

11. Седова И.С., Семенов А.П., Кравцова Е.И. О природе мигматитов полиметаморфического комплекса Тупой губы оз. Ковдозера, Северо-Западное Беломорье // Петрология. 1998. Т. 6. № 2. С. 197—224.
12. Щербакова Т.Ф. Амфиболиты беломорского комплекса и их гранитизация. М.: Наука, 1988. 150 с.

13. Hammarstrom J.M., Zen Ean. Aluminum in hornblende: An empirical igneous geobarometer // American Mineralogist. 1986. V.71. P. 1297—1313.
14. Johnson M.C., Rutherford M.J. Empirical calibration of aluminium-in-hornblende geobarometer applicable to calcalkaline rocks // Geology. 1989. V. 17. P. 837—841.

Московский государственный геологоразведочный университет
Рецензент — Л.Н. Липчанская

УДК 550.4:551.2:552.321(571.56)

И.В. СЕРОВ, В.К. ГАРАНИН, Г.П. КУДРЯВЦЕВА, С.И. КОСТРОВИЦКИЙ

НОВЫЕ ДАННЫЕ О МАНТИЙНЫХ ИСТОЧНИКАХ КИМБЕРЛИТОВОГО ВУЛКАНИЗМА СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Для кимберлитов Якутской алмазоносной провинции (ЯАП) выделены два основных петрохимических тренда: железо-титанистый (Fe-Ti); магнезиально-глиноземистый (Mg-Al). Высокоглиноземистые породы повышенной щелочности участка Сербиян отнесены к лампрофiram. Большинство изученных кимберлитов ЯАП по соотношению главных петрогенных элементов (MgO/CaO, TiO₂/K₂O, MgO/FeO, сумме щелочей), а также соотношению элементов-примесей (Zr/Nb < 2, Nb/La 1,3—2,3 и Ce/Sr 0,04—0,3) являются типичными представителями базальтоидной разновидности. Отмечен высокий уровень накопления элементов-примесей в кимберлитах слабоалмазоносного Куонамского района. Предполагается, что породы источника кимберлитов ураганоалмазоносной трубки Нюрбинская обеднены гранатом и представлены истощенными и изолированными от конвектирующей астеносферной мантии гарцбургитами. Выявлены сходные набор минералов тяжелой фракции, уровень накопления элементов-примесей и их соотношения в кимберлитах трубок Нюрбинская (Якутия) и трубок алмазоносного Золотицкого поля Архангельской алмазоносной провинции (ААП). Эти данные указывают на близость минералогических и геохимических характеристик мантийных источников кимберлитовых расплавов, сформировавших данные алмазоносные кимберлитовые тела.

Одна из главных задач петрогенеза кимберлитов — установление соотношения кимберлитов и пород верхней мантии и разработка критериев алмазоносности кимберлитов. По петрохимическим особенностям, распределению элементов-примесей, изотопным характеристикам кимберлитов и родственных им пород можно оценить состав мантийных источников и степень их метасоматической проработки, а также прогнозировать алмазоносность пород на основе косвенных критериев. Данное направление исследований актуально, так как позволяет выявить вклад того или иного типа мантийного источника в формирование мантийных расплавов, природу взаимоотношений кимберлитов и родственных им пород.

Сравнительная характеристика кимберлитов ЯАП позволила установить отличия в геохимическом плане кимберлитов ураганоалмазоносной трубки Нюрбинская Средне-Мархинского района ЯАП от большинства кимберлитов Якутии; выделить два минералогических типа алмазоносных месторождений Якутии.

Объект и методы исследования

Изученный каменный материал (кимберлиты и родственные им породы) характеризует 13 главных полей ЯАП из трех минерагенических зон: Вилуй-

ско-Мархинской, Далдыно-Оленекской и Анабарской, отличающихся по набору и соотношению ксенолитов пород верхней мантии, минералов-спутников алмаза, степени алмазоносности и минеральному составу связующей массы пород. Исследованы породы 31 тела из следующих полей: Мало-Ботуобинское (2), Накынское (2), Алакит-Мархинское (3), Далдынское (6), Верхне-Мунское (3), Куойкское (3), Лучаканское (4), Мало-Куонамское (1), Дюкенское (1), Средне-Куонамское (2), Верхне-Куонамское (1), Нижне-Куонамское (2), Харамайское (1). Для сравнения изучены кимберлиты глубоких горизонтов алмазоносной трубки им. В. Гриба (Верхотинское поле) и трубки Пионерская (месторождение им. М.В. Ломоносова) из ААП, представляющих ее два минеральных типа алмазных месторождений, впервые выделенные на территории ААП [3]. Привлечены также аналитические данные из литературных источников [1, 2, 4, 10].

Изучение минерального состава кимберлитовых пород проведено на микроскопах «OPTON UMSP50» (Германия) и «NIKON» (Япония).

Для оригинальных и позаимствованных из литературы петрохимических анализов рассчитаны индексы контаминации коровым материалом

$C.I = SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O/2K_2O + MgO$ [9] и обогащения Fe-Ti-оксидами, главным образом ильменитом, $IIm.I = FeO_t + TiO_2/2K_2O + MgO$. Согласно рекомендациям [13], C.I неконтаминированных кимберлитов для неслюдяных разновидностей < 1,5, а для слюдяных < 1,7. Авторы использовали только анализы, удовлетворяющие данным условиям.

Распределение элементов-примесей исследовано методом масс-спектрометрии с источником ионов в виде индуктивно связанной плазмы (ISP-MS) на масс-спектрометре ELAN 6100 DRC. Градуировочные графики, связывающие содержание определяемого элемента, обычно линейные в интервале 3—4 порядков величины концентрации, хотя иногда наблюдается незначительное искривление. Точность результатов для инструментальных методов хорошая (абсолютная ошибка определения 5%, относительная 2%). Правильность результатов контролировалась измерением эталона BCR-II (аналитик Д.З. Журавлев, ИМГРЭ).

Результаты исследований и их обсуждение

Особенности состава кимберлитов и родственных им пород представлены на бинарной C.I—IIm.I диаграмме (рис. 1). На диаграмме отражены области слюдяных (группа II) и базальтоидных (группы

IA, IB) кимберлитов Южной Африки [13]. Векторы в верхней части диаграммы показывают направления контаминации кимберлитов коровым материалом, аккумуляции ильменита (или Fe-Ti оксидов) и оливина. Основные вариации составов кимберлитов наблюдаются вдоль направления аккумуляции Fe-Ti оксидов (IIm.I). Точки составов кимберлитов по содержанию TiO_2 четко разделяются на группы. Следует обратить внимание на высокомагнезиальные кимберлиты трубки Айхал, не типичные для ЯАП, и I, II групп кимберлитов Южной Африки, которые образуют собственное поле и характеризуются низкими индексами контаминации (IIm.I 0,1-0,25; C.I 0,8-1,2).

Основная часть высокоалмазоносных кимберлитов Якутии сосредоточена в поле группы IA (трубки Удачная-Восточная, Мир, кимберлиты Верхне-Мунского поля и др.). Кимберлиты данных тел характеризуются средними значениями IIm.I (0,25-0,5). Высокие значения IIm.I $\geq 0,5$ свойственны кимберлитам из трубки Дальняя — следствие обогащения кимберлитов ильменитом. Фигуративные точки значений IIm.I для кимберлитов этой трубки на диаграмме попадают в поле кимберлитов группы IB из Южной Африки. Еще более высокими значениями IIm.I (0,5-0,8) обладают кимберли-

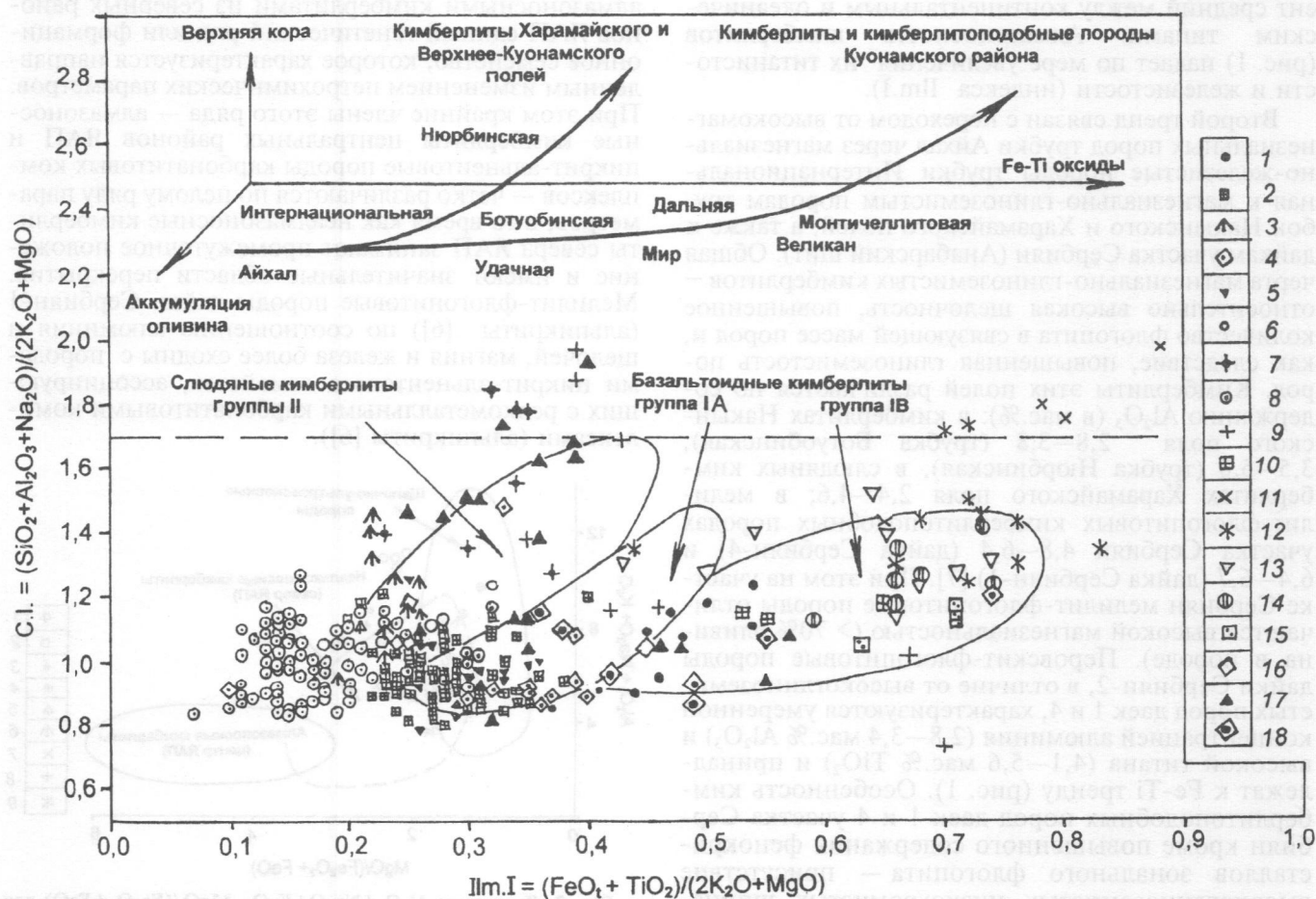


Рис. 1. Диаграмма в индексах контаминации коровым материалом C.I. и Fe-Ti оксидами для кимберлитов и кимберлитоподобных пород ЯАП; 1—8 — трубки: 1 — Дальняя, 2 — Удачная-Восточная, 3 — Интернациональная, 4 — Мир, 5 — Новинка, 6 — Ботуобинская, 7 — Нюрбинская, 8 — Айхал; 9, 10 — дайки: 9 — участка Сербия, 10 — Лось; 11, 12 — трубки: 11 — Улыбка и Спортивная, 12 — Арктика и дайка Рудный Двор; 13 — кимберлиты Лучаканского поля, 14 — дайки Монтичеллитовая; 15 — дайка Великан; 16 — трубка Обнаженная, 17 — кимберлиты Харамайского поля; 18 — интрузивное кимберлитовое тело Липа; Области выделены по [13]; ниже пунктирной линии лежат точки слабоконтаминированных кимберлитов

ты и кимберлитоподобные породы полей Куонамского поля ЯАП, что связано с высокими концентрациями оксидных титаносодержащих фаз (до 10%) в связующей массе пород, преимущественно титаномагнетитов и перовскита. Таким образом, выявлен тренд изменения состава кимберлитов от высокомагнезиальных кимберлитовых пород (трубка Айхал, Пт.І 0,1-0,25) через магнезиально-железистые (трубка Удачная) и магнезиально-железо-титанистые (трубки Мир, Дальняя) к железо-титанистым (кимберлиты Куонамского поля, север ЯАП, Пт.І до 0,9). При этом тренд в начале отражает такую важную петрохимическую специфику мантийных источников кимберлитов, как магнезиальность, а в конце, вероятно, — степень накопления титана и железа в кимберлитовых и родственных им расплавах или степень дифференцированности таких расплавов. Кимберлиты убогоалмазонасного Куонамского поля (Fe-Ti серия) подобно кимберлитам группы ІВ Южной Африки локализуются в окраинных частях ЯАП. Причина различия между ІА и ІВ неясна. Предполагается, что различия петрохимического состава пород связаны с глубиной плавления или с преобладающим геотермическим градиентом. Для кимберлитов группы ІВ допускается менее глубокий источник по сравнению с кимберлитами группы ІА и геотермический градиент средний между континентальным и океаническим типами. Алмазонасность кимберлитов (рис. 1) падает по мере увеличения их титанистости и железистости (индекса Пт.І).

Второй тренд связан с переходом от высокомагнезиальных пород трубки Айхал через магнезиально-железистые породы трубки Интернациональная к магнезиально-глиноземистым породам трубок Накынского и Харамайского полей, а также к дайкам участка Сербиян (Анабарский щит). Общая черта магнезиально-глиноземистых кимберлитов — относительно высокая щелочность, повышенное количество флогопита в связующей массе пород и, как следствие, повышенная глиноземистость пород. Кимберлиты этих полей различаются по содержанию Al_2O_3 (в мас.%): в кимберлитах Накынского поля 2,8—3,8 (трубка Ботуобинская), 3,5—5,0 (трубка Нюрбинская); в слюдяных кимберлитах Харамайского поля 2,4—4,6; в мелилит-флогопитовых кимберлитоподобных породах участка Сербиян 4,8—6,4 (дайка Сербиян-4) и 6,4—6,7 (дайка Сербиян-1) [7]. При этом на участке Сербиян мелилит-флогопитовые породы отличаются высокой магнезиальностью (> 70% оливина в породе). Перовскит-флогопитовые породы дайки Сербиян-2, в отличие от высокоглиноземистых пород даек 1 и 4, характеризуются умеренной концентрацией алюминия (2,8—3,4 мас.% Al_2O_3) и высокой титана (4,1—5,6 мас.% TiO_2) и принадлежат к Fe-Ti тренду (рис. 1). Особенность кимберлитоподобных пород даек 1 и 4 участка Сербиян кроме повышенного содержания фенокристаллов зонального флогопита — присутствие высокоглиноземистых низкохромистых шпинелидов (10,3—11,3 мас.% Al_2O_3 ; 27,8—37,5 мас.% Cr_2O_3) и алюминий содержащих титаномагнетитов (4,2—7,1 мас.% Al_2O_3). Отметим, что отмечаются хромшпинелиды в связующей массе кимберлитов трубки Нюрбинская при несколько повышенном

содержании глинозема (5,2—9,8 мас.% Al_2O_3 ; 52,8—59,9 мас.% Cr_2O_3).

Столь высокие количества алюминия в породах участка Сербиян (до 6,7 мас. Al_2O_3) не характерны как для кимберлитов Якутии, так и других провинций мира. Оценка петрохимических анализов кимберлитов и оливинных лампроитов мира показала, что содержание алюминия в неконтанированных и слабо измененных кимберлитовых породах колеблется в интервале 0,7—5,2 мас.% Al_2O_3 [13]. Учитывая высокую магнезиальность и соотношение CaO и Al_2O_3 в породах участка Сербиян, их следует относить к ультрамафическим лампрофирам (альнеитам, альпикритам, по классификации [6]), которые характеризуются присутствием фенокристов оливина, зонального флогопита, а в основной массе — первично-магматического мелилита, флогопита, шпинелидов, перовскита и др.

Mg-Al-тренд изменения петрохимического состава кимберлитов полностью определяется минеральным составом мантийного источника и общим литостатическим давлением, при котором частично плавилась порода верхней мантии.

На диаграмме (рис. 2) щелочно-ультраосновные породы, ассоциирующие с редкометалльными карбонатитами, образуют с алмазонасными и неалмазонасными кимберлитами из северных районов ЯАП единый генетический ряд или формационное семейство, которое характеризуется направленным изменением петрохимических параметров. При этом крайние члены этого ряда — алмазонасные кимберлиты центральных районов ЯАП и пикрит-альнеитовые породы карбонатитовых комплексов — четко различаются по целому ряду параметров, в то время как неалмазонасные кимберлиты севера ЯАП занимают промежуточное положение и имеют значительные области перекрытия. Мелилит-флогопитовые породы дайки Сербиян-1 (альпикриты [6]) по соотношению алюминия и щелочей, магния и железа более сходны с породами пикрит-альнеитового семейства, ассоциирующих с редкометалльными карбонатитовыми комплексами (альпикриты [6]).

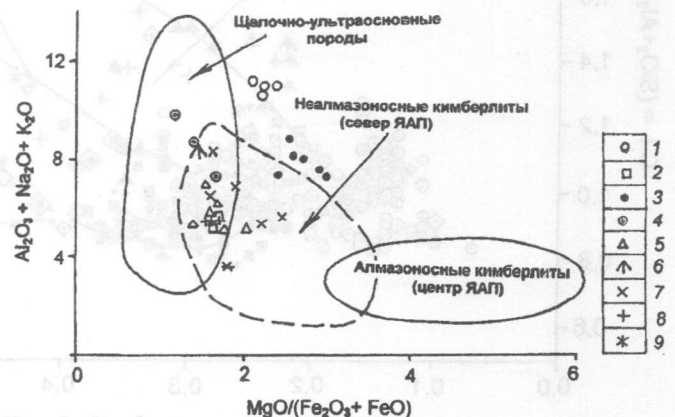


Рис. 2. Диаграмма $Al_2O_3+Na_2O+K_2O$ — $MgO/(Fe_2O_3+FeO)$ для кимберлитов и родственных им пород ЯАП; поля выделены по [6]. 1—3 — дайки участка Сербиян: 1 — Сербиян-1, 2 — Сербиян-2, 3 — Сербиян-4; 4—9 — кимберлитовые породы: 4 — Нижне-Куонамского поля, 5, 6 — Средне-Куонамского поля (6 — дайка Рудный Двор), 7—9 — Лучаканское поле (трубки 7 — Тройное, 8 — Лыхчан-І, 9 — Поздняя)

Особенности распределения элементов-примесей в кимберлитах и родственных им породах ЯАП представлены в виде спектров значений, нормализованных по примитивной мантии [10] (рис. 3). Для сравнения приведены данные по кимберлитам ААП. По геохимическому составу высокомагнезиальные породы трубки Айхал, кимберлиты Мало-Ботуобинского и Далдынского полей являются классическими кимберлитами ЯАП. Составы пород на петрохимических диаграммах образуют достаточно компактное поле, характерное для базальтоидных типов кимберлитов. Сопоставляя спектры распределения элементов-примесей в кимберлитах Куонамского поля и центральных районов, следует отметить основные различия в накоплении элементов Zr, Hf, Ti и REE, находящиеся в правой части диаграммы.

мированными в результате субдукции: породы обогащены низкозарядными элементами (Cs, Rb, Ba, K) и имеют отчетливые отрицательные аномалии высокозарядных элементов (Th, U, Nb) [2]. Отметим, что меньшее обогащение редкими элементами (в 2–10 раз) — одна из геохимических особенностей кимберлитов данной трубки, что сближает их с таковыми Золотицкого поля ААП (рис. 3).

Возможный источник (породы верхней мантии) кимберлитовых расплавов в данном районе максимально истощен Th, U, REE, Nb, Ta и другими элементами, на что указывают спектры нормализованных по примитивной мантии содержаний несовместимых элементов-примесей кимберлитов трубки Нюрбинская. Выплавление магм базальтокоматиитовой серии на ранних стадиях развития

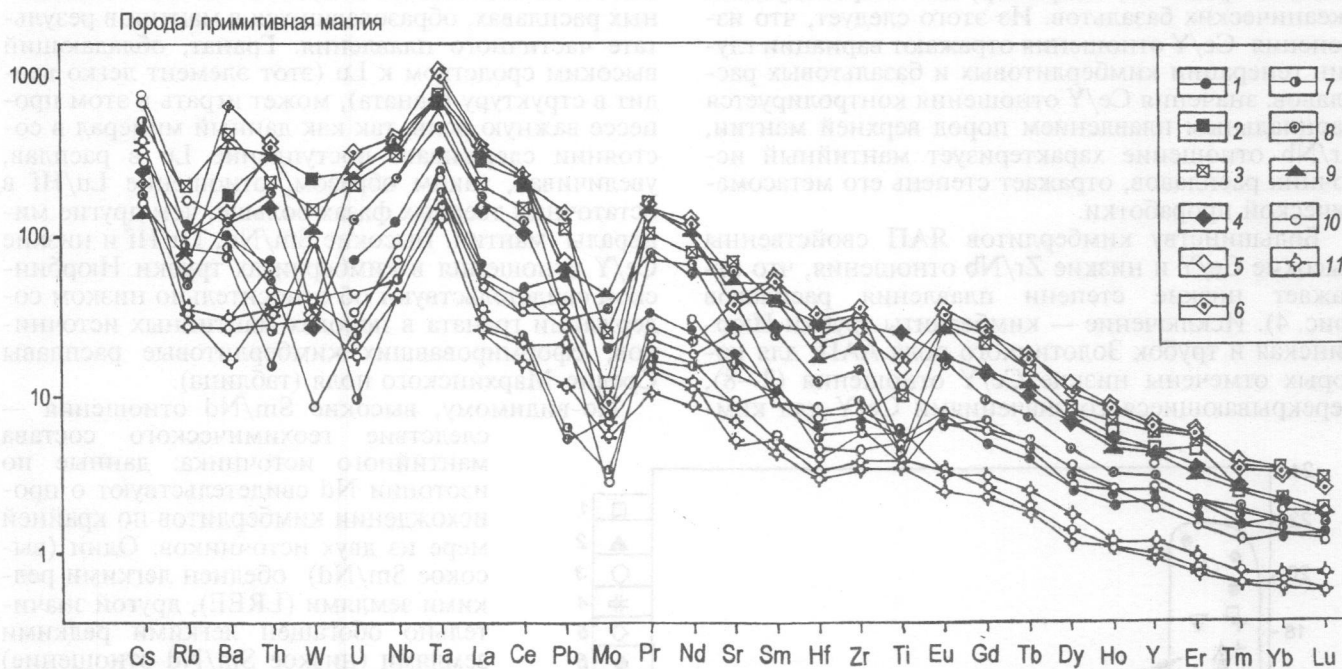


Рис. 3. Нормализованные по примитивной мантии [10] содержания несовместимых элементов-примесей в кимберлитах ЯАП: 1, 2 — трубки: 1 — Мир; 2 — Базовая-3; 3 — участок Сербия; 4 — трубка Арктика; 5 — дайка Лось; 6–11 — трубки: 6 — Лыхчан-I; 7 — Нюрбинская; 8 — Интернациональная; 9 — Айхал; 10 — им. В. Гриба (ААП); 11 — Пионерская (ААП)

Особенно контрастно различие между кимберлитами трубки Нюрбинская и кимберлитами тел из других полей ЯАП (рис. 3). Кимберлит трубки Нюрбинской характеризуется отсутствием в спектре «горба» в области наиболее несовместимых элементов за счет значительных минимумов содержания Th, U, La, Ce, а также низкой степени фракционирования REE (редких земель), что придает спектру более прямолинейную форму. У других кимберлитов четко проявлено накопление элементов в левой части спектра. В целом тип спектра элементов-примесей кимберлита трубки Нюрбинской свидетельствует о мантийном источнике, истощенном относительно высокозарядными элементами — Th, U, Nb. Отмечаются также минимумы количеств Ti и Hf. Заметно повышена концентрация Rb, минимум которой в отличие от других кимберлитов центральных полей ЯАП не отмечен. По распределению элементов-примесей породы трубки Нюрбинская сходны с вулканитами, сфор-

Земли привело к значительной экстракции высокозарядных элементов (HFS) и высокой степени истощенности пород верхней мантии под Сибирской платформой в этом районе.

При этом процессы метасоматического обогащения истощенных пород носили избирательный характер и обусловлены в основном привнесением крупнокатионных литофильных элементов, таких как K, Rb, Cs. Наблюдаемое избирательное обогащение этими элементами кимберлитовых пород трубки Нюрбинской свидетельствует о наиболее глубокой генерации кимберлитовых расплавов для этой трубки, существовании в этом районе предположительно мощного «холодного» клина сублитосферной мантии.

Пониженные Ce/Y и повышенные Zr/Nb отношения в породах островодужных океанических базальтов (OIB) указывают на повышенные степени плавления верхнемантийных пород источника базальтов [12]. Расплавы, образованные в результате

низких степеней плавления мантийных пород, характеризуются высокими Ce/Y и низкими Zr/Nb отношениями, что типично для многих кимберлитов Якутии (рис. 4). Для сравнения на диаграмму нанесены поля составов базальтов океанических Гавайских островов (ОИВ) [12].

При этом вариации Ce/Y отношения могут отражать особенность минерального состава пород источника: увеличение содержания граната в источнике способствует более высоким значениям этого отношения, так как поступление Y в расплав будет сдерживаться большим количеством граната, который легко удерживает Y в кристаллической структуре (широко известны искусственно полученные в 60—70-х гг. XX в. Y -гранаты). Наоборот, низкие значения Ce/Y отношения можно наблюдать в породах, мантийный источник которых был обеднен гранатом, например, для островодужных океанических базальтов. Из этого следует, что изменения Ce/Y отношения отражают вариации глубин генерации кимберлитовых и базальтовых расплавов: значения Ce/Y отношения контролируется парциальным плавлением пород верхней мантии, Zr/Nb отношение характеризует мантийный источник расплавов, отражает степень его метасоматической проработки.

Большинству кимберлитов ЯАП свойственны высокие Ce/Y и низкие Zr/Nb отношения, что отражает низкие степени плавления расплавов (рис. 4). Исключение — кимберлиты трубки Нюрбинская и трубок Золотицкого поля ААП, для которых отмечены низкие Ce/Y отношения (2—8), перекрывающиеся со значениями Ce/Y для ким-

берлитов трубки Нюрбинская 3,3—3,6, и повышенные Zr/Nb отношения при низкой концентрации этих элементов в кимберлитах. Исходя из вышесказанного, можно предположить, что источником кимберлитовых расплавов для данных трубок стали породы верхней мантии с низкими количествами граната, возможно, перидотиты (гарцбургиты) с высокохромистыми шпинелидами. Данный вывод подтверждается присутствием включений исключительно высокохромистых шпинелидов в алмазах из трубки Нюрбинская [8].

Анализ коэффициентов распределения Sm , Nd , Lu , Hf , Y , Ce в глубинных минералах показал, что основной минерал, контролирующий распределение этих элементов между расплавом и твердыми остаточными фазами, — гранат. Геохимические свойства Lu и Hf подобны таковым Sm и Nd , так как Hf накапливается относительно Lu в силикатных расплавах, образовавшихся в мантии в результате частичного плавления. Гранат, обладающий высоким сродством к Lu (этот элемент легко входит в структуру граната), может играть в этом процессе важную роль, так как данный минерал в состоянии сдерживать поступление Lu в расплав, увеличивая, таким образом, отношение Lu/Hf в остаточных твердых фазах больше, чем другие минералы мантии. Высокие Sm/Nd , Lu/Hf и низкие Ce/Y отношения в кимберлитах трубки Нюрбинской свидетельствуют об относительно низком содержании граната в породах мантийных источников, сформировавших кимберлитовые расплавы Средне-Мархинского поля (таблица).

По-видимому, высокие Sm/Nd отношения — следствие геохимического состава мантийного источника: данные по изотопии Nd свидетельствуют о происхождении кимберлитов по крайней мере из двух источников. Один (высокое Sm/Nd) обеднен легкими редкими землями (LREE), другой значительно обогащен легкими редкими землями (низкое Sm/Nd отношение) относительно примитивного мантийного вещества [5].

Типичная черта кимберлита трубки Нюрбинская — близость его минерального состава, геохимических признаков к таковым для кимберлитов группы II из Южной Африки: отношение Zr/Nb 2,2—2,6, соответствующее значениям кимберлитов II группы из Южной Африки и лампритов Западной Австралии; высокие Ba/Nb , Rb/Nb , Ba/Th , Ba/La , Pb/U , Th/U , Rb/Sr отношения; повышенная концентрация крупнокатионных низкозарядных (LFS) элементов (K , Rb , Cs); отсутствие высокомагнезильного ильменита; преобладание в основной массе зонального флогопита.

Отличительная черта кимберлитов данной трубки также резкая обедненность легкими редкими землями, не свойственная кимберлитам группы II, при сопоставимых с другими изученными кимберлитами Якутии содер-

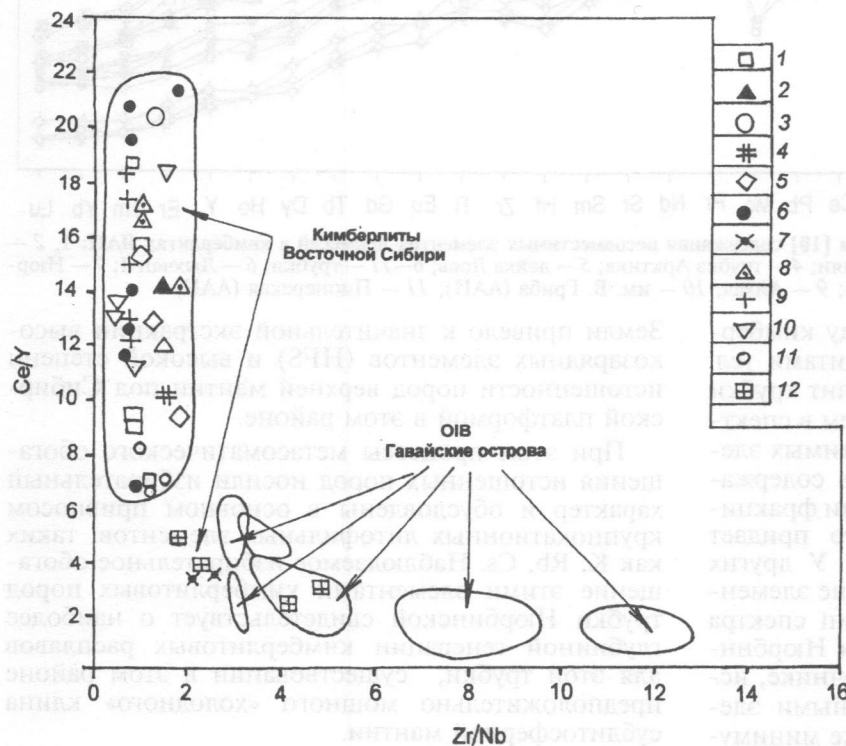


Рис. 4. Ce/Y - Zr/Nb -диаграмма для кимберлитов ЯАП и ААП; области базальтов океанических островов (ОИВ) по [12]; 1 — Мало-Ботубинский район; 2 — район Вава (Канада); 3 — Харамайское поле; 4 — Верхне-Куонамское поле; 5 — Куонамский район; 6 — Алакит-Мархинское поле; 7 — Накынское поле; 8 — Верхне-Мунский район; 9 — Далдынское поле; 10 — Нижне-Оленекский район; 11 — Верхотинское поле ААП; 12 — Золотицкое поле ААП

Главные соотношения элементов-примесей в кимберлитах, лампроитах и лампрофирах мира, ЯАП и ААП

Порода	Кимберлиты							Лампроиты и лампрофиры			
	Группа I Ю.Африки	Группа II Ю.Африки	Кальцитовые	Конду (Сьера-Леоне)	Конду альбитовые (Сьера-Леоне)	Арис (Австралия)	Кунделунгу (Занр)	Трес-Ранчос (Бразилия)	Оливиновые лампроиты	Айликиты (лампрофиры)	Бау-Хилл (лампрофиры)
Zr/Nb	0,9	2,1	1,4	0,6	0,8	0,2	0,6	1,0	5,0	3,7	1,1
Nb/La	1,8	0,7	1,3	1,4	1,7	1,7	1,8	0,8	0,8	0,9	1,3
Ba/Rb	26	19	32	24	40	12	31	35	20	26	9
Nb/U	42	25	38	62	52	100	64	—	95	36	83
	Трубка Мир	Трубка Интернациональная	Трубка Ньюбинская	Трубка Айхал	Трубка Удальная	Трубка Новинка	Кимберлиты Куоамского района	Дайка участка Сербиян	Трубка Базовая-3	Трубка Обнаженная	
Zr/Nb	1,0-1,2	0,8	2,2-2,6	0,8-0,9	0,7-0,8	1,0	1,0-1,9	1,6	1,4	0,5-0,9	
Nb/La	1,8-1,9	1,6	1,7-1,9	1,2-1,3	1,7-2,0	1,5	1,1-1,5	1,6	1,2	1,3-1,9	
Ba/Rb	10,0-13,8	39,9	8,4-10,3	53,7-58,2	10,0-22,9	-	13,6-18,4	24,5	19,1	6,0-10,3	
Nb/U	55	36-58	76-148	53-70	60	58-63	40-60	50	47	67	
Th/U	3,79	4,98	4,67-6,68	4,56-6,62	4,4	5,20-5,81	4,30-5,44	4,10	5,24	5,8	
Th/Pb	0,6-0,7	2,1	1,6-2,2	1,0-2,7	1,1-1,5	4,2-5,8	1,4-2,7	1,1	5,7	2,5	
U/Pb	0,16	0,43-0,58	0,24-0,48	0,22-0,53	0,33	0,72-1,11	0,33-0,56	0,26	1,08	0,43	
Rb/Sr	0,06-0,08	0,04	0,15-0,40	0,03-0,08	0,05-0,08	0,11	0,08-0,12	0,09	0,06	0,03-0,17	
La/Yb	73	192	24-26	238-247	132-176	170-175	106-168	90	200	131-177	
Ce/Sr	0,22-0,23	0,35	0,11-0,22	0,38-0,44	0,19-0,30	0,28	0,35-0,51	0,19	0,35	0,26-0,32	
Ce/Y	7,1-9,0	18,7	3,3-3,6	19,6-20,7	12,2-17,3	16,5-17,1	9,5-15,3	10,2	20,3	12,9-13,5	
Lu/Hf	0,05	0,03	0,04-0,06	0,03-0,04	0,03-0,04	0,02	0,02-0,03	0,03	0,02	0,04-0,06	
Ba/Th	37-52	40	273-399	68-94	46-72	38	33-66	168	45	32	
Rb/Nb	0,26-0,35	0,14	1,75-2,01	0,12-0,15	0,18-0,56	0,47	0,19-0,39	0,56	0,26	0,16-0,46	
Ba/La	5,0-8,4	8,7	30,5-33,1	8,3-11,0	6,8-8,3	5,0	3,9-7,9	21,7	6,2	5,5	
Sm/Nd	0,15	0,16	0,20-0,21	0,13-0,14	0,13-0,16	0,14	0,13-0,14	0,16	0,15	0,14-0,15	
Ba/Nb	2,6-4,8	5,5	16,8-18	4,5-6,4	4,1-4,9	3,4	3,5-5,3	13,8	5,0	2,8	
	Дайка Монти-челлиговая	Дайка Великан	Среднее для базальтоидных кимберлитов Якутии	Трубка им. В. Гриба (ААП)	Трубка Плонерская (ААП)	Каринского-1, им. Ломоносова (ААП)	PM	NIMU OIB	EMI OIB	EMII OIB	
Zr/Nb	0,9	0,8-1,6	0,9	1,1-1,6	1,8-2,4	4,2-4,9	16	3,2-5,0	4,2-11,5	4,5-7,3	
Nb/La	1,6	0,6	1,8	1,6-1,9	1,0-1,6	0,8-0,9	1	1,3-1,5	0,8-1,2	0,9-1,1	
Ba/Rb	23,4-32,4	17,2-24,8		5,5-10,7	8,2-18,8	19,8-25,6	11,0	—	—	—	
Nb/U	65	19-25		54-75	40-104	36-45	32	—	—	—	
Th/U	5,75-5,82	6,24		4,57-6,11	5,29-7,64	5,50-8,00	3,92	—	—	—	
Th/Pb	2,5	3,1		0,9-1,3	0,7-1,1	0,7	0,5	—	—	—	
U/Pb	0,44	0,49		0,15-0,22	0,14-0,15	0,13	0,14	—	—	—	
Rb/Sr	0,02-0,06	0,03		0,11-0,21	0,13	0,08-0,12	0,03	—	—	—	
La/Yb	116	154	180	56-90	47-67	24-31	1	—	—	—	
Ce/Sr	0,27	0,18	0,30	0,20-0,36	0,09-0,21	0,21-0,23	0,08	—	—	—	
Ce/Y	11,2	18,4		6,6-8,2	3,9-8,7	2,5-3,0	0,39	—	—	—	
Lu/Hf	0,03	0,05	0,03	0,04-0,05	0,05-0,06	0,03-0,05	0,24	—	—	—	
Ba/Th	66	38-61		35-77	145-186	104-117	77	49-77	103-154	67-84	
Rb/Nb	0,25	0,22-0,63		0,53-0,59	1,03-1,68	0,7-0,9	0,91	0,35-0,38	0,88-1,17	0,59-0,85	
Ba/La	9,6	20,0		5,7-10,9	18,5-21,5	15,1-17,2	9,6	6,8-8,7	13,2-16,9	8,3-11,3	
Sm/Nd	0,15	0,16	0,14	0,14-0,16	0,11-0,17	0,10-0,16	0,32	—	—	—	
Ba/Nb	3,6-5,8	3,8-6,5	5,1	2,9-6,3	13,7-19,4	17,7-18,5	9,0	4,9-6,9	11,4-17,8	7,3-13,3	

Примечание. Данные по кимберлитам, лампроитам и лампрофирам мира по [11, 13], резервуарам [10]. Среднее по кимберлитам Якутии [8]. PM — примитивная мантия; NIMU — мантийный резервуар с повышенным содержанием U и Th относительно Rb, высокими содержаниями изотопов Rb и низкими отношениями изотопов Sr; EMI — обогащенная мантия первого типа с низкими значениями изотопов стронция; EMII — второго типа с высокими значениями изотопов стронция.

жаниях тяжелых редких земель, близких к хондритовым; низкая степень фракционирования REE (La/Yb 16,4–18,0); Nb/La и Ce/Sr отношения, типичные для кимберлитов группы I из Южной Африки. Все эти выделенные геохимические особенности резко отличают трубку Нюрбинская от других кимберлитовых тел ЯАП.

Таким образом, низкий выход минералов тяжелой фракции, преобладание хромшпинелидов, отсутствие пикроильменита, уровень накопления элементов-примесей и их соотношения в кимберлитах трубки Нюрбинская Накынского поля ЯАП и Золотицкого поля ААП (Mg-Al-тренд) указывают на сходство строения субконтинентальной литосферной мантии под кратонами Сибирской и Русской платформ, а также на близость минералогических и геохимических характеристик мантийных источников кимберлитовых расплавов, сформировавших данные кимберлитовые тела. Предполагаемый источник кимберлитовых расплавов — слабообогатенная мантия ЕМІ типа (кимберлиты и родственные им породы Сибирской и Русской платформ вместе с лампроитами Северной Америки и Центрального Алдана образуют Лавразийскую группу [1, 2]), в отличие от кимберлитов группы II Южной Африки и лампроитов Западной Австралии, для которых устанавлен источник — обогатенная мантия ЕМІІ типа (Гондванская группа [1, 2]). Различие источников кимберлитов и лампроитов северных и южных континентов отражает геохимическую гетерогенность мантии.

Выводы

1. Все многообразие петрохимических составов кимберлитов ЯАП позволяет выделить два основных ряда (тренда), начинающихся от высокомагнезиальных пород трубки Айхал: 1) железо-титанистый, промежуточными членами которого являются большинство кимберлитов центральных районов ЯАП, конечными (с высокими содержаниями

Fe и Ti) — слобоалмазоносные и неалмазоносные кимберлиты Куонамского поля со значительной оксидной минерализацией; 2) магнезиально-глиноземистый (Mg-Al) ряд (тренд) (кимберлиты трубки Нюрбинской, Харамайского поля).

2. Высокоглиноземистые породы повышенной щелочности участка Сербиян отнесены к лампрофирам, а даек Сербиян-1 и -4 — к альпикритам (щелочно-ультраосновной ряд).

3. Показано, что большинство изученных кимберлитов ЯАП по соотношению главных петрогенных элементов (MgO/CaO, TiO₂/K₂O, MgO/FeO, сумме щелочей), а также соотношению элементов-примесей (Zr/Nb < 2, Nb/La 1,3–2,3 и Ce/Sr 0,04–0,3 и другим элементам) типичные представители базальтоидной разновидности. Отмечем высокий уровень накопления элементов-примесей в кимберлитах Куонамского поля. По Sm-Nd изотопным данным мантийный источник большинства тел ЯАП отвечает участкам наиболее изотопно-примитивной гомогенной мантии. По этим характеристикам большинство кимберлитовых тел ЯАП близки кимберлитам группы I из Южной Африки.

4. Набор минералов тяжелой фракции, уровень накопления элементов-примесей и их соотношения в кимберлитах трубки Нюрбинская Накынского поля ЯАП и Золотицкого поля ААП (Mg-Al серия) указывают на схожие черты строения субконтинентальной литосферной мантии под кратонами Сибирской и Русской платформ в рассматриваемых районах, а также на близость минералогических и геохимических характеристик мантийных источников кимберлитовых расплавов, сформировавших данные алмазоносные кимберлитовые тела. Предполагается, что породы источника для данных тел обеднены гранатом и представлены истощенными и изолированными от конвектирующей астеносферной мантии гарцбургитами. Допускается участие в образовании кимберлитовых расплавов древнего слабообогатенного LFS элементами мантийного источника ЕМІ типа.

ЛИТЕРАТУРА

1. Агашев Л.М., Орихаша Ю., Ватанабе Т. Изотопно-геохимическая характеристика кимберлитов Сибирской платформы в связи с проблемой их происхождения // Геология и геофизика. 2000. Т. 41. № 1. С. 90–99.
2. Богатиков О.А., Кононова В.А., Первов В.А., Журавлев Д.З. Источники, геодинамическая обстановка образования и перспективы алмазоносности кимберлитов северной окраины Русской плиты: Sr-Nd изотопия и ICP-MS геохимия // Петрология. 2001. Т.9. № 3. С. 227–241.
3. Гаранин В.К., Кудрявцева Г.П., Посухова Т.В., Вержак В.В., Веричев Е.М., Гаранин К.В. Два типа алмазоносных кимберлитов Архангельской провинции // Изв. вузов. Геология и разведка. 2001. № 4. С. 36–50.
4. Горнова М.А., Соловьева Л.В., Егоров К.Н., Пиказун О.В., Сандимирова Г.П. Геохимия пород и минералов в ксенолитах зернистых перидотитов из трубки Удачная // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Изд-во ВГУ, 2003. С. 142–146.
5. Кимберлиты и кимберлитоподобные породы: Кимберлиты — ультраосновная формация древних платформ / Под ред. Б.М. Владимирова. Новосибирск: Наука, 1990. 264 с.
6. Лапин А.В. О кимберлитах Чадобецкого поднятия в связи с проблемой формационно-металлогенического анализа платформенных щелочных-ультраосновных магматитов // Отечественная геолог. 2001. № 4. С. 30–35.
7. Мингазов Д.Т. Первые находки палеозойских кимберлитов в центральной части Анабарского щита // Докл. РАН. 1996. Т. 347. № 1. С. 72–76.
8. Agashev A.M., Watanabe T., Bydaev D.A. et al. Geochemistry of kimberlites from the Nakyn field, Siberia: Evidence for unique source composition // Geology. 2001. V.29. N 3. P. 267–270.
9. Clement C.R. A comparative geological study of some major kimberlite pipes in the northern Cape and Orange Free State // PhD thesis. Univ. Cape Town, 1982. 250 p.
10. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // Chem. Geol. 1995. V.120. P. 223–253.
11. Nowell G.M., Kempton P.D., Pearson D.G. Trace element and isotope geochemistry of Siberian kimberlites // 7th Inter. Kimb. Conf. CapeTown, 1998. P. 631–633.
12. Pauline L.S. Trace Element and isotopic variations in Scottish and Irish Dinantian volcanism: evidence for an OIB line mantle source // J. Petrology. 1988. V. 29. P. 413–443.
13. Taylor W.R., Tompkins L.A., Haggerty S.E. Comparative geochemistry of West African kimberlites: Evidence for a micaceous kimberlite endmember of sublithospheric origin // Geochim. Cosmochim. Acta. 1994. V. 58. N 19. P. 4017–4037.

Московский государственный университет
Рецензент — А.А. Маракушев