

**НИЗКОТИТАНИСТЫЕ АЛМАЗОНОСНЫЕ КИМБЕРЛИТЫ — НОВЫЙ ПЕТРОГЕОХИМИЧЕСКИЙ ТИП
СРАВНЕНИЕ НАКЫНСКИХ (ЯКУТИЯ) И ЗОЛОТИЦКИХ (АРХАНГЕЛЬСКАЯ ОБЛАСТЬ)
РАЗНОВИДНОСТЕЙ**

Проведенные на единой методологической основе, в одних и тех же лабораториях прецизионные исследования (ICP-MS анализ, изотопия Sr-Nd-Pb) позволяют обоснованно утверждать наличие сходства между кимберлитами Накынского (Якутия) и Золотицкого (Архангельская область) полей. На основании полученных результатов кимберлиты данных полей классифицированы как новый петрогеохимический тип кимберлитов с пониженным содержанием титана (<1 мас.%), высокозарядных (Nb, Zr, Ta, Hf, Th и U) и легких редкоземельных элементов по сравнению с остальными кимберлитами Якутии и Архангельской области. Их изотопный состав свидетельствует об участии в мантийном источнике кимберлитов обогащенной литосферной мантии EMI-типа. Судя по характеру распределения редких элементов, выплавление исходных для данных кимберлитов расплавов предвзялось метасоматозом мантии под влиянием флюидов, в составе которых было вещество нижней коры.

The precise measurement, that was carried out on the united methodological base (ICP-MS, determination of Pb, Nd, and Sr isotopic ratios), allow us to confirm the similarities between kimberlites of Nakyn (Yakutia) and Zolotitsa (Archangelsk region) fields. Based on the obtained results, the kimberlites of this fields have been classified as new petrogeochemical type kimberlites. They have low contents of titanium (<1%), HFSE (Nb, Zr, Ta, Hf, Th and U) and LREE elements in contrast to other kimberlites of Yakutia and Archangelsk region. Based on the isotopic composition, the enriched lithosphere mantle of EMI-type has been involved into the kimberlite mantle sources. The distribution of rare elements could be connected with melting of the lithosphere that was preliminary metasomatised under the fluids, emanated from the blocks with lower crust substances.

Комплексное петрогеохимическое изучение кимберлитов современными прецизионными методами позволяет решать не только фундаментальные проблемы петрологии (расшифровка глубинного строения Земли и особенностей состава мантийных источников изверженных пород), но и ряд практически важных задач. Основная цель таких исследований — выявление связи между вещественным составом и алмазонасностью кимберлитов, что позволяет оптимизировать прогноз алмазонасных кимберлитов на перспективных территориях.

Одним из результатов этих исследований в последние десятилетия стало выделение новых типов кимберлитов на основе изотопных и петрогеохимических характеристик. Это значительно расширило представления об условиях формирования и эволюции источников кимберлитов и их магм. Так, в 1980-е годы К. Смитом и др. [21] были выделены две группы южноафриканских кимберлитов, позднее Р. Митчелл [17] предложил сохранить термин «кимберлит» только применительно к кимберлитам группы I, а кимберлиты группы II выделить под названием «оранжиты». Помимо

этих двух типов к настоящему времени выделены еще два — Коиду и Ариес [20]. Отчетливо выявилась геохимическая специфика кимберлитов Золотицкого поля (Архангельская область), позволяющая выделить особый «золотицкий» тип [3]. Открытие в Якутии нового Накынского кимберлитового поля сразу привлекло внимание в связи с высокой алмазонасностью двух обнаруженных в его пределах трубок — «Ботуобинской» и «Нюрбинской». Первые публикации [11 и др.] указывали на необычные минералогические и петрографические черты, отличающие кимберлиты Накынского поля от кимберлитов группы I, распространенных повсеместно на территории Якутской провинции. Н. П. Похиленко [18] показал значительное сходство кимберлитов Накынского поля с кимберлитами Снеп-Лейк (провинция Слейв, Канада). Детальные геохимические исследования (ICP-MS геохимия более чем 50 элементов, изотопия Sr, Nd, Pb), проведенные на единой методологической основе, в одних и тех же лабораториях, позволили на прецизионном уровне сопоставить вещественный состав кимберлитов Накынского и Золотицкого полей, установить их сходство и

классифицировать их как новый петрогеохимический тип низкотитанистых кимберлитов.

Характеристика объектов и методика исследования

При сопоставлении петрогеохимических, включая изотопные, особенностей кимберлитов Якутии и Архангельской области особое внимание было уделено уникальным алмазоносным кимберлитам Накынского и Золотицкого полей. Для сравнения привлечены опубликованные данные, в том числе нашего коллектива, по кимберлитам Якутии [2 и др.] и Архангельской области [3 и др.], в которых можно найти основные сведения о коллекциях изученных образцов и методике их исследования.

По особенностям состава, возрасту, пространственному и геолого-тектоническому положению 13 полей кимберлитов Якутской провинции [2] разделяются нами на три петрогеохимических типа (таблица). Свое название они получили по одному из индикаторных элементов — титану, а именно:

— низкотитанистые кимберлиты представлены в недавно открытом высокоалмазоносном Накын-

ском поле, приуроченном к южной части Анабарского геоблока. Некоторые из характерных для них особенностей: $TiO_2 < 1$ мас.%, HREE 0,8–2,1, Y 5–15, Zr 18–160, La 9,31–119,45 ppm. Именно этот тип кимберлитов далее будет рассмотрен детально;

— умереннотитанистые кимберлиты развиты в промышленно алмазоносных Мирнинском, Алаkitском, Далдынском и Верхнемунском полях, которые располагаются в Маганском геоблоке и на границе Мархинского и Далдынского террейнов Анабарского геоблока. Для них характерны TiO_2 1,0–2,5 мас.%, HREE 1,1–4,3, Y 6–31, Zr 51–458, La 29,98–226,16 ppm. В тексте за этой группой полей сохранено название «южные» (или кимберлиты юга);

— высокотитанистые кимберлиты доминируют среди так называемых «северных» полей (т. е. кимберлитов севера), приуроченных к Оленекскому геоблоку. Их индикаторные характеристики: $TiO_2 > 2,7$ мас. %, HREE 1,7–6,6, Y 11–45, Zr 119–690, La 49,15–152,19 ppm.

В пределах недавно открытого Накынского поля изучены образцы из трубок «Ботуобинская» (шесть образцов) и «Нюрбинская» (пять образцов). Они представлены порфиоровыми кимберлитами с мас-

ИНДИКАТОРНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ КИМБЕРЛИТОВ ЮЖНОЙ АФРИКИ, ЯКУТИИ И АРХАНГЕЛЬСКОЙ ОБЛАСТИ

Компоненты	Южная Африка		Якутия			Архангельская область	
	IA+IV	II	Высокотитанистые (северные)	Умереннотитанистые (южные)	Низкотитанистые (Накынского поля)	Кепинского поля	Золотицкого поля
TiO ₂	2,7	1,2	2,7–5,7	1,0–2,5	0,3–0,8	1,9–4,4	0,5–1,1
K ₂ O	1,06	3,76	0,04–3,9	0,2–2,3	0,1–2,6	0,4–1,6	2,1–5,1
mg#	71	78	63–76	66–81	75–85	68–78	77–81
V	116	103	110–280	77–158	40–90	129–291	63–98
Cr	1202	1589	590–1980	970–2190	670–1660	1850–2690	780–2090
Co	91	81	58–96	36–95	15–100	75–105	70–95
Ni	1170	1266	420–1820	720–2170	1090–2660	1120–1980	997–2375
Rb	57	157	0,5–2230	7–109	8–65	27–97	36–180
Sr	858	1125	260–1620	200–1990	140–810	191–825	456–685
Y	19,4	17,3	10,5–44,9	5,7–30,9	7,9–12,7	6,1–28,5	7,8–11,1
Zr	283	328	120–690	51–458	44–77	135–331	79–146
Nb	218	130	99–408	77–315	16–34	112–217	49–67
Ba	1024	2779	13–2720	100–2620	94–970	520–1510	440–2730
La	129	200	49–152	30–227	9–30	57–160	32–108
Ce	234	364	90–280	58–392	21–61	110–284	60–80
Pb	10	30	0,5–26	0,02–17	0,4–3,2	8,7–57,3	0,9–7,3
Th	27,8	29,7	6,8–21,1	4,6–38,6	1,3–1,9	8–19,4	3,8–6,6
U	6	5	1,6–4,7	0,7–10,2	0,8–1,0	2,4–16	0,7–1,4
εNd	От –1 до +5	От –12 до –4	От –0,6 до +5	От +0,3 до +5	От –3 до 2	От +0,6 до +3	От –2 до –6
εSr	От –20 до +5	От +40 до ~80	От –13 до +39	От –5 до +41	От +16 до +55	От –12 до +11	От –8 до +36

Примечание. TiO₂ и K₂O в мас.%, mg# — магнезиальность, элементы с V до U — в ppm. Данные по кимберлитам групп IA, IV и II Южной Африки даны по [21], Архангельской области по [1, 3, 16].

сивной текстурой, автолитовыми кимберлитовыми брекчиями и кимберлитовыми туфобрекчиями.

Трубка «Ботубинская». Образцы Б-16/4-210, Б-16/4-270, Б-16/4-350 представляют собой порфиновые кимберлиты (ПК). Породы плотные, зеленовато-серого цвета. Количество ксеногенного материала невелико (около 5 об. %). Среди ксенолитов — метаморфические породы фундамента, осадочные породы. Вкрапленники сложены серпентиновыми и карбонат-серпентиновыми псевдоморфозами по макрокристам оливина (7–10 мм) и флогопитом (3–4 мм). В основной массе — кальцит, хлорит и серпентин в различных соотношениях. Хлорит и серпентин образуют псевдоморфозы по оливину и флогопиту второй генерации.

Автолитовые кимберлитовые брекчии (АКБ) представлены одним образцом (Б-16/4-415) плотной породы темно-серого цвета брекчиевой текстуры. Среди обломков преобладают ксенолиты осадочных пород (карбонаты). Автолитовая текстура проявлена контрастно. Вкрапленники, варьирующие по размеру, представлены псевдоморфозами кальцита (в гораздо меньшей степени — серпентина) по оливину первой и второй генераций, флогопитом первой и второй генераций, неизменным или частично замещенным хлоритом. Образцы Б-5-89 и Б-5-101, отобранные с верхних горизонтов трубки, представляют собой кимберлитовые туфобрекчии (КТБ). Это рыхлые, слабощементированные породы серого цвета. Содержание ксенолитов в них выше, чем в АКБ, ксеногенный материал представлен осадочными породами (преимущественно известняками). Отмечаются псевдоморфозы серпентина по оливину обломочной формы первой и второй генераций. В основной массе породы — серпентин, кальцит и хлорит.

Трубка «Нюрбинская». Сложность изучения образцов из этой трубки связана с существенным контактно-метасоматическим воздействием трапповой интрузии, прорывающей трубку на глубине 280–300 м. В зоне контакта в АКБ наблюдаются новообразования хлорита, кальцита, магнетита и граната (шорломит, андрадит-гроссуляр), при этом АКБ практически полностью утрачивают присущие им брекчиевую текстуру и порфировую структуру (порода становится массивной) [11].

За исключением образца Н-32/222-440, представленного порфировым кимберлитом, большинство исследованных образцов (Н-24/7-240, Н-24/7-229, Н-24/7-167, Н-24/168-266) обладает характеристиками, которые позволяют отнести их к автолитовым кимберлитовым брекчиям, утратившим частично или полностью автолитовую текстуру в зависимости от удаления от зоны эндоконтакта с трапповой интрузией. Все изученные породы довольно плотные, зеленовато-серого цвета. Среди обломков — ксенолиты осадочных и метаморфических пород. Так же, как и в кимберлитах трубки «Ботубинская», вкрапленники сложены серпентиновыми и карбонат-серпентиновыми псевдоморфозами по оливину первой генерации,

имеющими иногда нечеткие границы, табличками флогопита (3–4 мм). В основной массе — кальцит, флогопит, хлорит и серпентин в разных соотношениях.

Подчеркнем, что при подготовке проб особое внимание уделялось очистке образца от включений ксеногенного материала.

Данные по возрасту трубок заимствованы из публикаций [3, 8, 14]. Необходимо отметить, что возраст для кимберлитов Накынского поля заметно колеблется: 450–380 млн лет (Ar-Ar и Rb-Sr определения [8]) и 364 млн лет [14]. Изотопные отношения для кимберлитов Накынского поля пересчитывались на 364 млн лет (общепринятый возраст).

Результаты исследования

Представлены только индикаторные характеристики (пределы колебаний отдельных элементов) кимберлитов Накынского и Золотицкого полей (таблица). Детальную информацию см. в работах [23, 6, 10]. В таблице приведены данные по кимберлитам групп IB, IA и II Южной Африки по [21], а также кимберлитам Якутии [2] и Кепинского и Золотицкого полей Архангельской области [3]. Рассмотрим распределение породообразующих и редких элементов в кимберлитах Накынского и Золотицкого полей и сравним их с общими геохимическими закономерностями для кимберлитов Якутии и Архангельской области.

Породообразующие компоненты. Петрохимия кимберлитов Якутии и Архангельской области изучена достаточно подробно и представлена в ряде обобщающих публикаций [1, 4, 9, 12, 16 и др.]. Остановимся на различиях в содержании калия и титана. На диаграмме TiO₂–K₂O (рис. 1) большинство кимберлитов Якутии и кимберлиты Кепинского поля Архангельской области имеют сходные содержания с кимберлитами групп IA и IB и лишь единичные образцы кимберлитов северных полей могут быть отнесены к оливиновым лампроитам. Однако проведенные нами исследования слюд и перовскитов из этих образцов [7], а также тренд, выделенный Р. Митчеллом и К. Смитом [17, 21] (рис. 1), позволяют отнести их к кимберлитам группы I. Отчетливо видны различия кимберлитов юга и севера Якутии, проявляющиеся в больших вариациях содержания титана и калия в северных кимберлитах, в то время как южные кимберлиты располагаются полностью в средней части диаграммы — поле кимберлитов группы IA. Кимберлиты Кепинского поля располагаются на границе умеренно- и высокотитанистых кимберлитов Якутии и соответственно попадают в поля кимберлитов групп IA–IB Южной Африки (рис. 1, таблица).

Обращают на себя внимание образцы кимберлитов Накынского и Золотицкого полей, которые тяготеют к нижней границе поля кимберлитов и располагаются вдоль тренда, выделенного Р. Митчеллом [17] для оранжитов (термин, предложен-

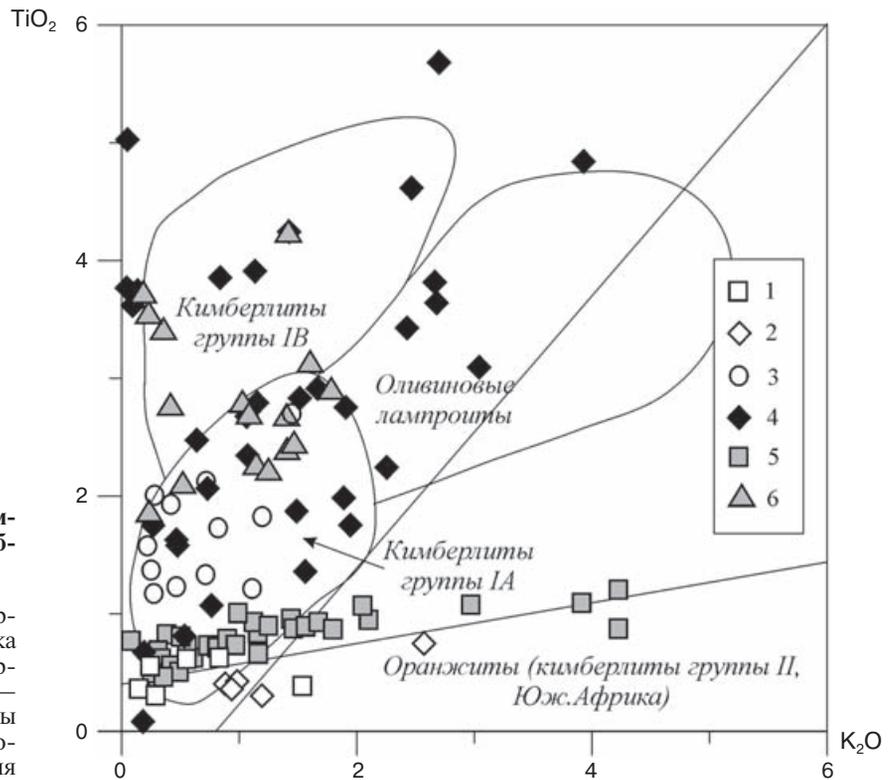


Рис. 1. Содержания TiO_2 и K_2O в кимберлитах Якутии и Архангельской области. Границы полей по [1–3]

Кимберлиты Якутии: 1–2 — кимберлиты Накынского поля (1 — трубка «Ботуобинская», 2 — трубка «Нюрбинская»); 3 — кимберлиты юга; 4 — кимберлиты севера. Кимберлиты Архангельской области: 5 — Золотицкого поля; 6 — Кепинского поля

ный Р. Митчеллом вместо кимберлитов группы II Южной Африки). Детальные исследования минерального состава данных кимберлитов [3, 7] не обнаружили признаков, присущих оранжевитам. Кроме того, в данных породах отсутствуют характерные для оранжевитов К-Ва титанаты, циркониевые силикаты и др.

Среди других особенностей можно отметить повышенную магнезиальность $mg\# = 100 Mg/(Mg+Fe_{общ})$ кимберлитов Накынского и Золотицкого полей по сравнению с высоко- и умеренно-титанистыми кимберлитами Якутии и кимберлитами Кепинского поля Архангельской области (таблица).

Редкоземельные элементы. Основные различия в содержании редкоземельных элементов в разных полях Якутии и Архангельской области подробно описаны в наших публикациях [4, 7]. Отмечено значительное сходство в содержаниях редкоземельных элементов в кимберлитах Накынского и Золотицкого полей [5]. Предыдущие исследования позволили установить следующие характеристики низкотитанистых кимберлитов:

1) кимберлиты Накынского и Золотицкого полей обладают пониженными содержаниями легких редкоземельных элементов по сравнению с остальными кимберлитами Якутии и Архангельской области (таблица);

2) содержания тяжелых редкоземельных элементов в низкотитанистых кимберлитах более устойчивы по сравнению с легкими и колеблются от 1,3 до 2,0 ppm (рис. 2, 3).

Алмазоносные кимберлиты полей юга Якутии обладают значительным разбросом в области легких редкоземельных элементов, при этом концентрации тяжелых редкоземельных элементов довольно устойчивые, а их колебания находятся в пределах колебаний кимберлитов Накынского поля (таблица, рис. 3, а). В кимберлитах северных полей Якутии содержания редкоземельных элементов более высокие; при этом кимберлиты СВ и СЗ полей отличаются друг от друга: СВ поля кимберлитов обладают высокой неоднородностью, проявляющейся в высоких колебаниях HREE (1,1–6,6 ppm). Кимберлиты Кепинского поля (рис. 3, б) характеризуются более высокими содержаниями легких редкоземельных элементов (таблица) и большим разбросом HREE (1,1–4,2 ppm) по сравнению с кимберлитами Золотицкого поля.

Высокочарядные элементы (Nb, Ta, Zr, Hf и др.). Содержания HFSE варьирует в кимберлитах юга и севера Якутии, а также в кимберлитах Кепинского поля Архангельской области (таблица, рис. 2, 3). При этом отдельные трубки в пределах поля часто показывают разную степень обогащения несовместимыми элементами. Среди нашей коллекции кимберлитов Якутии особенно сильная неоднородность по содержанию HFSE проявлена среди северных полей Якутии. На рис. 2 видно возрастание содержаний Zr при переходе от низко- к высокотитанистым разностям пород. Однако данная закономерность нарушается при рассмотрении, например, кимберлитов Мирнинского поля (Якутия) [2]. Неоднократно было отмечено

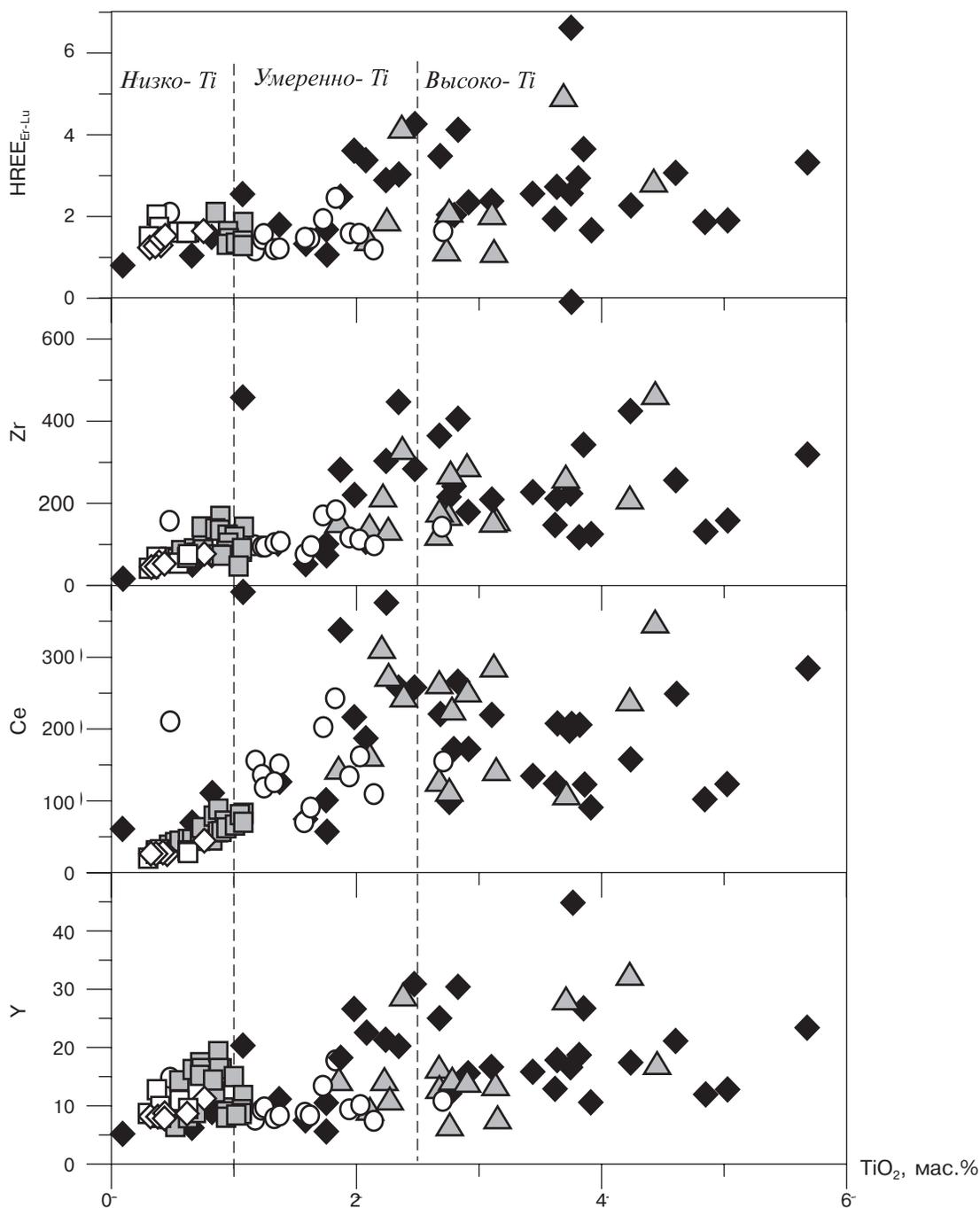


Рис. 2. Содержания TiO_2 (вес. %) и Y, Ce, Zr, HREE (ppm) в кимберлитах Якутии и Архангельской области. Усл. обозн. см. на рис. 1

[9 и др.], что низкотитанистые кимберлиты трубки «Интернациональная» обогащены гораздо сильнее несовместимыми элементами по сравнению со среднетитанистыми кимберлитами трубки «Мир».

Одной из главных характеристик низкотитанистых кимберлитов является пониженное содержание HFSE. На графиках распределения редких элементов (рис. 3) отчетливо видны минимумы

HFSE, которые образуют кимберлиты Накынско-го и Золотицкого полей. Одним из объяснений подобного поведения HFSE является предположение о выплавлении кимберлитовых расплавов из литосферы, предварительно метасоматизированной под влиянием флюидов, которые могли поступать из древних блоков субдуцированной литосферы.

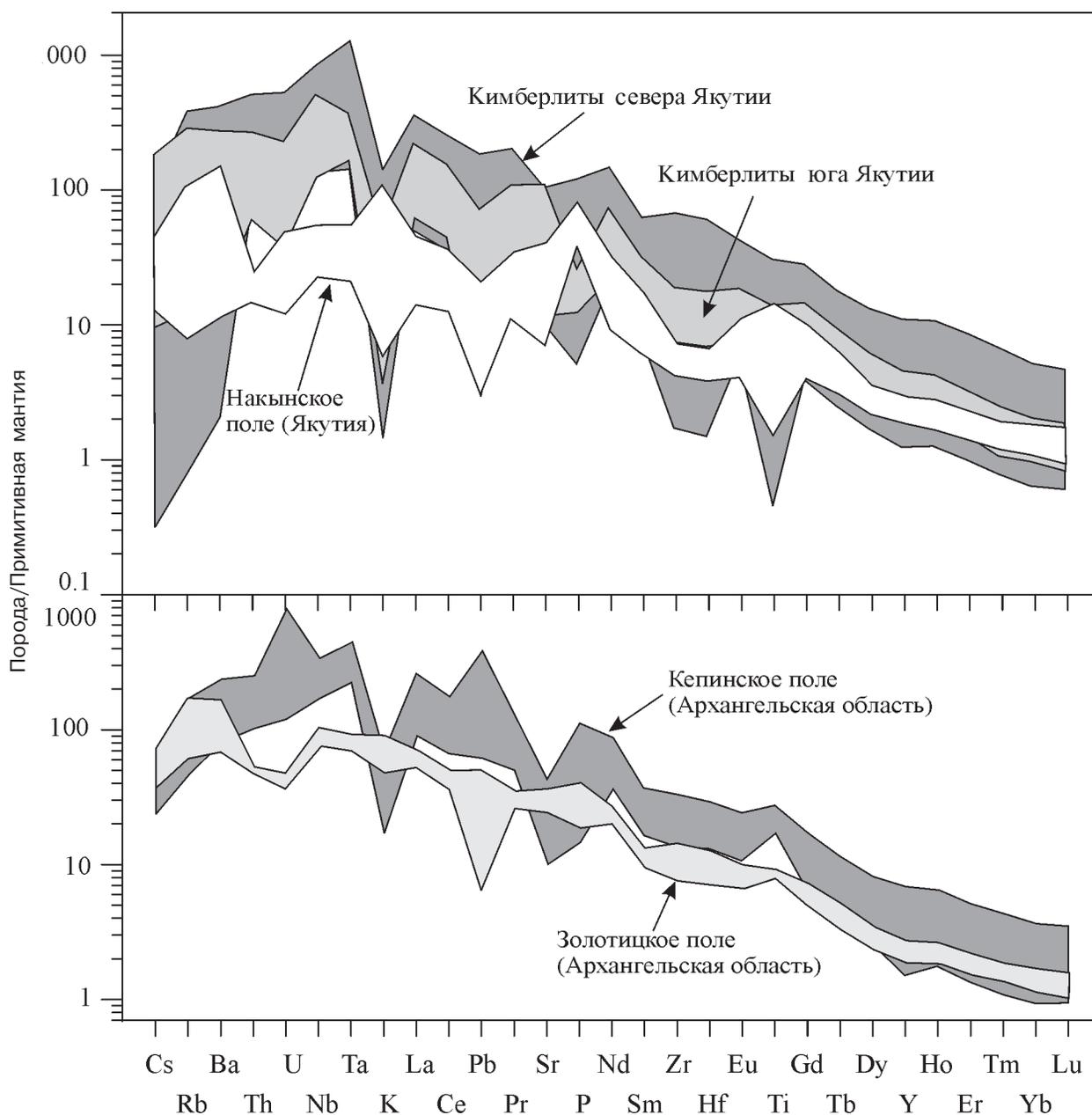


Рис. 3. Распределение редких элементов в кимберлитах *а* — Якутии, *б* — Архангельской области

Данные для примитивной мантии по [19]

Sr и *Nd* изотопные системы. Судя по нашим данным [2, 3, 6, 12] и данным, полученным другими исследователями, мантийный источник большинства кимберлитов севера и юга Якутии, а также Кепинского поля Архангельской области расположен в области деплетированной мантии (рис. 4), частично перекрываясь с данными по кимберлитам группы I Южной Африки. От кимберлитов группы I Южной Африки кимберлиты Якутии отличаются повышенными значениями ϵ_{Sr} , что, возможно, связано с процессами контаминации кимберлитов. При этом наиболее высокими значениями ϵ_{Sr} обладают кимберлиты На-

кынского поля (таблица, рис. 4). Подчеркнем, что порфиновые кимберлиты (обр. Н-32/222-440) имеют минимальные (для образца трубки «Нюрбинская») значения $\epsilon_{Sr} = +16$. Для кимберлитов Архангельской провинции характерен меньший разброс значений ϵ_{Sr} (таблица, рис. 4).

Пределы колебаний ϵ_{Nd} в кимберлитах Золотицкого поля установлены нами ранее (от -2 до -6) [3, 11]. Подобные значения характерны для источника, расположенного в пределах обогащенной мантии I типа (EMI). В отличие от кимберлитов Золотицкого поля, кимберлиты трубок «Ботубинская» и «Нюрбинская» Накынского поля

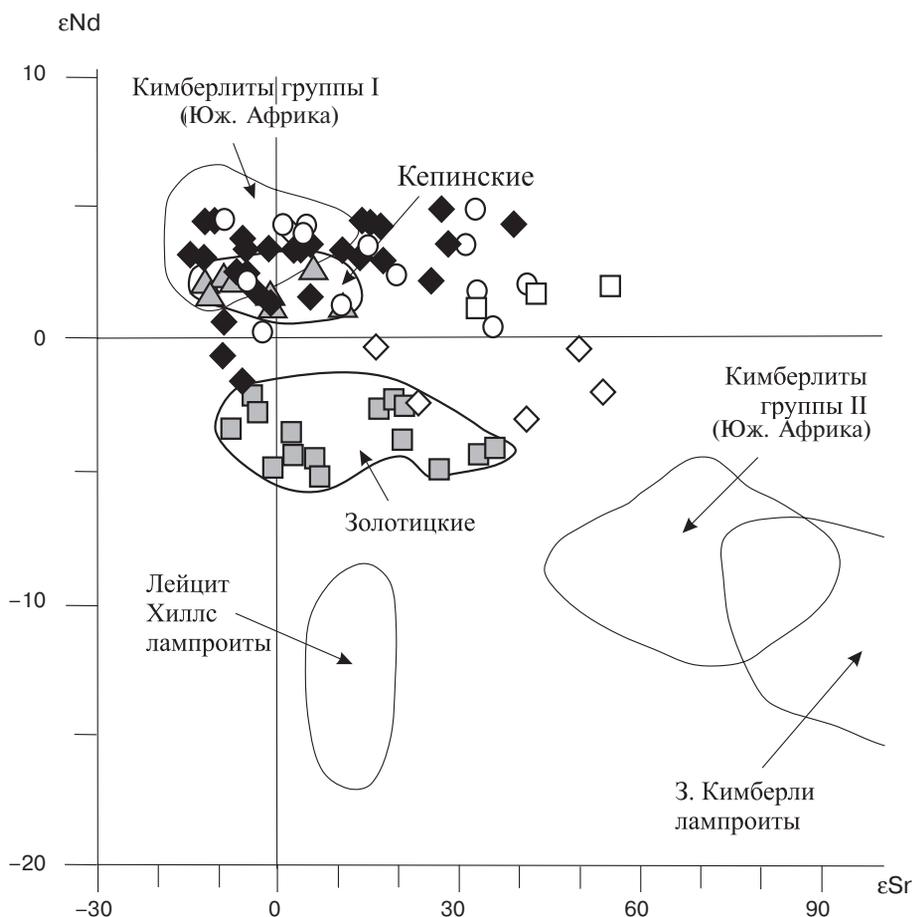


Рис. 4. Диаграмма ϵNd – ϵSr для кимберлитов Якутии и Архангельской области (поля по [20]). Усл. обозн. см. на рис. 1

показывают более высокие значения ϵNd (от -3 до $+2$). При этом изотопный состав «Нюрбинской» и «Ботуобинской» трубок имеет некоторые различия. В образце трубки «Нюрбинская» значение ϵNd колеблется от -3 до $-0,2$, т. е. смещается в поле обогащенной мантии I типа. В литературе для трубки «Нюрбинская» даны значения ϵNd от $+0,9$ до $-0,7$ [5]. Образцы трубки «Ботуобинская» имеют небольшие положительные значения ϵNd (от $+1,2$ до $+2,0$), т. е. мантийный источник был слабо деплетирован. Довольно широкий разброс значений ϵNd в кимберлитах трубки «Нюрбинская», возможно, связан с контаминацией кимберлитовых пород данной трубки метаморфическими породами фундамента (наиболее низкими отрицательными значениями ϵNd среди образцов нашей коллекции обладают АКБ трубки «Нюрбинская»).

Pb изотопная система. Данные по изотопному составу Pb представлены на рис. 5, где приведены модельные кривые эволюции изотопного состава Pb мантии, верхней и нижней коры (принцип построения в [10]). Как видно на рис. 5, первичные изотопные отношения свинца кимберлитов Накынского поля Якутии и полей Архангельской

области похожи и в некоторых случаях перекрываются. Как и кимберлиты Архангельской области, точки изотопных составов кимберлитов Накынского поля располагаются в области кривой эволюции свинца мантии или смещаются в область нижней коры.

Анализы образцов ряда полей Якутии, как и трубки «Ботуобинская», перекрываются с полем кимберлитов группы I Южной Африки. Кимберлиты трубки «Нюрбинская», а также некоторых северных полей Якутии находятся в промежутке между полями кимберлитов групп I и II Южной Африки, смещаясь в область значений менее радиогенного свинца. Они отклоняются от мантийной кривой в сторону кривой нижней коры и ЕМ1 (рис. 5), что, вероятно, связано с присутствием в составе ее источника некоторой доли корового вещества. Причем анализы кимберлитов трубки «Нюрбинская» (Накынское поле) и Золотицкого поля практически перекрываются, а образцы кимберлитов трубки «Ботуобинская» располагаются посередине либо вблизи точек анализов Кепинского поля, попадая в поле кимберлитов группы I Южной Африки.

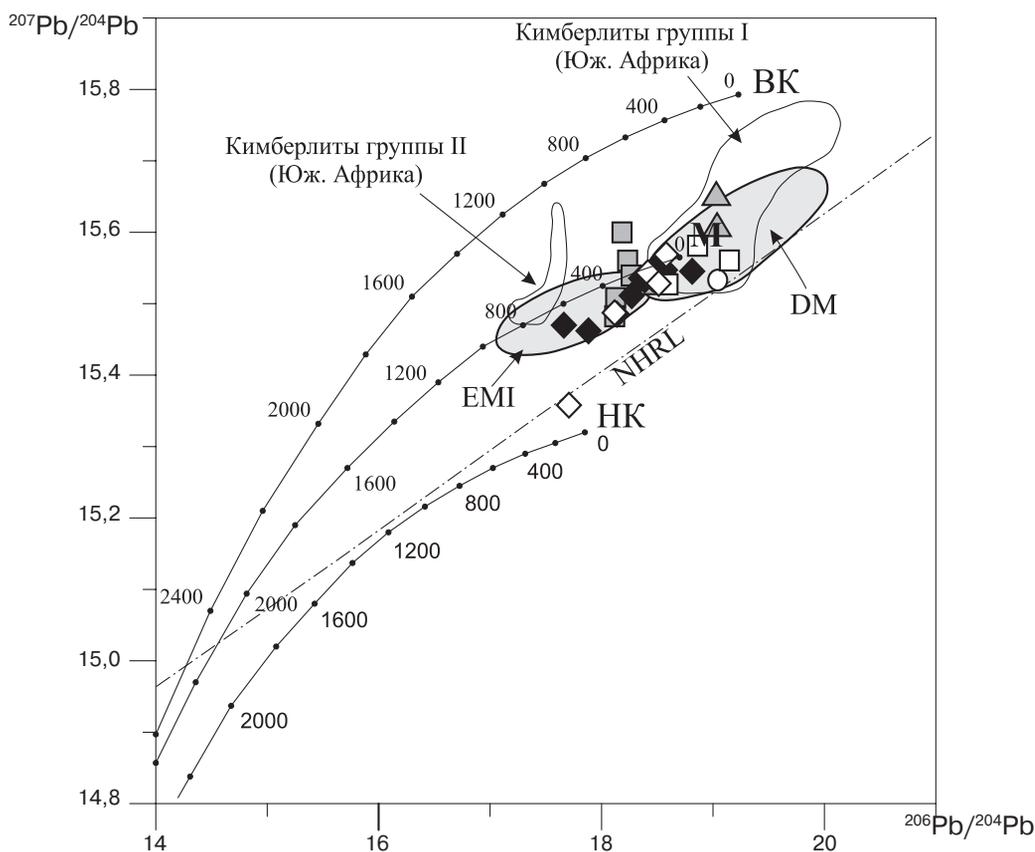


Рис. 5. Диаграмма $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ — $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для кимберлитов Якутии (поля по [20])

Модельные кривые эволюции Pb мантии (М), нижней коры (НК) и верхней коры (ВК). Цифры на линиях — время в млн лет. Усл. обозн. см. на рис. 1

Исследования показали определенное сходство кимберлитов Накынского (Якутия) и Золотицкого (Архангельская область) полей, что позволяет классифицировать их как новый петрогеохимический тип низкотитанистых кимберлитов. Однако, несмотря на явное сходство геохимических характеристик, существует ряд различий, связанных с изотопным составом как в целом между изученными полями, так и между кимберлитами разных трубок в пределах поля. Рассмотрим основные характеристики низкотитанистых кимберлитов, а также возможные причины неоднородности изученных объектов.

Петрогеохимические типы кимберлитов. До настоящего времени при наличии современных прецизионных методов (ICP-MS геохимия, изотопия Sr, Nd, Pb) кимберлиты Якутии были изучены слабо в отличие от кимберлитов Архангельской области. Единичные публикации, посвященные ограниченному количеству объектов, рассматривают все кимберлиты Якутии, за исключением кимберлитов Накынского поля, как кимберлиты группы I Южной Африки. Кимберлиты Накынского поля относят либо к типу, промежуточному

между кимберлитами групп I и II Южной Африки [18], либо сравнивают их с кимберлитами группы II [11, 14].

Исследования представительной коллекции образцов кимберлитов Якутии (13 полей, 38 объектов) позволили нам выделить три петрогеохимических типа кимберлитов, различающихся по содержанию титана и редких элементов [2]. Следует иметь в виду, что наряду с кимберлитами Накынского поля, отнесенными нами к группе низкотитанистых кимберлитов, встречаются единичные образцы низкотитанистых кимберлитов и в других полях, но весь комплекс их петрогеохимических особенностей иной. Рассматривая изотопные характеристики, подчеркнем, что кимберлиты трубки «Ботуобинская» Накынского поля приближаются к кимберлитам других петрогеохимических типов Якутии, имея похожие пределы колебаний значений ϵNd от $-0,6$ до $+5$. Кимберлиты трубки «Нюрбинская» располагаются в промежуточной зоне между двумя группами южноафриканских кимберлитов и приближаются по значениям ϵNd к кимберлитам Золотицкого поля Архангельской области (рис. 4, 5).

Среди кимберлитов Архангельской области выделены два типа, отличающиеся по петрогеохимическим особенностям и изотопным характеристикам [3]. При этом кимберлиты Золотицкого поля образовали самостоятельное сообщество, не похожее ни на одно из ранее выделенных (кимберлиты групп I и II, Коиду, Ариес [20, 21]). Данные кимберлиты было предложено выделить как золотицкий петрогеохимический тип.

Таким образом, полученные на данный момент с помощью прецизионных методов характеристики кимберлитов Якутии позволяют выделять несколько петрогеохимических типов кимберлитов с различными геохимическими особенностями (содержания титана и редких элементов, отчасти изотопия). Кимберлиты Накынского поля отличаются от остальных кимберлитов Якутии прежде всего уникальными геохимическими особенностями, в то время как по изотопным характеристикам они сходны (в случае трубки «Ботуобинская») или недостаточно велики (трубка «Нюрбинская»). Сходство кимберлитов Накынского и Золотицкого полей выражается в похожих петрогеохимических особенностях пород и некотором сходстве изотопных характеристик.

Вариации состава кимберлитов в пределах трубки и поля рассмотрим на примере образцов кимберлитов Накынского поля (трубки «Ботуобинская» и «Нюрбинская»).

Изученные образцы кимберлитов Накынского поля представлены как сильно контаминированными и измененными образцами кимберлитовых туфобрекчий (образцы Б-5-89 и Б-5-101), так и порфиоровыми кимберлитами с низкой степенью контаминации. Вторичные изменения кимберлитов проявляются в хлоритизации флогопитов, наиболее сильно проявленной на верхних горизонтах трубки «Ботуобинская» в КТБ. Образцы КТБ обладают пониженными содержаниями K_2O и Rb (0,14–0,29 мас.%, 5–8 ppm) по сравнению с АКБ и ПК более глубоких горизонтов трубки (0,2–1,50 мас.%, 7–39 ppm). Кроме того, АКБ и КТБ трубок «Ботуобинская» и «Нюрбинская» характеризуются более низкими содержаниями титана (0,3–0,64 мас.%) по сравнению с ПК (0,6–0,8 мас. %). Содержание многих редких элементов, прежде всего редких земель и HFSE, снижается при уменьшении концентраций титана.

Отнесение обеих трубок Накынского поля к одному петрогеохимическому типу кимберлитов возможно, так как их геохимические характеристики практически полностью совпадают, особенно для порфиоровых кимберлитов.

Источники низкотитанистых кимберлитов и время их обогащения. Исследование Pb, Sr и Nd изотопных систем (рис. 4, 5) в кимберлитах Якутии и Архангельской области показало, что, как и для южноафриканских кимберлитов группы I, мантийный источник большинства кимберлитов умеренно- и высокотитанистых разновидностей Якутии, а также кимберлитов Кепинского поля Архангельской области, по-видимому, находился в деплети-

рованной мантии. На фоне остальных кимберлитовых полей Якутии и Архангельской области кимберлиты Накынского и Золотицкого полей четко различаются не только по петрогеохимическим особенностям, но и по изотопным характеристикам. Как Sr и Nd, так и Pb изотопные отношения (рис. 4, 5) свидетельствуют о том, что источником кимберлитов данных полей, по-видимому, являлась в разной степени обогащенная литосферная мантия I типа. Источником кимберлитов Золотицкого поля, по-видимому, была сильно обогащенная литосферная мантия I типа, источник кимберлитов Накынского поля находился в пределах среднего состава Земли — BSE (трубка «Ботуобинская») или, возможно, слабообогатенной литосферной мантии I типа (трубка «Нюрбинская»).

Расчет модельного возраста $T_{(Nd)DM}$, который позволяет оценить время метасоматического преобразования деплетированной мантии, дал для кимберлитов Якутии несколько групп возрастных значений в интервале 1,2–0,5 млрд лет. При этом самые древние цифры (нижний–верхний рифей, 1,4–0,9 млрд лет) получены для источника кимберлитов трубок Накынского поля. Если принять время образования кимберлитов этих трубок за 364 млн лет [14], то процесс обогащения происходил за 0,54–1,04 млрд лет до их внедрения, причем раньше, в источнике кимберлитов трубки «Нюрбинская». Расчет модельного возраста для кимберлитов Золотицкого и Кепинского полей Архангельской провинции также показал похожие различия. Модельный возраст кимберлитов Золотицкого поля более древний (1,1–1,3 млрд лет) по сравнению с кимберлитами Кепинского поля (0,8 млрд лет), а время внедрения датируется периодом 0,36–0,38 млрд лет.

Обоим образом имеющихся данных по изотопии пород Архангельской области показывает уменьшение значений ϵNd с востока на запад. По направлению с севера на юг также наблюдается довольно резкое уменьшение первичных изотопных отношений неодима, что указывает на смену источников магм при переходе к Архангельскому горсту и увеличение доли древнего литосферного компонента в составе магм. По геофизическим данным, мантия под Архангельским горстом имеет иное строение, чем под более северными районами. Таким образом, северная граница горста является важной тектонической и геохимической границей. Возможно, что изменения в строении фундамента могли бы объяснить и смещение изотопных характеристик кимберлитов Накынского поля.

Роль метасоматических процессов и характер обогащения мантийных источников низкотитанистых кимберлитов. Отрицательные аномалии HFSE (Th, U, Nb и др.), характерные для кимберлитов Накынского и Золотицкого полей, обычно связывают с выплавлением расплавов из зон литосферы, которая была предварительно метасоматизирована под влиянием флюидов, в которых участвует вещество, поступавшее из коры. При этом, как

было уже отмечено нами для кимберлитов Золотицкого поля [3], геохимические данные, согласованные с результатами тектонических исследований, позволяют допускать существование конвергентных границ плит в раннем протерозое на севере Восточно-Европейской платформы. Процессы коллизии или субдукции, по-видимому, имели место на границе Беломорского и Кольского блоков.

Согласно [13], Накынское кимберлитовое поле располагается в пределах Мархинского гранит-зеленокаменного террейна Анабарской тектонической провинции. Набор ксенолитов в кимберлитах Накынского поля соответствует ассоциации гранитоидов, гнейсов и метабазитов амфиболитовой фации. Возраст коллизионных процессов определяется в 2,9 и 2,0–1,8 млрд лет. По-видимому, коллизионные процессы приводили к переработке и смешиванию литосферной мантии разных провинций, а литосферные блоки, погружающиеся в мантию, при плавлении становились источниками водных флюидов, метасоматизировавших мантийные источники кимберлитов Накынского поля. Возможно, подобные процессы влияли на образование коррозионных поверхностей алмазов из кимберлитов Накынского поля.

Выполненные исследования и полученные ранее данные [3] позволили установить ряд сходных черт между кимберлитами Накынского и Золотицкого полей, что позволило классифицировать кимберлиты данных полей как новый петрогеохимический тип низкотитанистых кимберлитов, обладающих рядом индикаторных признаков:

1. По содержанию TiO_2 кимберлиты Накынского и Золотицкого полей относятся к группе низкотитанистых ($TiO_2 < 1$ мас.%). Кроме низких содержаний титана, породы также характеризует повышенная магнезиальность $mg\#$ 75–85.

2. Низкотитанистые кимберлиты имеют пониженные содержания HFSE (Nb, Zr, Ta, Hf, Th и U) и легких редкоземельных элементов ($La = 9–40$, $Se = 21–70$ ppm) по сравнению с кимберлитами группы I ($La = 90–125$, $Se = 140–220$ ppm) и группы II ($La = 200$, $Se = 350$ ppm) Южной Африки по [21], что свидетельствует об обеднении мантийного источника этими элементами. Подобное распределение элементов может быть связано с выплавлением расплавов из литосферы, которая была предварительно метасоматизирована под влиянием флюидов, выделяющихся из блоков коры, погруженной в мантию в процессе субдукции и/или коллизии террейнов.

3. Изотопный состав Nd низкотитанистых кимберлитов приближается к среднему составу Земли (BSE) или отклоняется в сторону более обогащенных источников. При этом источником кимберлитов трубки «Нюрбинская» (Накынское поле) (ϵNd от -3 до $-0,2$), как и кимберлитов Золотицкого поля (ϵNd от $-2,0$ до -6), возможно, является обогащенная литосферная мантия ЕМ1-типа. Источником кимберлитов трубки «Ботубинская»

Накынского поля (ϵNd от $+1,2$ до $+2,0$) была, по-видимому, слабодеплетированная мантия.

4. Первичные изотопные отношения свинца в кимберлитах трубки «Ботубинская» ($^{206}Pb/^{204}Pb$ 18,594–19,149) близки к кимберлитам Кепинского поля Архангельской провинции. Эти значения для кимберлитов трубки «Нюрбинская» перекрываются с таковыми же, характерными для кимберлитов Золотицкого поля.

5. Рассчитанные модельные значения возраста $T_{(Nd)DM}$ для кимберлитов Накынского поля находятся в интервале 0,9–1,4 млрд лет. При этом для трубки «Нюрбинская» модельный возраст составляет 1,2–1,4, а для трубки «Ботубинская» 0,9–1,1 млрд лет. Эти модельные возрасты, вероятно, характеризуют возраст обогащения источника магм кимберлитов Накынского поля. Возможно, источник кимберлитов был обогащен за 0,5 и 1,0 млрд лет до возникновения кимберлитовых магм, причем раньше это произошло с источником кимберлитов трубки «Нюрбинская». Согласно нашим данным, кимберлиты Накынского поля обладают самым древним модельным возрастом среди исследованных кимберлитов Якутии. Та же ситуация наблюдается и среди кимберлитов Архангельской области: модельный возраст кимберлитов Золотицкого поля (1,1–1,3 млрд лет) древнее кимберлитов Кепинского поля (0,8 млрд лет).

Каменные материалы по кимберлитам Якутии были предоставлены сотрудниками ЦНИГРИ (Москва), ЯНИГП ЦНИГРИ (Мирный) и Ботубинской экспедиции АК «АЛРОСА». Благодарим сотрудников аналитических лабораторий ИГГД РАН, ИМГРЭ МПР, ОИГГиМ СО РАН и ИГЕМ РАН за проведение комплекса прецизионных аналитических исследований кимберлитов Якутии и Архангельской области.

1. Богатилов О.А., Гаранин В.К., Кононова В.А. и др. Архангельская алмазоносная провинция (геология, петрография, геохимия и минералогия). М.: Изд-во МГУ. 1999. 524 с.

2. Богатилов О.А., Кононова В.А., Голубева Ю.Ю. и др. Петрогеохимические и изотопные вариации состава кимберлитов Якутии и их причины // Геохимия. 2004. № 9.

3. Богатилов 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. № 3. С. 227–241.

4. Василенко В.Б., Леснов Ф.П., Зинчук Н.Н., Кузнецова Л.Г., Волкова Н.И. О сопряженности распределений редкоземельных элементов и породообразующих оксидов в породах кимберлитовой формации // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Воронеж. ГУ. 2003. С. 33–38.

5. Голубева Ю.Ю., Илупин И.П., Журавлев Д.З. Редкоземельные элементы (ICP-MS геохимия) в кимберлитах Якутии // ДАН. 2003. Т. 390. № 5. С. 668–672.

6. Голубева Ю.Ю., Овчинникова Г.В., Левский Л.К. Pb-Sr-Nd изотопные характеристики мантийных источников кимберлитов Накынского поля (Якутия) // ДАН. 2004. Т. 394. № 6. С. 796–800.
7. Голубева Ю.Ю., Цепин А.И. Уточнение критериев диагностики кимберлитов Якутии: петрохимия, минералогия // ДАН. 2004. Т. 397. № 3.
8. Зайцев А.И., Корнилова В.П., Фомин А.С., Томшин М.Д. О возрасте кимберлитовых пород Накынского поля // Проблемы алмазной геологии и некоторые пути их решения. Воронеж: Воронеж. ГУ. 2001. С. 47–53.
9. Илупин И.П., Каминский Ф.В., Францессон Е.В. Геохимия кимберлитов. М.: Недра, 1978. 352 с.
10. Кононова В.А., Левский Л.К., Первов В.А., Овчинникова Г.В., Богатииков О.А. Pb-Sr-Nd изотопные характеристики мантийных источников калиевых ультрабазитов и базитов севера Восточно-Европейской платформы // Петрология. 2002. Т. 10. № 5. С. 493–509.
11. Корнилова В.П., Фомин А.С., Зайцев А.И. Новый тип алмазоносных кимберлитов на Сибирской платформе // Регион. геология и металлогения. 2001. № 13–14. С. 105–117.
12. Парсаданян К.С., Кононова В.А., Богатииков О.А. Источники гетерогенного магматизма Архангельской алмазоносной провинции // Петрология. 1996. Т. 4. № 5. С. 496–517.
13. Розен О.М., Серенко В.П., Спеццус З.В., Манаков А.В., Зинчук Н.Н. Тектоника Якутской кимберлитовой провинции: особенности состава коры и литосферной мантии, вопросы эволюции // Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Воронеж. ГУ. 2003. С. 332–338.
14. Agashev A.M., Watanabe T., Budaev D.A. et al. Geochemistry of kimberlites from Nakyn field, Siberia: evidence for unique source composition // *Geology*. 2001. Vol. 29. № 3. P. 267–270.
15. McDonough W.F., Sun S.S. The composition of the Earth // *Chem. Geol.* 1995. Vol. 120. P. 223–253.
16. Mahotkin I.L., Gibson S.A., Thompson R.N., Zhuravlev D.Z. et al. Late Devonian diamondiferous kimberlite and alkaline picrite (proto-kimberlite?) magmatism in the Archangelsk region, NW Russia // *J. Petrol.* 2000. Vol. 41. № 2. P. 201–227.
17. Mitchell R.H. Kimberlites, orangeites, and related rocks // Plenum Press: New York and London. 1995. 410 p.
18. Pokhilenko N., Agashev A., McDonald J. et al. Kimberlites of the Nakyn Field, Siberia, and the SnapLake/King dyke system, Slave Craton, Canada: a new variety of kimberlite with a proposed ultradeep origin // 8th IGC, 2003.
19. Smith C.B. Pb, Sr, and Nd isotopic evidence for sources of Southern African cretaceous kimberlites // *Nature*. 1983. Vol. 304. P. 51–54.
20. Taylor W.R., Tompkins L.A., Haggerty S.E. Comparative geochemistry of West African kimberlites. Evidence for a micaceous kimberlite ϵ Nd member of sublithospheric origin // *Geochem. et Cosmoch. Acta*. 1994. Vol. 58. N 19. P. 4017–4037.
21. Smith C.B., Gurney J.J., Skinner E.M.W. et al. Geochemical character of Southern African kimberlites: a new approach based on isotopic constraints // *Trans. Geol. Soc. S. Afr.* 1985. Vol. 88. P. 267–280.