-Востока России»*, Якутск. 2020. С. 394–398.
 30. *Округин А.В., Толстов А.В., Слепцов А.П., Баранов Л.Н.* Петрохимические особенности ассоциации ультраосновных щелочных пород и карбонати-

тов Томторского массива и интерпретация возможных трендов их эволюции // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2019. № 4. С. 7–24.

31. Соболев Н.В. О минералогических критериях алмазности кимберлитов // Геология и геофизика. 1971. № 3. С. 70–80.

Поступила в редакцию 08.11.2021

Принята к публикации 20.01.2022

Об авторах

СПЕЦИУС, Здислав Витольдович, доктор геолого-минералогических наук, главный научный сотрудник, Институт геологии алмаза и благородных металлов, Сибирское отделение Российской академии наук, 677980, Якутск, пр. Ленина, 39, Россия, <http://orcid.org/0000-0002-6696-6639>, e-mail: spetsiuszv@gmail.com;

ИВАНОВ, Александр Сергеевич, кандидат геолого-минералогических наук, ведущий научный сотрудник, Санкт-Петербургский горный университет, 199106, Санкт-Петербург, 21-я лин. В.О., 2, Россия, <https://orcid.org/0000-0002-8258-5967>, e-mail: Ivanov_AS6@pers.spmi.ru

Информация для цитирования

Спеццус З.В., Иванов А.С. Статистический анализ составов основной массы разноалмазносных кимберлитов Якутской алмазносной провинции // Природные ресурсы Арктики и Субарктики. 2022, Т. 27, № 1. С. 21–31. <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-21-31>

DOI 10.31242/2618-9712-2022-27-1-21-31

Statistical analysis of the groundmass composition of the diamond-bearing kimberlites of different grade in Yakutian diamondiferous province

Z.V. Spetsius^{1,*}, A.S. Ivanov²

¹Diamond and Precious Metal Geology Institute SB RAS, Yakutsk, Russia

²Saint Petersburg Mine University, Saint Petersburg, Russia

*spetsiuszv@gmail.com

Abstract. The chemical composition of kimberlites is essential for the identification of the origin and assessment of their potential diamond content. We have studied 42 major and trace elements in more than 100 samples from the bulk groundmass of kimberlite pipes of the Yakutian diamondiferous province. The procedures were performed using the ICPMS spectrometer iCAP 6300 Duo. The data on composition of the groundmass of kimberlites was processed by traditional statistical methods. Based on the analysis results, we have identified seven groups of mineral-forming elements. For a kimberlite pipe with a known diamond content, we proposed to select coefficients in order to construct histograms of the same size. Thus, the percentage values of the seven groups of mineral-forming elements serves as a benchmark. We demonstrated that the chemistry of the bulk groundmass of kimberlites is specific to each kimberlite pipe and can be used to assess their potential diamond grade.

Keywords: kimberlites, ground mass, chemical composition, statistical analysis, diamond grade, Yakutian diamondiferous province.

Acknowledgements. The authors express gratitude to all the colleagues participated in the implementation of the laboratory and analytical work of the studies. The main part of the research was carried out within the scientific research at the Geo-Scientific Enterprise, ALROSA OJSC.

References

1. *Kostrovitskiy S.I., Spetsius Z.V., Yakovlev D.A., Fon-der-Flaass G.S., Suvorova L.F., Bogush I.N.* Atlas korennykh mestorozhdeniy almaza Yakutskoy kimberlitovoy provintsii / Otв. redaktor ak. N.P. Pokhilenko. Mirnyy: tipografiya OOO «MGP», 2015. 480 p.
2. *Khar'kiv A.D., Zinchuk N.N., Kryuchkov A.I.* Korennyye mestorozhdeniya almazov mira. M.: Nedra, 1998. 555 p.
3. *Howarth G.H., Skinner E.M.W.* Sub-volcanic development of kimberlite pipes: Evidence from the Lace and Voorspoed (Group II) kimberlites, South Africa // *Journal of Volcanology and Geothermal Research*. 2013. Vol. 268. P. 1–16.
4. *Sparks R.S.J.* Kimberlite volcanism // *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*. 2013. Vol. 41. P. 497–528, <http://doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105252>.
5. *Van Straaten B., Kopylova M.G.* Pyroclastic kimberlite deposits from the Victor Northwest pipe (Ontario, Canada): the transition from phreatomagmatic to magmatic explosivity // *Can J. Earth Sci.* 2013. Vol. 50(10). P. 1059–1068.
6. *Bogatikov O.A., Gon'shakova V.I., Yefremova S.V. i dr.* Klassifikatsiya i nomenklatura magmaticheskikh gornyykh porod. M.: Nedra, 1981. 160 p.
7. *Mitchell R.H.* Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. NY: Plenum Press, 1986. 442 p.
8. *Vasilenko V.B., Zinchuk N.N., Kuznetsova L.G.* Petrokhimicheskiye modeli almaznykh mestorozhdeniy Yakutii. Novosibirsk: Nauka, 1997. 415 p.
9. *Kostrovitskiy S.I., Morikio T., Serov I.V., Amirzhanov A.A.* Izotopno-geokhimicheskaya sistematika kimberlitov Sibirskoy platformy // *Geologiya i geofizika*. 2007. Vol. 48, No. 3. P. 350–371.
10. *Kopylova M., Kostrovitskiy S.I., Egorov K.N.* Salts in southern Yakuian kimberlites and the problem of primary alkali kimberlite melts // *Earth-Science Reviews*. 2013. Vol. 119. P. 1–16.
11. *Wedepohl K.H., Muramatsu Y.* The chemical composition of kimberlites compared with the average composition of three basaltic magma types // *Kimberlites, Diatremes, and Diamonds: Their Geology, Petrology, and Geochemistry* / Editors(s): Henry O.A. Meyer; F.R. Boyd. 2013. Vol. 15. P. 45–57.
12. *Kamenetsky V.S., Maas R., Kamenetsky M.B., Paton C., Phillips D., Golovin A.V., Gornova M.A.* Chlorine from the mantle: Magmatic halides in the Udachnaya-East kimberlite, Siberia // *EPSL*. 2009. Vol. 285 (1-2). P. 96–104.
13. *Vasilenko V.B., Kuznetsova L.G., Tolstov A.V., Minin V.A.* Otsenka potentsial'noy almazonosnosti neizmenennykh kimberlitov na osnove populyatsionnykh modeley ikh sostavov // *Geokhimiya*. 2012. No. 12. P. 1098–1118.
14. *Milashev V.A.* Petrokhimiya kimberlitov Yakutii i faktory ikh almazonosnosti. L.: Nedra, 1965. 160 p.
15. *Ivanov A.S.* Statisticheskii analiz indikatornykh mineralov kimberlitov // *Trudy XIII Vserossiyskoy (s mezhdunarodnym uchastiyem) Fersmanovskoy sessii. KNTS RAN. Apatity*. 2017. P. 172–181.
16. *Ilupin I.P., Kaminskiy F.V., Frantsesson Y.V.* Geokhimiya kimberlitov. M.: Nedra, 1978. 352 p.
17. *Spetsius Z.V., Ivanov A.S.* Primesnyye elementy v piropakh po dannym mikrozonovykh analizov // *Materialy IX Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii. Yakutsk*, 2019. P. 173–178.
18. *Hayman P.C., Cas R.A.F., Johnson M.* Difficulties in distinguishing coherent from fragmental kimberlite: a case study of the Muskox pipe (Northern Slave Province, Nunavut, Canada) // *J. Volcanol. Geotherm. Res.* 2008. Vol. 174. P. 139–151.
19. *Vasilenko V.B., Tolstov A.V., Kuznetsova L.G., Minin V.A.* Petrokhimicheskiye kriterii otsenki almazonosnosti kimberlitovykh mestorozhdeniy Yakutii // *Geokhimiya*. 2010. No. 2. P. 1–10.
20. *Zinchuk N.N., Spetsius Z.V., Zuyenko V.V., Zuyev V.M.* Kimberlitovaya trubka Udachnaya. Veshchestvennyy sostav i usloviya formirovaniya. Novosibirsk: Izd-vo Novosibirskogo un-ta, 1993. 147 p.
21. *Kornilova V.P., Nikishov K.N., Koval'skiy V.V., Zol'nikov G.V.* Atlas tekstur i struktur kimberlitovykh porod. M.: Nauka, 1983. 157 p.
22. *Webb K.J., Hetman C.M.* Magmaclasts in Kimberlite // 11th International Kimberlite Conference. Extended Abstracts. 2017. No. 11IKC-4572.
23. *Spetsius Z.V., Aminov A.V., Ivanov A.S.* Petrology of the Yubileynaya kimberlite pipe: application to the kimberlites variation with the depth // *Alkaline Rocks, Kimberlites and Carbonatites: Geochemistry and Genesis. Proceedings in Earth and Environmental Sciences. GSLSpecPub*, 2021. P. 211–230, https://doi.org/10.1007/978-3-030-69670-2_13.
24. *Spetsius Z.V.* Evolyutsiya sostava kimberlitov i problema almazonosnosti // *Ul'traosnovnyye magmy i ikh metallogeniya. Vladivostok*, 1987. P. 137–148.
25. *Spetsius Z. V., Bezborodov S.M., Balandin S.V.* Geologo-tekhnologicheskaya model' koren'nogo almaznogo mestorozhdeniya // *V sb.: Prognozirovaniye i poiski korennykh almaznykh mestorozhdeniy. Mezhdunarodnaya nauchno-prakticheskaya konferentsiya. Simferopol'*; Sudak, 1999. P. 332–336.
26. *Gerni D.D., Mur R.O.* Geokhimicheskaya korelyatsiya mezhdru mineralami kimberlitov i almazami Kratona Kalakhari // *Geologiya i Geofizika*. 1994. No. 5. P. 12–24.
27. *Dawson J.B., Stephens W.E.* Statistical classification of garnets from kimberlite and associated xenoliths // *J. Geol.* 1975. Vol. 83. P. 589–607.
28. *Porotov G.S.* Osnovy statisticheskoy obrabotki materialov razvedki mestorozhdeniy. L.: Izd. LGI, 1985. 97 p.
29. *Spetsius Z.V., Ivanov A.S., Buruyeva M.V.* Geokhimicheskiy obraz kimberlitovykh tel po dannym analiza sostava

vov osnovnoy massy kimberlitov metodom plazmennoy spektroskopii (ISP-AES) // Materialy X Vserossiyskoy nauchno-prakticheskoy konferentsii s mezhdunarodnym uchastiyem "Geologiya i mineral'no-syr'yevyye resursy Severo-Vostoka Rossii". Yakutsk. 2020. P. 394–398.

30. *Okrugin A.V., Tolstov A.V., Sleptsov A.P., Baranov L.N.* Petrohimicheskie osobennosti associacii ul'tra-

osnovnyh shchelochnyh porod i karbonatitov Tomtorskogo massiva i interpretaciya vozmozhnyh trendov ih evolyucii // Prirodnie resursi Arktiki i Subarkтики. 2019. Vol. 24, No. 4. P. 7–24.

31. *Sobolev N.V.* O mineralogicheskikh kriteriyakh almazonosnosti kimberlitov // Geologiya i geofizika. 1971. No. 3. P. 70–80.

Submitted 08.11.2021

Accepted 20.01.2022

About the authors

SPETSIUS, Zdislav Vitoldovich, Dr. Sci. (Geology and Mineralogy), chief researcher, Diamond and Precious Metal Geology Institute, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 39 Lenina pr., Yakutsk 677980, Russia,

<http://orcid.org/0000-0002-6696-6639>, e-mail: spetsiuszv@gmail.com;

IVANOV, Alexandr Sergeevich, Cand. Sci. (Geology and Mineralogy), researcher, Saint Petersburg Mining University, 21-line, V. Island, Saint Petersburg, 199034, Russia,

<https://orcid.org/0000-0002-8258-5967>, e-mail: Ivanov_AS6@pers.spmi.ru

Citation

Spetsius Z.V., Ivanov A.S. Statistical analysis of the groundmass composition of the diamond-bearing kimberlites of different grade in Yakutian diamondiferous province // Arctic and Subarctic Natural Resources. 2022, Vol. 27, No. 1. P. 21–31. (In Russ.) <https://doi.org/10.31242/2618-9712-2022-27-1-21-31>