

УДК 550.4

КИМБЕРЛИТЫ ВОСТОЧНОГО ПРИАЗОВЬЯ (УКРАИНА) И ГЕОХИМИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ИХ ИСТОЧНИКОВ

© 2004 г. Е. В. Юткина*, В. А. Кононова*, О. А. Богатиков*, А. П. Князьков**,
Н. А. Козарь***, Г. В. Овчинникова****, Л. К. Левский****

*Институт геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН
119017 Москва, Старомонетный пер., д. 35, Россия; e-mail: evgesha@igem.ru

**Акционерная компания "АЛРОСА"

678170 Мирный, Чернышевское шоссе, д. 11, Россия

***Государственное предприятие "Южургеология"

49005 Днепропетровск, ул. Чернышевского, 11, Украина

****Институт геологии и геохронологии докембрия РАН

199034 Санкт-Петербург, наб. Макарова, 2, Россия

Поступила в редакцию 27.05.2003 г.

На обширной территории Восточно-Европейской платформы, помимо девонских кимберлитов, в том числе алмазоносных, известных на северной ее окраине (район Архангельска, Терского Берега и др.), сравнительно недавно обнаружены трубки взрыва калиевых ультраосновных пород (также девонского возраста) на юге – в Восточном Приазовье. Однако природа последних дискутируется: их относят то к кимберлитам, то к пикрит-мелилититам. Для получения объективных критериев диагностики этих пород, выяснения характера их источника и оценки перспектив алмазоносности было выполнено комплексное петролого-геохимическое и минералогическое исследование серии образцов из коллекции А.П. Князькова (АК "АЛРОСА"). При этом четыре наименее контаминированных образца трубок Южная и Новоласпинская, а также дайки Новоласпинская исследовались с применением прецизионных методов, в том числе ICP-MS геохимии и Sr-Nd-Pb изотопии. Получены данные о Rb-Sr (383.3 ± 3.8 млн. лет – трубка Новоласпинская, 384.7 ± 3.9 млн. лет – трубка Южная) и Pb-Pb (390 млн. лет – трубка Новоласпинская, 370 млн. лет – трубка Южная) возрастах. Судя по дискриминантным диаграммам MgO-Ni, TiO₂-K₂O и TiO₂-SiO₂, три исследованных образца близки по составу к кимберлитам Кепинского поля Архангельской провинции и ряда других объектов северной окраины платформы. Изотопный состав стронция и неодима в кимберлитах Восточного Приазовья варьирует в небольших пределах (ϵ_{Sr} от 0.7 до 29, ϵ_{Nd} от +1.9 до -0.1). Их источник предполагался, по-видимому, в мантии типа BSE, как и источник кимберлитов северной окраины Восточно-Европейской платформы (Кепинское поле Архангельского ареала, Тиманский и др. объекты). Изотопный состав свинца восточно-приазовских кимберлитов (точки составов попадают в область между кривыми эволюции свинца мантии и нижней коры) указывает на участие в их формировании процессов контаминации. Минеральный состав кимберлитов Восточного Приазовья следующий: серпентинизированный оливин (mg# до 0.9), флогопит (mg# до 0.92), хлорит, пикроильменит (MgO до 15.8 мас. %), перовскит, титаномагнетит, сфен, кальцит и ряд минералов-спутников алмаза (пироп, хромшпинелиды). В числе региональных особенностей геохимического состава кимберлитов обращают на себя внимание повышенные содержания Zr, причем как в породах, так и в некоторых минералах (пироп). Источником базальта, встреченного в трубке Южная, судя по изотопному составу (ϵ_{Sr} -20.46, ϵ_{Nd} +3.3), была мантия более деплетированная, чем BSE, переходная к PREMA. Кимберлиты и базальты Восточного Приазовья хотя и присутствуют в единых геологических толщах, но формировались из различных мантийных источников.

Как известно, центральные части Восточно-Европейской платформы перекрыты мощным осадочным чехлом, и, видимо, в связи с этим кимберлиты пока известны только на ее периферии. На севере это девонские кимберлиты, в том числе алмазоносные, в районе Архангельска, в сопредельных ареалах, а также в Финляндии (Богатиков и др., 1999, 2001). На юге известны трубки взрыва кимберлитов также девонского возраста, приуроченные к восточной части Приазовского

блока. Сопоставление кимберлитов северной и южной окраин Восточно-Европейской платформы позволяет выявить специфику их формирования, включая особенности мантийных источников.

На основании работ, выполненных в 70-е годы прошлого века (Кимберлитовые породы Приазовья, 1978), был выделен восточно-приазовский комплекс, включающий кимберлиты. Позднее этот комплекс детально исследовался Приазов-

ской геологоразведочной экспедицией ГП “Южургеология” при участии ряда других организаций. Главным образом было изучено геологическое строение трубок (Князьков и др., 1999), а также состав минералов-спутников алмаза (гранаты, хромшпинелиды) (Панов, 2001 и др.).

Вместе с тем вопрос о природе калиевых ультрабазитов Восточного Приазовья до сих пор остается дискуссионным. Так, в публикациях 2003 года украинских исследователей эти породы относятся то к кимберлитам (Гейко и др., 2003), то к пикрит-мелилититам (Металиди и др., 2003). Заметим, что приазовские трубки взрыва и дайки представляют собой довольно пестрые по составу субвулканические тела – кимберлиты, разнообразные брекчии, базальтоиды и т.д. Для уточнения природы этих пород нами были исследованы образцы из коллекции А.П. Князькова. При этом для детальных петролого-геохимических и минералогических исследований с применением комплекса прецизионных методов, в том числе ICP-MS и Sr-Nd-Pb изотопии, выбраны только представительные образцы по возможности массивных разновидностей пород с минимальной степенью вторичных изменений. Полученные новые петролого-геохимические характеристики пород позволили ряд исследованных образцов классифицировать как кимберлиты. С использованием полученных ранее результатов изучения среднепалеозойских кимберлитов северной окраины Восточно-Европейской платформы (Богатилов и др., 2001) проведен сравнительный анализ особенностей состава кимберлитов и их источников, возникших примерно в одно время (около 380 млн. лет назад), но в разных блоках Восточно-Европейской платформы.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Анализ породообразующих элементов выполнен рентгенофлуоресцентным методом в ОИГГиГ СО РАН (г. Новосибирск) с дополнительными определениями H_2O , CO_2 , FeO в химической лаборатории ИГЕМ РАН. Редкие и редкоземельные элементы определены методом ICP-MS Д.З. Журавлевым (ИМГРЭ). Измерение изотопного состава Sr и Nd осуществлено в лаборатории изотопной геохронологии и геохимии ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург) на твердофазном 8-коллекторном масс-спектрометре Finnigan MAT-261 в статическом режиме. Методика анализа содержания и изотопного состава свинца, урана, самария, неодима, рубидия и стронция подробно описана в наших предыдущих публикациях (Беляцкий и др., 1992; Кононова и др., 2002). Составы минералов измерены на микрозонде “CamScan” кафедры петрографии Геологического факультета МГУ им. Ломоносова.

ГЕОЛОГИЯ И ПЕТРОГРАФО-МИНЕРАЛОГИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПОРОД

Геологическая позиция трубок взрыва и их возраст

Южная окраина Восточно-Европейской платформы в палеозое характеризовалась наличием двух крупных структур: Украинского щита и Днепровско-Донецкого авлакогена. В пределах самого восточного блока Украинского щита – Приазовского кристаллического массива (ПКМ), вблизи его северного сочленения с Донбассом, известны эффузивные и эксплозивные толщи разнообразных по составу пород (либургиты, авгититы, верлиты и др.), в том числе жилы, дайки и трубки взрыва кимберлитов, возраст которых оценивается (K-Ar метод) как ранний девон – около $414-394 \pm 20$ млн. лет (Кимберлитовые породы Приазовья, 1978). В последние годы на рассматриваемой территории были выявлены кимберлиты Петровско-Кумачовской площади (рис. 1). Они контролируются субширотным Южно-Донбасским глубинным разломом протерозойского заложения. По геофизическим данным в этом блоке фиксируется подъем поверхности Мохо на 10–15 км по сравнению с центральной частью Донбасса. В пределах Петровско-Кумачовской площади выявлено 2 куста кимберлитового магматизма: Петровско-Горняцкий (трубка Петровская, Горняцкое проявление) и Новоласпинский (трубки Надежда, Южная, Новоласпинская и сопряженные с двумя последними дайки).

В геолого-структурном плане Петровско-Горняцкий узел расположен в зоне сочленения Донбасса с ПКМ в поле развития девонских вулканогенно-осадочных пород. Новоласпинский кимберлитовый узел приурочен к северной части ПКМ, сложенной гранитоидами восточно-приазовского комплекса нижнего протерозоя.

В рамках авторских исследований трубок Южная и Новоласпинская были получены данные о Rb-Sr и Pb-Pb возрастах пород. Rb-Sr возраст, измеренный по биотитам и породе, составил 383.3 ± 3.8 млн. лет (обр. 293/11, трубка Новоласпинская) и 384.7 ± 3.9 млн. лет (обр. 1459-а, трубка Южная). Pb-Pb возраст, рассчитанный по трем точкам (вал породы, выщелат, остаток), составляет 390 млн. лет для обр. 293/11, трубка Новоласпинская, и 370 млн. лет для обр. 1459-а, трубка Южная, что в пределах погрешностей не противоречит геологическому возрасту кимберлитов (порядка 380 млн. лет).

Строение трубок взрыва кимберлитов

Среди известных к настоящему времени в Восточном Приазовье трубок кимберлитов (рис. 1) только трубка Петровская выражена в рельефе.

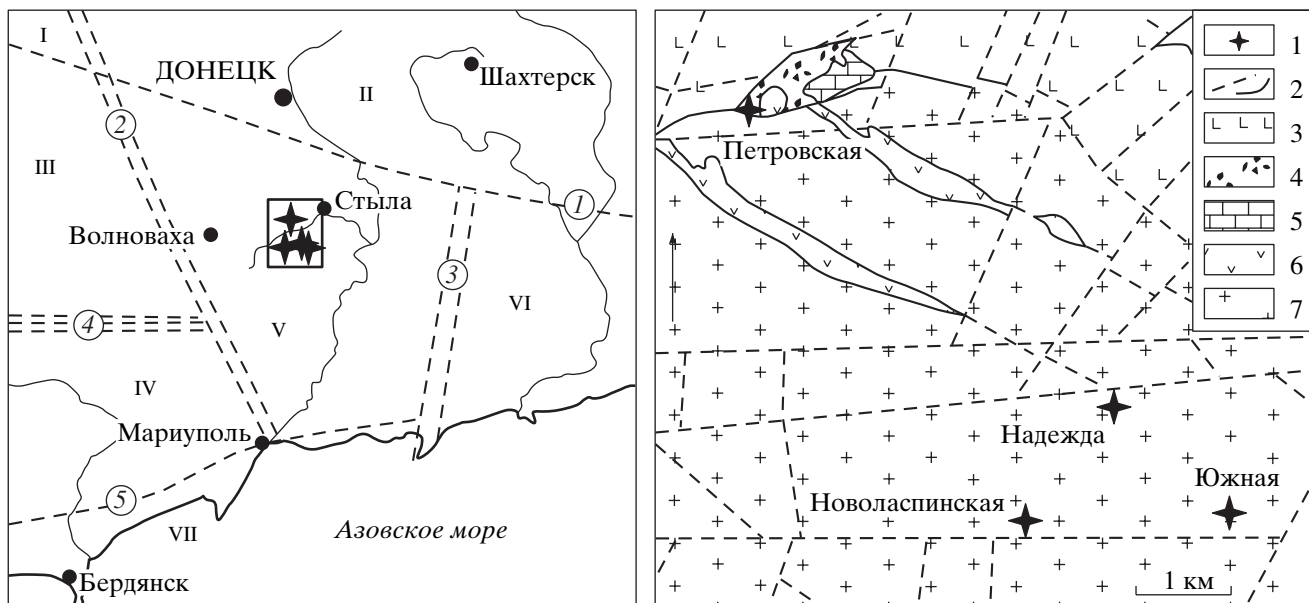


Рис. 1. Схема расположения трубок взрыва Восточного Приазовья по (Князьков и др., 1999; Васильченко и др., 1999; Металиди и др., 2003) с изменениями.

1 – трубки взрыва; 2 – тектонические нарушения; 3 – базальтоиды (D_{2-3}); 4 – вулканогенно-осадочные брекчии (D_{2-3}); 5 – известняки, песчаники (D_2); 6 – андезитодациты, ортофиры; 7 – граниты, граносиениты (PR).

Цифрами в кружках показаны: 1–4 – зоны разломов: 1 – Южно-Донбасская, 2 – Малоясненская, 3 – Еланчикская, 4 – Конская; 5 – Бердянский сброс.

Римскими цифрами обозначены: I – Днепровско-Донецкая впадина, II – Складчатый Донбасс; III–V – Приазовский блок Украинского щита: III – Гуляйпольский субблок, IV – Бердянский субблок, V – Восточно-Приазовский субблок; VI – Ростовский выступ; VII – Причерноморская впадина.

Мощность перекрывающих четвертичных суглинков составляет от 0–2 м на некоторых участках южного фланга трубки до 10–11 м для остальной части. Другие трубки расположены на пахотных землях, перекрыты четвертичными суглинками мощностью 8–20 м и не выражены в рельефе.

При опробовании трубки Петровская (около 800 тонн) и кимберлитовых тел Новоласпинского узла (около 80 тонн) обнаружено три мелких алмаза (до 0.4 мм) в трубке Надежда. Алмазы размером до 0.7 мм обнаружены в аллювии водотоков, дренирующих площади распространения вышеуказанных кимберлитовых тел. Приведем краткое описание трубок по материалам одного из авторов статьи (Князьков и др., 1999).

Трубка Петровская. Кимберлитовое тело имеет грибообразную форму, размером в плане около 200 × 400 м при мощности 30–50 м (рис. 2а). В отличие от классических кимберлитовых трубок на Петровской сильно расширена верхняя (кратерная) часть трубки, отсутствует средняя (диатремная) и нет типичного подводящего канала. Породы кристаллического фундамента под кимберлитовым телом интенсивно разбиты зонами дробления, пропитаны дайками и жилами плагиопорфиров, андезитов и пикритов. В протоочных пробах одной из наиболее мощных зон дроб-

ления обнаружены минералы-спутники алмазов – пиропы и хромшпинелиды.

Кимберлитовые брекчии залегают на вулканогенно-осадочных брекчиях петровской толщи и на флангах трубки перекрываются туфами оливиновых пикрит-базальтов, выше которых залегают лимбургиты и авгититы антон-тарамской свиты.

Выделяются три разновидности кимберлитовых брекчий: эруптивные, туфобрекчии и ксенотуфобрекчии. Первые тяготеют к центральной части трубки, а туфобрекчии и ксенотуфобрекчии слагают в основном ее периферическую часть. Наличие вышеуказанных разновидностей пород может свидетельствовать, как минимум, о двухфазном процессе формирования тела.

Кимберлиты трубки Петровская прорывают вулканогенно-осадочные брекчии весьма неоднородной структуры, что могло быть одной из основных причин, обусловивших грибообразную форму трубки.

Петрографическое изучение кимберлитовых ксенотуфобрекчий показало, что содержание глубинного материала в них весьма незначительно. Трубка Петровская перекрыта кайнозойскими отложениями мощностью 8–10 м.

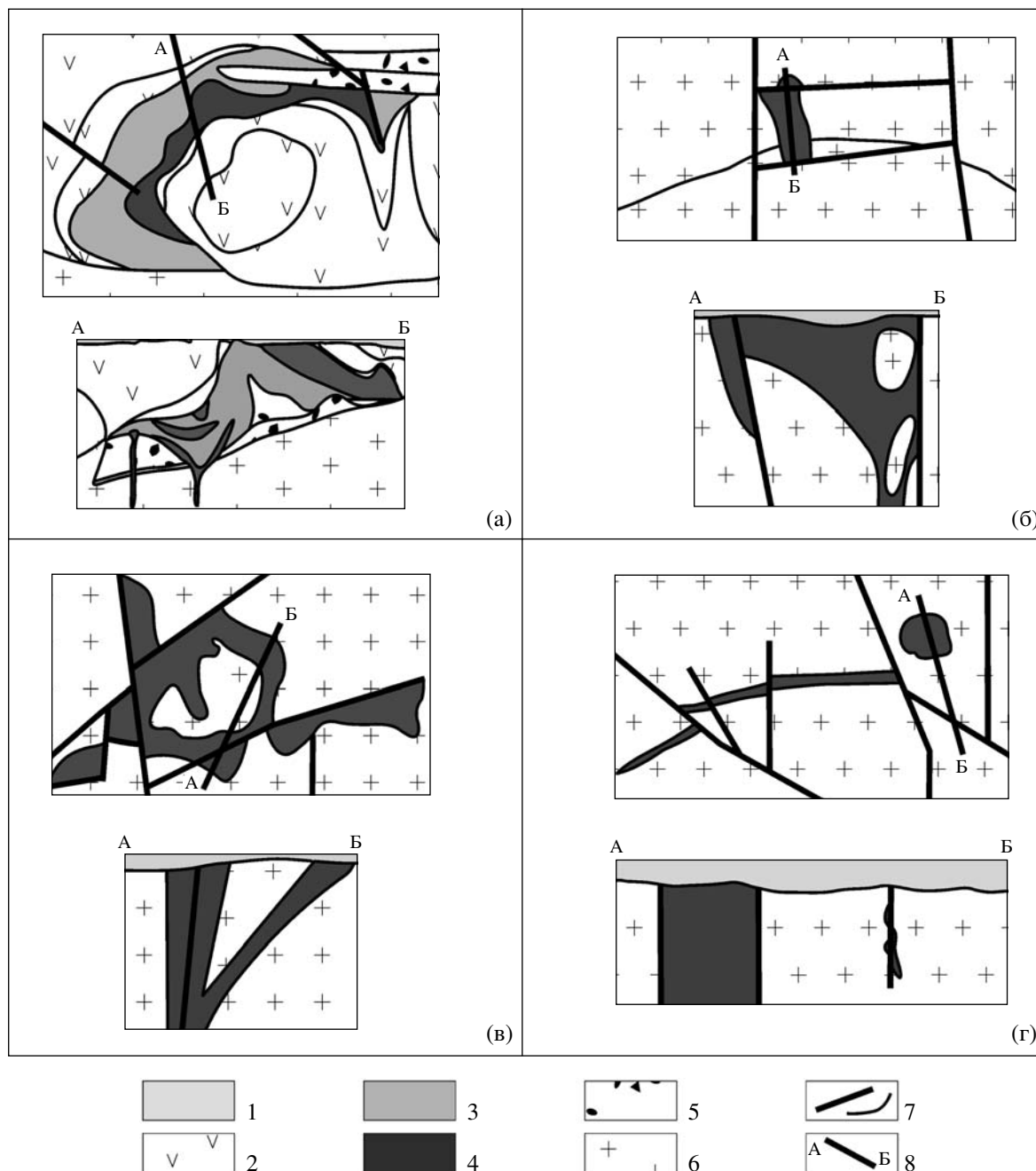


Рис. 2. Схематические планы и разрезы трубок кимберлитов Восточного Приазовья по (Князьков и др., 1999), с упрощениями.

(а) – трубка Петровская, (б) – трубка Надежда, (в) – трубка Южная, (г) – трубка и дайка Новоласпинские.

1 – четвертичные отложения; 2 – базальтоиды; 3 – туфобрекчии кимберлитов; 4 – кимберлиты и их брекчии; 5 – брекчии осадочно-вулканогенных пород; 6 – гранитоиды фундамента; 7 – разломы и границы; 8 – геологический разрез.

Трубка Надежда расположена в Старобешевском районе Донецкой области в 5,2 км юго-восточнее трубки Петровская (рис. 2б). Вблизи поверхности (под четвертичными суглинками мощностью 0,5–8 м) трубка в плане имеет очертания изогнутого овала размером 60 × 30 м (площадь около 1600 м²). Длинная ось овала ориентирована

в северо-западном направлении. Трубка погружается на юго-запад под углом 60–80°. Канал трубки с глубиной постепенно сужается и, вероятно, переходит в дайку (трубка прослежена скважинами до глубины 137,5 м). Трубка перекрыта суглинками мощностью от 0,5 м в центре до 8 м по периферии. Контакт с вмещающими породами крутой,

падение юго-западное. В кимберлитах содержится до 30% ксенолитов, представленных в основном фрагментами пород кристаллического фундамента.

Кимберлиты прорывают субщелочные гранитоиды хлебодаровского комплекса среднего протерозоя. Гранитоиды на контакте с трубкой практически не изменены, однако пронизаны сетью трещин, заполненных кимберлитовым материалом.

Кимберлитовое тело сложено ксенотуфобрекчиями, брекчиями и массивными порфиоровыми кимберлитами. Последние тяготеют к центральной части трубки. Она осложнена посткимберлитовыми разломами субширотного и субмеридионального направлений.

При оконтуривании трубки рядом с ней и в подводящем канале были выявлены дайковые тела докимберлитовых (диабазы) и посткимберлитовых (ортофиры, андезиты) пород. Среди ксеногенных обломков кимберлитовой брекчии присутствуют гранитоиды, известняки и диабазы. Возраст внедрения кимберлитов франский. По присутствию обломков диабазов в кимберлитовых брекчиях можно предположить, что тело при подъеме к поверхности могло использовать те же подводящие каналы, что и более древние дайки диабазов.

Трубка Южная расположена в Тельмановском районе Донецкой области в 1.7 км юго-восточнее трубки Надежда (рис. 2в). Кимберлитовое тело проявляется в виде цепочки изометрических аномалий магнитных полей с интенсивностью до 150 нТл. Размеры самой крупной аномалии – 230 × 300 м, самой мелкой – до 10 м в диаметре. По результатам буровых работ выяснилось, что все эти аномалии сложены кимберлитовыми породами и соединились в одно тело сложной (“амебообразной”) формы, размером 150 × 300 м. Площадь выхода кимберлитов под четвертичными суглинками составляет около 2.2 га. Кимберлиты перекрыты четвертичными суглинками мощностью от 8 до 11 м. Наклонными скважинами кимберлитовое тело прослежено до глубины 321.0 м. Трубка имеет общее падение на ЮЮЗ. Углы падения в северной части тела 45–60°, в южной – близкие к вертикальным. Внутри кимберлитового тела встречаются “риффы” гранитоидов рамы размера-ми до десятков метров.

Породы трубки Южная представлены эруптивными брекчиями автолитовых кимберлитов и подчиненными им массивными кимберлитами темно-зеленого и голубовато-серого цвета. Эруптивные брекчии на 60–70% состоят из собственно кимберлитового материала и на 30–40% – из обломков протерозойских гранитоидов и известняков, а также песчаников и сланцев николаевской свиты среднего девона. Кимберлиты массивной

текстуры имеют хорошо выраженную порфиоровую структуру. Содержание ксеногенного материала в них низкое. Основная масса кимберлитов сложена мелкими зернами моноклинного пироксена и флогопита, сцементированными серпентиноподобным веществом. В основной массе встречаются перовскит, ильменит, апатит. Вкрапленники составляют 40–50% объема породы и представлены псевдоморфозами серпентина по оливину. Эруптивная брекчия имеет ксенокластическую структуру и неоднородную неориентированную текстуру. Порфиоровый кимберлит обладает порфиоровой, местами кластопорфиоровой структурой и однородной, неориентированной текстурой.

В 1998 году на восточном фланге трубки Южная была обнаружена дайка кимберлитов. Протяженность ее от трубки Южная к западу составляет около 2 км.

Трубка Новоласпинская расположена в Тельмановском районе Донецкой области в 2.1 км к западу от трубки Южная и в 2.4 км к юго-западу от трубки Надежда (рис. 2г). Кимберлитовая трубка приурочена к северной части кольцевой Новоласпинской структуры, размером 2.0 × 1.0 км. В магнитном поле эта трубка проявляется в виде слабомагнитной аномалии (до +4 нТл) с резким градиентом (до –150 нТл) поля с севера.

Трубообразное кимберлитовое тело имеет в плане форму овала, длинная ось которого ориентирована в северо-восточном направлении. Размеры тела в плане 40 × 100 м (около 0.3 га). Углы падения стенок трубки и вмещающих гранитоидов крутые (до вертикальных). Трубка разбурена на глубину до 90 м, причем скважины не вышли за ее пределы. Кимберлиты перекрыты четвертичными суглинками мощностью 13–14 м.

Трубку Новоласпинская сопровождает кимберлитовая дайка, строение которой осложнено несколькими разрывными нарушениями. Она прослежена по простиранию на 300 м и на глубину до 75 м. Углы ее падения 75–80° на ЮЮВ. Мощность тела колеблется от 5 до 10 м, а в раздувах до 15 м.

По составу кимберлиты трубки Новоласпинской и одноименной дайки близки кимберлитам трубки Южная.

Вместе с тем, хотя для пород всех трубок отмечается сходство петрографического состава, по данным А.П. Князькова с соавторами (1999) петрохимический состав пород трубок весьма непостоянен (табл. 1), что, возможно, обусловлено присутствием ксенолитов вмещающих пород в переменных количествах в разных фазах кимберлитовых брекчий.

Детальные изучения типохимических особенностей минералов-спутников алмаза, выполненные украинскими специалистами (Панов, 2001;

Таблица 1. Химический состав пород (мас. %), слагающих трубки взрыва в Восточном Приазовье (Князьков и др., 1999)

Объект	<i>n</i>	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	FeO
Трубка Петровская	9	32.75–47.16	0.16–0.92	2.87–8.49	0.72–3.67	1.56–4.53
Трубка Надежда	76	37.40–76.40	0.42–4.46	5.84–15.70	0.58–33.46	0.21–12.73
Трубка Южная	113	34.00–67.50	0.75–4.60	5.10–14.30	2.80–10.96	0.57–13.58
Трубка Новоласпинская	16	27.03–48.92	0.80–4.86	3.26–13.20	1.83–7.23	1.60–6.15
Дайка Новоласпинская	17	30.00–39.00	3.06–5.36	2.80–4.50	8.47–3.08	1.53–4.67
Объект	<i>n</i>	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O
Трубка Петровская	9	0.02–0.16	4.91–24.56	2.46–25.19	0.08–0.73	0.08–0.48
Трубка Надежда	76	0.04–0.41	0.85–18.40	0.80–19.60	0.13–2.75	0.40–4.25
Трубка Южная	113	0.06–0.57	3.10–21.60	0.80–13.00	0.11–2.35	0.19–4.50
Трубка Новоласпинская	16	0.03–0.38	14.70–27.69	2.33–15.55	0.06–0.88	0.45–2.35
Дайка Новоласпинская	17	0.14–0.41	11.40–27.50	5.40–16.20	0.10–0.62	0.29–1.15

Примечание. *n* – количество анализов.

Цымбал и др., 1996; Панов и др., 1999), выявили ряд особенностей хромшпинелидов и пиропы.

Среднее содержание Cr₂O₃ в хромшпинелидах составляет 54.02 мас. %, т.е. совпадает практически с данными по некоторым другим регионам мира. Так, в хромшпинелидах из кимберлитовой трубки С14 (провинция Онтарио, Канада) содержание Cr₂O₃ (среднее из 238 проб) – 54.17 мас. % (Армстронг и др., 1997).

Пироп по химическим характеристикам (СаО 5.7–6.2 мас. %, Cr₂O₃ 5.5–6.5 мас. %) относится в основном к пиропам лерцолитового парагенезиса. В нем отмечались широкие вариации содержания циркония (от 6 до 189 ppm) при среднем содержании 66.5–85.4 ppm, что значительно выше, чем известно в кимберлитах мира. Значения отношения Zr/Y (7.5) в пиропе изучаемых пород также значительно выше, чем это установлено для кимберлитовых тел с промышленной алмазонасностью. На диаграмме Н.В. Соболева в алмазонасное поле попали только 3 из 231 анализов гранатов из трубки Петровская, 2 из 220 – из трубки Южная, 2 из 117 – из трубки Новоласпинская (Чашка и др., 1999). В то же время в промышленно алмазонасных трубках Якутии содержание таких пиропов составляет 10–20%.

Эти и другие выводы об особенностях состава минералов-спутников кимберлитов Восточного Приазовья в цитированных работах основаны на сопоставлении их с объектами (преимущественно) Якутии и Южной Африки. Вместе с тем известно, что ассоциация минералов-спутников, их состав, концентрация в породах коррелируются с петрогеохимическими типами высококальциевых пород – кимберлитов, лампроитов. Это было обнаружено при поисках источников алмазов в Австралии (алмазонасные лампроиты почти не содержат пиропы), а затем подробно изучено на

примере Архангельской алмазонасной провинции (Богатиков и др., 1999 и др.). Так, оказалось, что алмазонасные кимберлиты Золотицкого поля имеют ряд признаков, сближающих их с лампроитами, в которых, как известно, количество минералов-спутников низкое, преобладают хромшпинелиды. В этой связи представляется необходимым уточнить петрогеохимические особенности кимберлитов Восточного Приазовья, что позволит дать более корректную оценку перспектив их алмазонасности. Для этой цели в ИГЕМ РАН предпринято более детальное, чем это было выполнено предыдущими исследователями, изучение петрогеохимических особенностей серии образцов кимберлитов восточно-приазовского комплекса из коллекции А.П. Князькова (АК “АЛРОСА”).

Характеристика образцов. Минеральный состав

С учетом обычного для кимберлитов процесса контаминации коровым материалом, из полученной коллекции для прецизионных исследований были отобраны преимущественно массивные разности кимберлитов без видимых признаков контаминации. Для этих образцов проведено детальное петрографо-минералогическое изучение (табл. 2–4).

Образцы 293/11 (трубка Новоласпинская), 396/46 (дайка Новоласпинская) и 1459-а (трубка Южная) – это породы с брекчиевидной текстурой и порфириковой структурой. Текстура пород обусловлена присутствием достаточно большого количества ксенолитов, представленных в основном обломками вмещающих толщ.

Порфириковые вкрапленники представлены мегакристаллами полностью серпентинизированного

Таблица 2. Характеристика калиевых ультраосновных и основных пород Украинского щита

Номер образца	Объект	Минеральный состав	Порода
293/11	Трубка Новоласпинская	[Ol], Phl, Ilm, Prv, Ti-Mag, Spn, Cal	кимберлит
396/46	Дайка Новоласпинская	[Ol], Phl, Ilm, Ti-Mag, Cal, Spn	»
1459-а	Трубка Южная	[Ol], Phl, Ilm, Ti-Mag, Chl	»
401/8	Трубка Южная	Cpx, Ms?, Chl, Ilm, Mag, Opaq	Fe-Ti базальт

Таблица 3. Состав слюд в породах восточно-приазовского комплекса

Компо- ненты	Номер образца													
	401/8			1459-а			293/11					396/46		
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
SiO ₂	56.73	56.53	51.68	43.69	44.05	43.08	44.30	43.58	41.27	44.12	43.03	43.13	40.15	43.35
TiO ₂	0.34	0.30	0.16	1.49	1.16	2.38	1.40	1.56	1.79	1.13	2.39	2.66	1.95	2.60
Al ₂ O ₃	20.54	20.77	19.42	9.98	11.58	12.94	12.00	12.08	12.90	11.63	12.84	12.95	15.11	12.61
Fe ₂ O ₃	0.00	0.00	1.67	0.00	1.54	1.46	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	8.31	8.15	12.84	7.31	5.22	5.58	6.27	7.08	4.28	6.58	6.80	6.68	4.59	7.28
MnO	0.00	0.17	0.17	0.13	0.00	0.01	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.
MgO	5.07	5.83	7.04	28.06	25.25	23.66	25.00	24.78	26.96	24.94	23.80	23.69	25.48	24.42
CaO	0.51	0.46	0.49	0.09	0.07	0.13	0.15	0.00	0.08	0.08	0.01	0.22	0.26	0.25
Na ₂ O	0.00	0.21	0.00	0.01	0.34	0.00	0.28	0.18	0.07	0.24	0.39	0.24	0.02	0.24
K ₂ O	8.17	7.93	6.56	8.35	10.71	10.46	10.33	10.66	9.87	10.81	10.59	10.33	9.93	9.12
Cl	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	He опр.	0.00	0.00	0.00	0.01	0.04	0.08	0.03	0.08
Сумма	99.67	100.35	100.03	99.11	99.92	99.70	99.73	99.92	97.22	99.54	99.89	99.98	97.52	99.95
Si(IV)	7.3	7.3	6.9	6.0	6.0	5.9	6.0	6.0	5.7	6.1	5.9	5.9	5.6	5.9
Al(IV)	0.7	0.7	1.1	1.6	1.9	2.1	1.9	2.0	2.1	1.9	2.1	2.1	2.4	2.0
Fe(IV)	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Ti(IV)	0.0	0.0	0.0	0.2	0.1	0.2	0.0	0.1	0.2	0.1	0.0	0.0	0.0	0.1
Al(VI)	2.5	2.4	1.9	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0
Ti(VI)	0.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.2	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	0.3	0.2	0.2
Fe ³⁺	0.0	0.0	0.2	0.0	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Fe ²⁺	0.9	0.9	1.4	0.8	0.6	0.6	0.7	0.8	0.5	0.8	0.8	0.8	0.5	0.8
Mn ²⁺	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Mg	1.0	1.1	1.4	5.7	5.2	4.8	5.1	5.1	5.6	5.1	4.9	4.8	5.3	5.0
Ca	0.1	0.1	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
Na	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	0.1	0.0	0.1	0.1	0.1	0.0	0.1
K	1.3	1.3	1.1	1.5	1.9	1.8	1.8	1.9	1.8	1.9	1.9	1.8	1.8	1.6
Катионы	13.8	13.9	14.2	15.8	16.1	15.7	15.8	15.9	15.9	15.9	15.8	15.7	15.9	15.6
mg#	0.52	0.56	0.47	0.87	0.89	0.86	0.88	0.86	0.92	0.87	0.86	0.86	0.91	0.86 ¹

¹ Формульный состав пересчитан на 24 (O, OH).

оливина и частично хлоритизированного флогопита. Псевдоморфозы серпентина по оливину нередко зональны, что, по-видимому, свидетельствует о зональности самих кристаллов оливина. Составы серпентина заметно варьируют, указывая на различную магнезиальность первичных

минералов. Так, в образце 293/11 максимальная mg# серпентина составляет 0.9. Это псевдоморфозы по крупным мегакристам оливина. Магнезиальность серпентина в основной массе ниже и составляет 0.82. В этом же образце встречены зональные псевдоморфозы с mg# центра зерна 0.78

Таблица 4. Состав ильменита в породах восточно-приазовского комплекса

Компо- ненты	Номер образца								
	401/8		1459-а		293/11				396/46
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
SiO ₂	0.13	0.18	0.02	0.22	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
TiO ₂	46.71	46.39	48.09	46.19	55.13	50.47	54.08	51.38	51.62
Al ₂ O ₃	0.30	0.30	0.15	0.29	0.43	0.18	0.44	0.01	0.13
Cr ₂ O ₃	0.00	0.00	2.04	2.03	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
FeO	48.86	48.44	41.26	44.96	27.92	42.56	32.86	40.95	40.58
MnO	3.79	4.37	0.33	6.19	0.56	4.32	0.37	4.80	6.32
MgO	0.00	0.00	8.12	0.00	15.86	2.36	12.25	2.75	1.12
CaO	0.21	0.33	0.00	0.12	0.10	0.11	0.00	0.12	0.22
30									
Ti	0.88	0.87	0.85	0.87	0.93	0.92	0.93	0.94	0.96
Al	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.00	0.00
Cr	0.00	0.00	0.04	0.04	0.00	0.03	0.00	0.03	0.02
Fe ⁺³	0.23	0.24	0.25	0.20	0.14	0.12	0.12	0.09	0.06
Fe ⁺²	0.80	0.78	0.56	0.74	0.38	0.75	0.51	0.74	0.78
Mn	0.08	0.09	0.01	0.13	0.01	0.09	0.01	0.10	0.13
Mg	0.00	0.00	0.29	0.00	0.53	0.09	0.42	0.10	0.04
Ca	0.01	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.01

Примечание. Составы измерены на микрозонде CamScan 4DV с EDS AN 10000 в МГУ им. М.В. Ломоносова. Суммы приведены к 100 %.

и краевой зоны 0.82. По-видимому, происходил захват расплавом первично ксеногенного оливина, который в дальнейшем обрастал каймой более магнезиального оливина, по составу соответствующего минералу основной массы пород. Таким образом, в кимберлитах трубки Новоласпинская имеется, по крайней мере, три генерации оливина. В образце 396/46 из одноименной дайки первичный оливин был более железистым (mg# серпентина основной массы составляет 0.72).

В изученных кимберлитах можно выделить две генерации флогопита. Флогопит-I, величина магнезиальности которого mg# = 0.86–0.88, представляет собой крупные мегакристы размером до 1 см. Мелкие чешуйки флогопита-II с mg# = 0.86–0.92 распределены в основной массе породы в количестве около 3–5% от ее общего объема. Химические составы слюд обеих генераций довольно близки. Вместе с тем слюды основной массы характеризуются немногим более низкими содержаниями TiO₂, чем флогопит-I (1.1–2.4 и 1.4–2.7 мас. % соответственно), а также значительными вариациями Al₂O₃ и K₂O.

В образце 1459-а встречен ксенокристалл пикроильменита (табл. 4, ан. 3) размером около 6 мм, с содержанием MgO = 8.1 мас. % и MnO = 0.3 мас. %. Вокруг этого зерна развита кайма Mn-содержащего ильменита (табл. 4, ан. 4) с довольно значительной примесью MnO = 6.2 мас. % и отсутствием MgO. В обр. 293/11 также определен пикроильменит с 15.86 мас. % MgO (табл. 4, ан. 5). Заметим, что пикроильменит – это характерный минерал кимберлитов.

Помимо фенокристов оливина (полностью замещенного серпентином) и мелких чешуек флогопита, хлорит-серпентиновая основная масса пород содержит пикроильменит и перовскит, титаномагнетит и сфен. Среди вторичных минералов, помимо вышеперечисленных серпентина и хлорита, также встречены карбонаты. Из трех детально изученных образцов кимберлит дайки Новоласпинская (обр. 396/46) в основной массе содержит значительное (около 25%) количество микролитов кальцита.

Образец 401/8 из трубки Южная резко отличается от описанных выше. Это массивная темная

порода, частично раскристаллизованная, с равнозернистой структурой. Породообразующими фазами являются клинопироксен ($mg\# = 0.75-0.78$), по составу отвечающий авгиту, и существенно калиевый ($K_2O = 6.6-8.2$ мас. %), с величиной магнезиальности $mg\# = 0.47-0.56$ минерал слюдяного облика. По составу этот минерал наиболее близок мусковиту (табл. 3, ан. 1-3). Среди акцессорных минералов встречен ильменит с примесью MnO до 4.4 мас. % (табл. 4, ан. 1, 2), а также сульфиды, мелкая вкрапленность которых довольно равномерно распределена по породе. Основная масса породы полностью хлоритизирована. В нормативном составе этого образца отмечается значительное количество плагиоклаза (34%) и кварц (2%), тогда как нефелин отсутствует.

Таким образом, из четырех изученных образцов три представляют собой кимберлиты, а образец 401/8 имеет состав Fe-Ti базальта. Вероятно, порода была захвачена кимберлитовым расплавом при его продвижении через толщи вулканитов, относящихся к базальтоидному магматизму предшествующего этапа, известного в регионе (Кимберлитовые породы Приазовья, 1978).

ГЕОХИМИЧЕСКАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА КИМБЕРЛИТОВ

Геохимические особенности кимберлитов Восточного Приазовья рассматриваются в сопоставлении с геохимическими характеристиками кимберлитов севера Восточно-Европейской платформы, в первую очередь Архангельской провинции. При этом использовались преимущественно авторские анализы, выполненные в тех же лабораториях (Богатиков и др., 2001). Кроме того, для сопоставления привлечены данные по ранее выделенным и теперь ставшим общепринятыми группам кимберлитов – кимберлитам-I и -II Южной Африки, кимберлитам Западной Африки (Сьерра-Леоне, Коиду), Северной Австралии (Ариес) (Smith et al., 1985; Taylor et al., 1994). Полученные результаты представлены в виде серии диаграмм (рис. 3-11), на которых составы общепринятых групп кимберлитов и лампроитов показаны в виде полей, заимствованных из цитируемых работ (Богатиков и др., 2001; Smith et al., 1985; Taylor et al., 1994).

Петрогенные компоненты

Для отобранных из коллекции и проанализированных наименее контаминированных разновидностей кимберлитов был рассчитан индекс контаминации ($C.I. = (SiO_2 + Al_2O_3 + Na_2O)/(2K_2O + MgO)$), по Clement, 1982). Согласно рекомендациям Тейлора (Taylor et al., 1994), C.I. неконтаминированных кимберлитов для неслюдяных разновидностей составляет <1.5 , а для слюдяных – <1.7 . Как

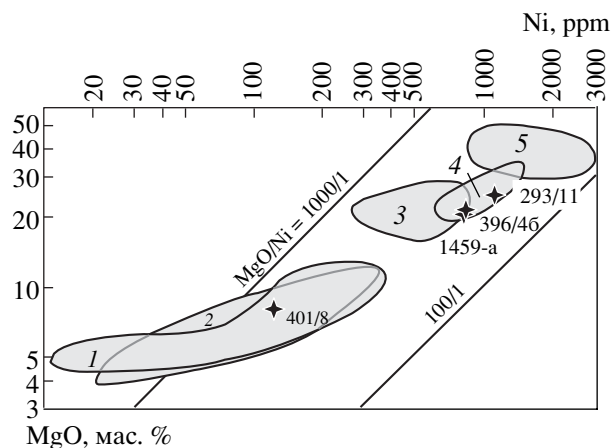


Рис. 3. Соотношение MgO–Ni в исследованных образцах Восточного Приазовья.

Поля составов пород: 1 – щелочные базальты, 2 – субщелочные базальты, 3 – пироксениты, 4 – кимберлиты, 5 – ультрабазиты.

видно из табл. 5, образец кимберлита 293/11 (трубка Новоласпинская) имеет низкий индекс контаминации ($C.I. = 1.27$), а в двух других образцах величина индекса контаминации приближается к критическому уровню ($C.I. = 1.72$ и 1.82).

На дискриминантной диаграмме MgO–Ni (рис. 3), предложенной И.П. Илупиным (Илупин, 1981), исследованные образцы разместились соответственно в полях кимберлитов (поле 4) и базальтов (область перекрытия полей 1 и 2). По соотношениям TiO_2-K_2O (рис. 4) и TiO_2-SiO_2 (рис. 5) точки составов кимберлитов попадают в поля неслюдяных кимберлитов группы IV Южной Африки и близки к кимберлитам Кепинского поля Архангельской провинции, которые также характеризуются повышенными содержаниями TiO_2 . Проанализированный базальт (обр. 401/8), судя по содержанию железа и титана ($FeO^{*1} = 16.2$ мас. %, $TiO_2 = 7$ мас. %), может быть отнесен к Fe-Ti базальтам.

Редкие элементы

Как и все кимберлиты, исследованные образцы обогащены редкими и редкоземельными элементами. Судя по распределению редких элементов (рис. 6), мантийные источники рассматриваемых проявлений калиевых магм были обогащены несовместимыми элементами. И хотя в целом по уровню обогащения они близки к кимберлитам Кепинского поля, вместе с тем в поведении некоторых элементов и их пар (Pb, Zr–Hf, Ba, Th) отмечаются заметные колебания. В первую очередь обращают на себя внимание повышенные кон-

¹ FeO* – суммарное содержание Fe в закисной форме.

Таблица 5. Главные (мас. %) и редкие (ppm) элементы в породах Восточного Приазовья

Компо- ненты	Номер образца				Компо- ненты	Номер образца			
	293/11	396/46	1459-а	401/8		293/11	396/46	1459-а	401/8
SiO ₂	30.98	38.23	33.40	38.35	Sr	877	562	1074	310
TiO ₂	3.98	3.29	4.30	7.05	Ta	8.6	4.3	10.6	5.6
Al ₂ O ₃	3.16	3.98	3.03	10.07	Nb	189	122	219	114
Fe ₂ O ₃	5.18	5.31	4.59	7.28	Hf	14.8	13.2	12.8	11.2
FeO	4.68	3.51	4.89	9.57	Zr	604	521	521	565
MnO	0.15	0.16	0.19	0.27	Y	15	17	17	41
MgO	25.98	22.27	20.78	8.06	Th	16.5	14.8	17.4	8.3
CaO	9.58	7.43	12.05	10.90	U	3.41	3.01	3.65	1.98
Na ₂ O	0.05	0.09	0.06	0.31	Pb	6.25	19.06	31.1 (3.18) ¹	5.71
K ₂ O	0.99	0.99	0.41	1.95	La	111.1	93.6	108.1	64.3
P ₂ O ₅	0.67	0.47	0.66	0.70	Ce	216.1	180.8	213.7	145.5
П.п.п.	14.34	14.36	15.63	4.98	Pr	23.6	19.9	23.7	20.0
Сумма	99.74	100.09	99.99	99.49	Nd	84.8	71.4	83.7	76.4
H ₂ O	9.48	9.92	8.4	5.42	Sm	11.73	10.31	12.44	15.81
CO ₂	4.65	3.80	6.88	0.20	Eu	3.08	2.63	3.18	4.75
mg#	68.3	67.6	64.1	28.0	Gd	8.62	7.86	9.01	14.01
C.I.	1.27	1.82	1.72		Tb	0.99	0.93	1.06	1.79
Cr	1380	1143	1051	27	Dy	3.85	3.83	4.12	8.67
Ni	1056	794	764	88	Ho	0.56	0.63	0.64	1.52
Co	82	61	62	57	Er	1.38	1.61	1.55	3.62
Sc	17	14	17	32	Tm	0.12	0.16	0.14	0.42
V	252	204	265	576	Yb	0.68	0.95	0.79	2.27
Rb	73	56	28	191	Lu	0.09	0.14	0.10	0.32
Cs	2.0	1.0	1.5	5.3	(La/Yb) _n	117.2	70.7	98.2	20.3
Ba	1022	1081	338	525					

Примечание. Величина магниальности $mg\# = 100Mg/(Mg + Fe_{общ})$. C.I. – индекс контаминации, рассчитанный по (Clement, 1982) (см. в тексте).

¹ Измерено методом изотопного разбавления в лаборатории изотопной геохронологии и геохимии ИГГД РАН (г. Санкт-Петербург).

центрации Pb (табл. 5) в образцах 1459-а и 396/46 (31.11 и 19.06 ppm соответственно), которые могут быть обусловлены примесями сульфидов. Напомним, что индекс контаминации в этих образцах несколько повышен (C.I. = 1.72 и 1.82). Отмечаются и аномально высокие содержания Zr и Hf (521–604 и 12.8–14.8 ppm соответственно) для всех проанализированных кимберлитов. Такие содержания изредка встречаются в кимберлитах, например, в Benfontein Sills, однако в кимберлитах северной окраины Восточно-Европейской платформы, включая Архангельскую провинцию, подобные концентрации не отмечались. Рас-

смотрим подробнее поведение отдельных групп редких элементов.

Высокозарядные элементы (Nb, Zr, Ta, Hf, Th, U) и Pb. На диаграмме распределения редких элементов (рис. 6) замечен небольшой минимум U для всех трех образцов кимберлита и отчетливый минимум Ta в обр. 396/46. Такое поведение высокозарядных элементов обычно свидетельствует о контаминации источника магматических пород веществом коры. Заметим, что повышенный цирконий – это, по-видимому, характерная черта региона: пироп из трубок Восточного Приазовья (Панов, 2001) содержит в среднем 66.5–85.4 ppm Zr, что значительно превышает обычные содер-

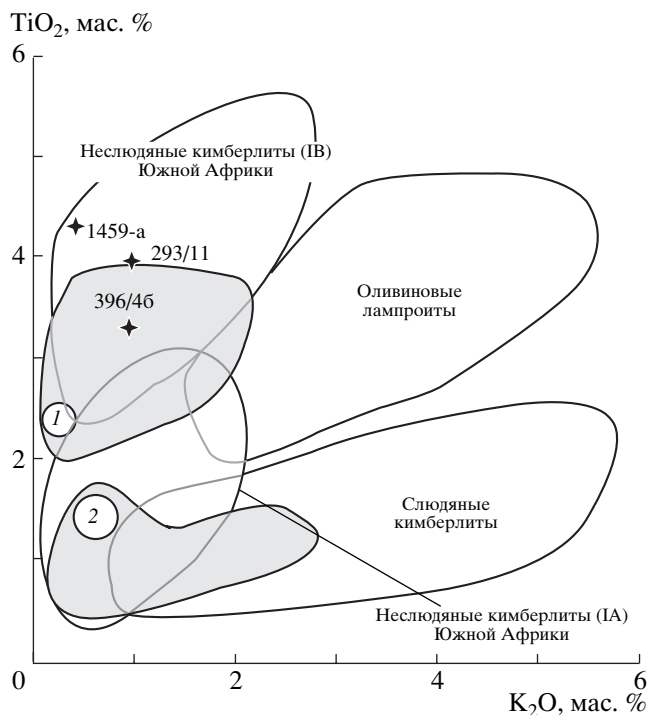


Рис. 4. Соотношение TiO_2 – K_2O в кимберлитах Восточного Приазовья.

Цифры в кружках – кимберлиты Архангельской провинции: 1 – Кепинское поле, 2 – Золотицкое поле.

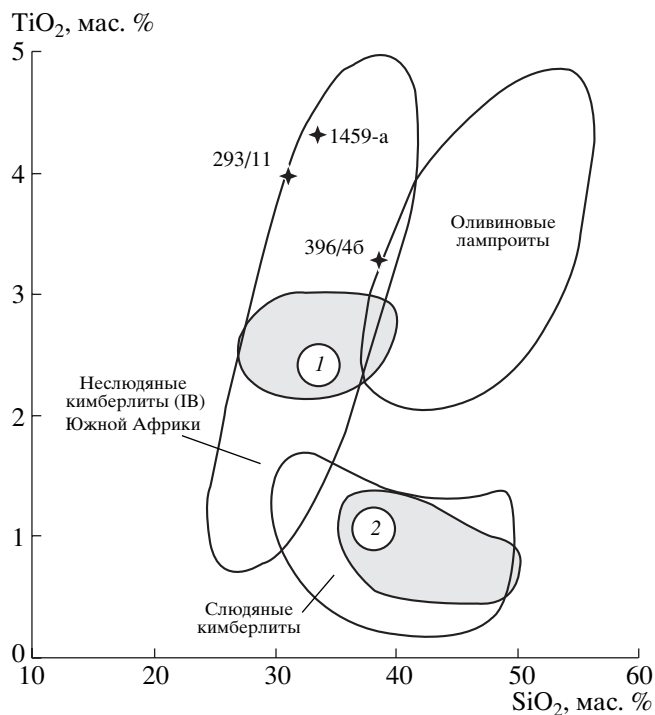


Рис. 5. Соотношение TiO_2 – SiO_2 в кимберлитах Восточного Приазовья.

Цифры в кружках – кимберлиты Архангельской провинции: 1 – Кепинское поле, 2 – Золотицкое поле.

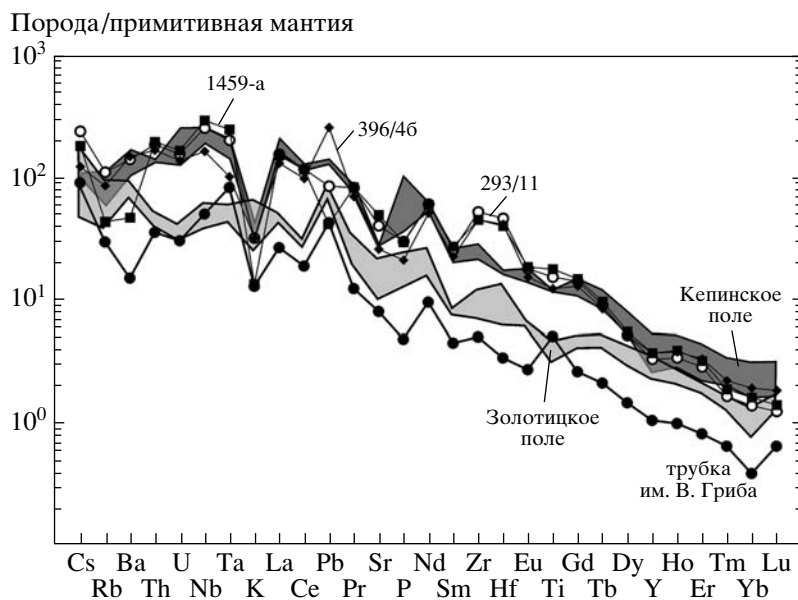


Рис. 6. Распределение редких элементов в кимберлитах Восточного Приазовья (данные для примитивной мантии по (Sun, McDonough, 1989)).

жания Zr в этом минерале; циркониевая минерализация типична для пород расположенного неподалеку Мариупольского комплекса. В связи с повышенным содержанием Zr в породах на вари-

ационной диаграмме Nb–Zr (рис. 7) точки их составов располагаются вне поля кимберлитов, в том числе и кимберлитов Архангельской провинции.

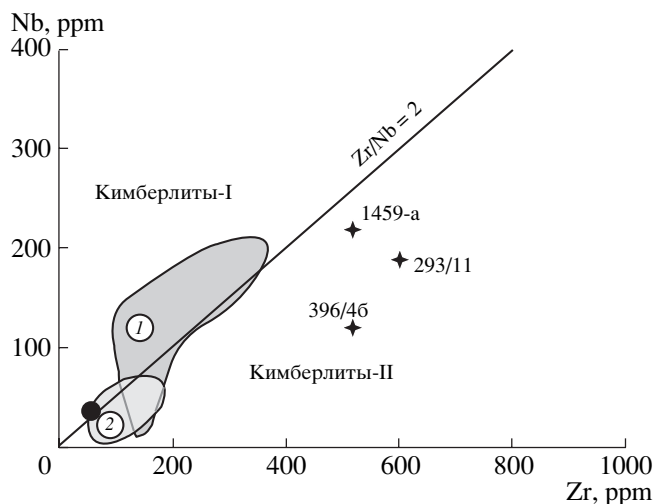


Рис. 7. Соотношение Zr–Nb в кимберлитах Восточного Приазовья.

Цифры в кружках – кимберлиты Архангельской провинции: 1 – Кепинское поле, 2 – Золотицкое поле. Поля кимберлитов по (Taylor et al., 1994).

Редкоземельные элементы. Содержание редкоземельных элементов в изученных образцах кимберлитов довольно устойчивое (табл. 5). Индикаторное отношение $(La/Yb)_n$ в кимберлитах Восточного Приазовья колеблется в пределах 98.6–163.8, тогда как в Fe–Ti базальте (трубка Южная, обр. 401/8) составляет всего 28.3. Характер распределения редкоземельных элементов (рис. 8) в кимберлитах Восточного Приазовья по-

вторяет практически распределение этих элементов в образцах Кепинского поля Архангельской провинции.

Изотопные отношения Sr, Nd, и Pb

Изотопные отношения Sr, Nd, Pb в изученных породах приведены в табл. 6 и 7 и представлены на рис. 9–11.

Изотопные отношения Sr и Nd (табл. 6, рис. 9). Изотопный состав Sr в исследованных образцах кимберлитов изменяется незначительно (ϵSr варьирует от 0.7 до 29) и заметно снижается в Fe–Ti базальте (ϵSr составляет –20.4). Отметим, что величина ϵSr в лампроитах Западной Австралии, например, варьирует от +94 до +228 (Fraser et al., 1985). Значения ϵNd в изученных породах располагаются в основном в области положительных значений. При этом в кимберлитах величина ϵNd варьирует в пределах от +1.9 до –0.1, а в Fe–Ti базальте эта величина возрастает до +3.3. На диаграмме ϵSr – ϵNd (рис. 9) точки составов кимберлитов Восточного Приазовья попадают в пределы или располагаются вблизи поля слабоалмазонасных кимберлитов Кепинского поля Архангельской провинции, а для образца 396/46 (дайка Новоласпинская) значения ϵSr – ϵNd почти совпадают со значениями, характерными для высокоалмазонасной трубки им. В. Гриба.

Изотопные отношения Pb в исследованных породах приведены в табл. 7 и на рис. 10, 11. На этих диаграммах изотопные составы Pb исправлены на радиогенный Pb, накопленный *in situ*. Вели-

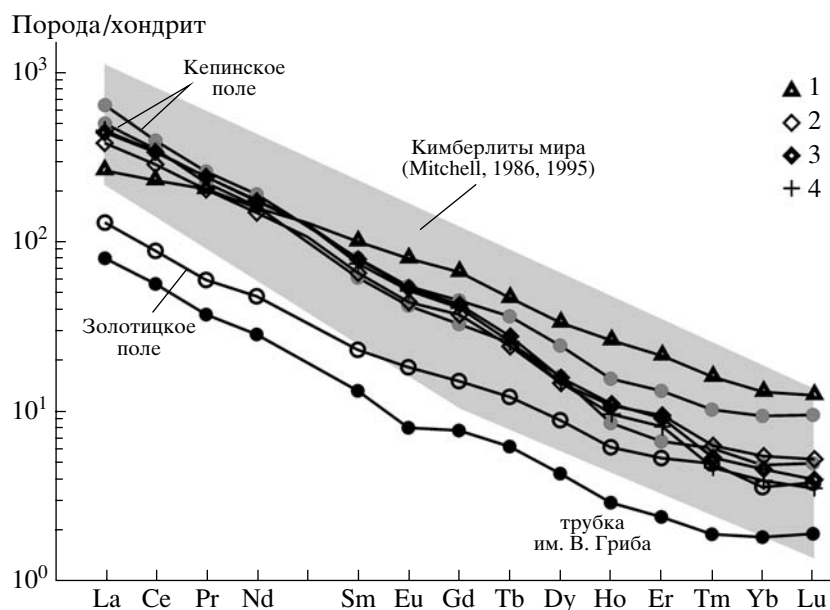


Рис. 8. Нормализованное к хондриту по (Sun, McDonough, 1989) распределение редкоземельных элементов в кимберлитах.

1 – Fe–Ti базальт, обр. 401/8; 2–4 – кимберлиты обр. 396/46 (2), обр. 1459-а (3), обр. 293/11 (4).

Таблица 6. Nd-Sr изотопные данные для пород Восточного Приазовья

Номер образца	Порода, минерал	Rb	Sr	$^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	$(^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr})_0$	ϵSr
293/11	Bt	610.0	31.73	57.30	1.017031 ± 15		
	WR	66.57	834.9	0.2307	0.705548 ± 28	0.704289	0.73
396/46	WR	54.96	552.3	0.2789	0.707806 ± 26	0.706276	28.97
	Bt	511.7	53.59	28.03	0.859588 ± 14		
1459-a	WR	26.51	1012	0.0757	0.706457 ± 33	0.706042	25.64
	WR	185.5	286.2	1.867	0.713082 ± 20	0.702795	-20.46
Номер образца	Порода, минерал	Sm	Nd	$^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$	$(^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd})_0$	ϵNd
293/11	Bt						
	WR	11.55	82.1	0.085	0.512445 ± 12	0.512232	1.7
396/46	WR	10.31	70.81	0.088	0.512360 ± 8	0.512138	-0.1
	Bt						
1459-a	WR	12.09	88.1	88.1	0.512464 ± 9	0.512242	1.9
	WR	15.54	79.97	0.1175	0.512609 ± 16	0.512313	3.3

Примечание. Bt – биотит, WR – вал породы.

$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ измерены относительно стандарта E&A с $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.70800$; $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ измерены относительно стандарта La Jolla с $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.511840$. Погрешность определения $^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd}$ 0.3%.

Первичные изотопные отношения, ϵSr и ϵNd рассчитаны на $t = 384$ млн. лет с учетом современных изотопных составов UR ($^{87}\text{Rb}/^{86}\text{Sr} = 0.825$ и $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr} = 0.7045$) и CHUR ($^{147}\text{Sm}/^{144}\text{Nd} = 0.1967$ и $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd} = 0.512638$).

Таблица 7. U-Pb-Th изотопные данные для пород Восточного Приазовья

Номер образца	Pb, ppm	U, ppm	$^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$	$^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	$^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$	Th, ppm	$^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$
Трубка Новоласпинская								
<i>кимберлит</i>								
293/11 WR	4.28	3.55	58.2	21.367 (17.832)	15.727 (15.535)	48.136	16.50	272.390
Дайка Новоласпинская								
<i>кимберлит</i>								
396/46 WR	14.63	3.19	14.36	19.009 (18.137)	15.679 (15.632)	40.456	14.84	67.282
Трубка Южная								
<i>кимберлит</i>								
1459-a WR	3.18	3.48	78.4	22.325 (17.566)	15.827 (15.569)	43.707	17.39	394.593
<i>Fe-Ti базальт</i>								
401/8 WR	4.01	1.82	32.8	20.803 (18.812)	15.843 (15.735)	45.762	7.64	138.628

Примечание. В скобках приведены изотопные отношения Pb, исправленные на $t = 384$ млн. лет. Для анализа использованы фракции +0.1 – 0.25 мм. WR – вал породы.

чина поправки зависит от возраста объектов и величин $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ и $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$, точность определения которых в совокупности с состоянием U-Pb и Th-Pb систем исследуемых объектов обуславливает надежность поправки. Погрешности определения $^{238}\text{U}/^{204}\text{Pb}$ в среднем составляют 0.5%. Ошибки расчета $^{232}\text{Th}/^{204}\text{Pb}$ связаны с погрешностями определения Th методом ICP-MS (10%), а также с тем, что определение содержания Th и Pb

проводилось из разных навесок и фракций образцов и разными методами (ICP-MS и изотопное разбавление соответственно).

На рис. 11 приведены модельные кривые эволюции изотопного состава Pb мантии, верхней и нижней коры. Параметры упрощенных моделей эволюции Pb в мантийном, верхнекоровом и нижнекоровом резервуарах могут быть использованы для сравнения с экспериментальными Pb-изо-

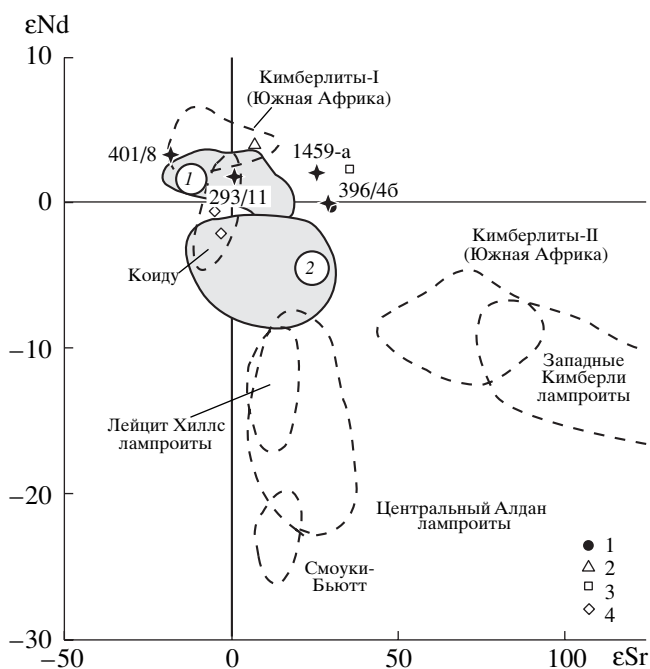


Рис. 9. Изотопный состав Sr и Nd в породах Восточного Приазовья в сравнении с кимберлитами и лампроитами мира.

1–4 – кимберлиты северной окраины Восточно-Европейской платформы: Верхотинское поле (трубка им. В. Гриба) (1), Кандакаша (2), Средний Тиман (3), Терский берег (4). Цифры в кружках – поля составов кимберлитов Архангельской провинции: 1 – Кепинское поле, 2 – Золотицкое поле. Поля кимберлитов и лампроитов мира по (Smith et al., 1985; Taylor et al., 1994).

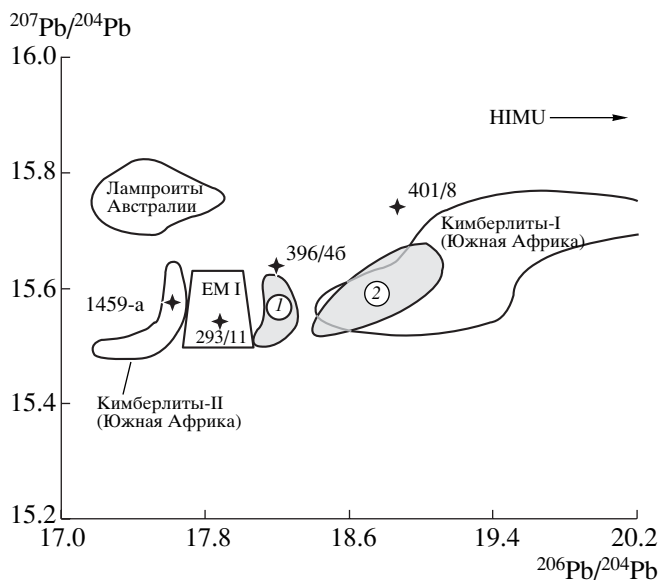


Рис. 10. Диаграмма отношений $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для кимберлитов Восточного Приазовья в сравнении с кимберлитами и лампроитами мира.

Поля кимберлитов и лампроитов мира по (Fraser et al., 1985; Smith, 1983; Nelson, 1989, 1992). Цифры в кружках – поля составов кимберлитов Архангельской провинции: 1 – Золотицкое поле, 2 – Кепинское поле.

топными данными. Мантийная модель предполагает три стадии эволюции Pb. Первая (от 4.57 до 4.50 млрд. лет) и вторая (от 4.50 до 2.2 млрд. лет) стадии соответствуют модели обедненной мантии, предложенной Неймарком (Неймарк, 1990). Третья стадия отвечает обогащению мантийного резервуара коровым веществом на рубеже 2.2 млрд. лет при увеличении μ от величины 8.27 до 10. В интервале 2.25–1.95 млрд. лет во внутриплитных областях происходит рифтогенез и субдукция корового материала в мантию на границах плит, во внутриконтинентальных поясах фиксируется проявление щелочно-базальтового и риолитового бимодального вулканизма (Минц, 1999). В рассматриваемый период, который является одним из важнейших этапов в истории Земли, почти полностью сформировалась гранитная оболочка, резко увеличилось K/Na отношение в гранитных породах, а также был проявлен обогащенный резервуар NIMU в истощенной мантии (Пушкарев, 1995). Следует отметить, что современные значения изотопных отношений Pb, рассчитанные по этой модели, близки к значениям, полученным (Zartman, Haines, 1988) для современной верхней мантии ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 18.47$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.58$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.50$). Упрощенные модели эволюции Pb верхней и нижней коры построены на основе модели (Stacey, Kramers, 1975). Она предусматривает заметное формирование континентальной коры начиная с 3.7 млрд. лет. Мы приняли, что с 3.7 млрд. лет параметры μ и κ изменились ($\mu = 10.6$, $\kappa = 3.8$ для верхней коры и $\mu = 8.6$, $\kappa = 4.5$ для нижней коры). Такие параметры эволюционных кривых приводят к получению современных значений изотопных отношений Pb, близких к рассчитанным (Zartman, Haines, 1988) для этих резервуаров ($^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 19.33$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.73$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 39.07$ для верхней коры и $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 17.62$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 15.35$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb} = 38.75$ для нижней коры).

Выше указывалось, что образцы кимберлитов трубок Южная и Новоласпинская имеют повышенный индекс контаминации. По-видимому, контаминация расплавов могла привести и к значительной гетерогенности в распределении Pb, наблюдаемой в пределах одного образца. Так, для обр. 1459-а содержание Pb, измеренное методом ICP-MS, на порядок превышает значение, полученное методом изотопного разбавления (31.11 и 3.18 ppm соответственно). В остальных образцах расхождение составляет 30–40%. В то же время содержания U, измеренные разными методами и из разных навесок образца, различаются на 4–8%.

Как видно на рис. 10 и 11, кимберлиты Восточного Приазовья обеднены радиогенным свинцом, подобно кимберлитам Золотицкого поля Архангельской провинции или даже кимберлитам II группы Южной Африки. Их значения варьируют в пределах: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 17.566–18.137,

$^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.535–15.632 и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 40.456–48.136. В то же время Fe-Ti базальт (обр. 401/8) отвечает обогащенным радиогенным стронцием породам мантии: $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 18.812, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 15.735 и $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ 45.762, приближаясь к значениям, характерным для кимберлитов-I группы Южной Африки.

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Проведенные исследования позволили определить индикаторные петролого-геохимические характеристики кимберлитов южного обрамления Восточно-Европейской платформы – трубок Восточного Приазовья, сопоставить их с особенностями кимберлитов севера платформы, а также выявить заметные различия между кимберлитами и базальтоидами, которые хотя и присутствуют в единых вулканических разрезах, но формировались, вероятно, из разных источников. Определен геохимический тип кимберлитов Восточного Приазовья. Они оказались близки наиболее распространенным на севере платформы кимберлитам, источником которых была слабо деплетированная мантия, близкая BSE (кимберлиты Кепинского поля в Архангельском регионе, Тимана, Терского Берега и др.). Геохимических аналогов кимберлитов Золотицкого поля (алмазоносные кимберлиты в Архангельском ареале) среди прецизионно изученных образцов Восточного Приазовья не встречено. Следует, конечно, оговориться, что глубокие изменения пород Восточного Приазовья весьма затрудняют применение прецизионных методов исследования, уменьшая их информативность. Отмечена только одна геохимическая особенность, характерная для всех изученных образцов, – это повышенные содержания Zr (521–604 ppm), что является, вероятно, особенностью состава мантии этого региона.

Кимберлиты Восточного Приазовья имеют повышенные содержания редкоземельных и редких элементов при отношении La/Yb около 100 (117–70), преимущественно положительные значения ϵNd , близкие к таковым в кимберлитах Кепинского поля Архангельской провинции и Тимана, а также в кимберлитах-I группы Южной Африки. Подобные значения характерны для участков мантии, несколько деплетированных относительно BSE. Изотопный состав Sr неконтаминированного образца кимберлита из трубки Новоласпинская (293/11, C.I. 1.27) близок к BSE; два других слабо контаминированных образца кимберлитов характеризуются слабо радиогенным изотопным составом Sr (ϵSr от +25 до +29). Предполагается, что кимберлиты с таким изотопным составом стронция, неодима и редких элементов образуются из астеносферной мантии, а их обогащенность редкими элементами связана с обогащением мантии непосредственно перед вы-

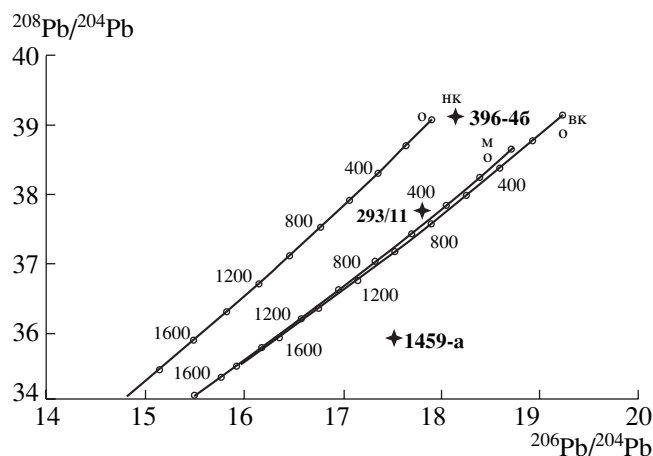


Рис. 11. Диаграмма отношений $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ – $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$ для кимберлитов Восточного Приазовья. Показаны модельные кривые эволюции Pb мантии (М), нижней коры (НК) и верхней коры (ВК). Пояснения см. в тексте.

плавлением кимберлитовых магм (например, южноафриканские кимберлиты-I группы, Smith, 1983).

Повышенные содержания Pb в двух образцах кимберлита (396/46 и 1459-а), вероятно, обусловлены контаминацией вмещающих толщ, судя по несколько повышенному индексу контаминации (C.I. 1.82, 1.72).

Pb-Pb возраст, рассчитанный по трем точкам (порода в целом, выщелат, остаток), составляет 390 млн. лет для образца 293/11 и 370 млн. лет для образца 1459-а, что в пределах погрешностей не противоречит возрасту кимберлитов (380 млн. лет), который был установлен Rb-Sr методом (настоящая работа) и ранее методом стратиграфии и др. (Кимберлитовые породы Приазовья, 1978).

Точки изотопных составов образцов кимберлитов Восточного Приазовья (рис. 11) попадают в область между кривыми эволюции свинца мантии и нижней коры.

Базальтоиды обогащены редкими и редкоземельными элементами, но слабее, чем кимберлиты. Показательно, что величина отношения La/Yb составляет всего 20.3. Fe-Ti базальт (обр. 401/8) обогащен радиогенным стронцием, имеет повышенное значение ϵNd (+3.3). Поведение Pb в породе достаточно стабильное: значения изотопных отношений $^{206}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{207}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, $^{208}\text{Pb}/^{204}\text{Pb}$, пересчитанные на возраст, составляют 18.812, 15.735 и 42.835 соответственно. Таким образом, базальты трубки Южная имеют геохимические характеристики пород, источник которых, по-видимому, располагался в несколько более деплетированной мантии, чем BSE, промежуточной между BSE и PREMA.

ВЫВОДЫ

Проведенные комплексные петролого-геохимические и минералогические исследования мантйных магматических пород Восточного Приазовья, подтвердив присутствие кимберлитов в этом объекте, показали следующее.

1. Кимберлиты и базальтоиды хотя и участвуют в строении единых геологических толщ, но формировались из мантйных источников, деплетированных в разной степени, – близких BSE (кимберлиты) и несколько более деплетированных, видимо, промежуточных между BSE и PREMA (базальты).

2. Кимберлиты Восточного Приазовья по вещественному составу (минералы-спутники, характер обогащения редкими и редкоземельными элементами, изотопный состав стронция и неодима) близки кимберлитам Кепинского поля Архангельска и ряда других ареалов севера Восточно-Европейской платформы (Средний Тиман и др.). Известный на севере Восточно-Европейской платформы Золотицкий тип кимберлитов (алмазоносный) среди изученных образцов Восточного Приазовья пока не обнаружен.

3. Необычное поведение Pb, по-видимому, обусловлено процессами контаминации, в связи с чем точки изотопных составов образцов кимберлитов Восточного Приазовья попадают в область между кривыми эволюции свинца мантии и нижней коры.

3. Судя по обогащению Zr всех изученных разновидностей пород, а также и минералов, породы мантии этого региона были, по-видимому, повсеместно обогащены этим элементом.

Благодарности. Благодарим за участие и помощь в работе Е.С. Богомолу, В.Ф. Гусеву, Н.М. Сергееву (ИГГД РАН). Авторы выражают глубокую признательность руководству и сотрудникам АК “АЛРОСА” за предоставленные образцы по трубкам Восточного Приазовья.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты №№ 03-05-64214, 03-05-06019), грантов Президента Российской Федерации для поддержки молодых российских ученых и ведущих научных школ (НШ-1251.2003.5, МК-1472.2003.05) и АК “АЛРОСА”.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Армстронг К.А., Роедер П.Л., Хельмштед Х.Х. Состав шпинелей кимберлитовой трубки С14 (озеро Кирклэнд, Онтарио) // Геология и геофизика. 1997. Т. 38. № 2. С. 429–439.

Беляцкий Б.В., Кемпе У., Левский Л.К. О Sm-Nd возрасте вольфрамитов и кварц-вольфрамитовых рудопроявлений рудных гор, Саксония, Германия // Докл. АН СССР. 1992. Т. 324. № 3. С. 621–625.

Богатиков 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.

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.

Васильченко В.В., Раздорожный В.Ф., Козарь Н.А. Перспективы алмазоносности Приазовского блока Украинского щита // Мінеральні ресурси України. 1999. № 3. С. 4–9.

Гейко Ю.В., Матеюк В.В., Металиди В.С. и др. Перспективы алмазоносности Украины / Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2003. С. 277–282.

Илупин И.П. Соотношение кимберлитов с другими горными породами и вопросы генезиса кимберлитовой магмы // Докл. АН СССР. 1981. Т. 261. № 5. С. 1198–1202.

Кимберлитовые породы Приазовья. М.: Наука, 1978. 320 с.

Князьков А.П., Васильченко В.В., Стрекозов С.Н. и др. Путеводитель экскурсии Международной научно-практической конференции “Прогнозирование и поиски коренных алмазных месторождений”, Симферополь–Судак–Волноваха. 1999.

Кононова В.А., Левский Л.К., Первов В.А. и др. Pb-Sr-Nd изотопные характеристики мантйных источников калиевых ультрабазитов и базитов севера Восточно-Европейской платформы // Петрология. 2002. Т. 10. № 5. С. 491–507.

Металиди И.С., Василенко В.Б., Гейко Ю.В., Зинчук Н.Н. Петрохимическая идентификация ультраосновных-щелочных пород Петровско-Кумачовского поля (Украина) / Проблемы прогнозирования, поисков и изучения месторождений полезных ископаемых на пороге XXI века. Воронеж: Воронежский государственный университет, 2003. С. 403–408.

Миц М.В. Геодинамические условия формирования и металлогения главных типов тектонических структур раннего докембрия / Под ред. Рундквиста Д.В. Металлогения рядов геодинамических обстановок раннего докембрия. М.: МПР РФ, РАН, Геокарт, РосГео, 1999. 399 с.

Неймарк Л.А. Изотопы свинца и коровая предыстория пород // Изотопная геохимия и геохронология. Л.: Наука, 1990. С. 22–37.

Панов Б.С., Гриффин В.Л., Панов Ю.Б. Особенности состава хромшпинелидов из кимберлитовых трубок Приазовья // Минералогический журнал. 1999. Т. 21. № 2/3. С. 53–60.

Панов Ю.Б. Типохимизм минералов-спутников алмаза из кимберлитов Приазовья: Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Киев: Ин-т геохимии, минералогии и рудообразования, 2001. 23 с.

Пушкарев Ю.Д. Геохронологические и изотопно-геохимические рубежи в развитии системы кора–мантия // Те-

- зисы докладов Всероссийского совещания "Главнейшие рубежи геологической эволюции Земли в докембрии и их изотопно-геохронологическое обоснование". С.-Петербург, 1995. С. 71.
- Цымбал С.Н., Татаринцев В.И., Князьков А.П.* Минералы глубинных парагенезисов из кимберлитов трубки Южная (Восточное Приазовье) // Минералогический журнал. 1996. Т. 18. № 5. С. 18–45.
- Чашка А.И., Смирнов Г.И., Тарасюк О.Н. и др.* Состояние и перспективы поисков алмазных месторождений на территории Приазовья // Минеральные ресурсы Украины. 1999. № 3. С. 33–35.
- 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.
- Fraser K.J., Hawkesworth C.J., Erlank A.J. et al.* Sr, Nd and Pb isotope and minor element geochemistry of lamproites and kimberlites // Earth Planet. Sci. Lett. 1985. V. 76. P. 57–70.
- Mitchell R.H.* Kimberlites: mineralogy, geochemistry and petrology. New York: Plenum Press, 1986. 442 p.
- Mitchell R.H.* Compositional variation of mica in kimberlites, orangeites, lamproites and lamprophyres // Extended Abstracts. 6th Int. Kimberlite Conf. Novosibirsk: United Institute of Geology, Geophysics and Mineralogy, 1995. P. 390–392.
- Nelson D.R.* Isotope characteristics and petrogenesis of the lamproites and kimberlites of central west Greenland // Lithos. 1989. V. 22. P. 265–274.
- Nelson D.R.* Isotopic characteristics of potassic rocks: evidence for the involvement of subducted sediments in magma genesis // Lithos. 1992. V. 28. P. 403–420.
- Smith C.B., Gurney J.J., Skinner E.M.M. et al.* Chemochemical character of Southern African kimberlites: a new approach based on isotopic constraints // Trans. Geol. Soc. South. Afr. 1985. V. 88. P. 267–280.
- Smith C.B.* Pb, Sr and Nd isotope evidence for sources of southern African Cretaceous kimberlites // Nature. 1983. V. 304. P. 51–54.
- Stacey J.S., Kramers J.D.* Approximation of terrestrial lead evolution by a two stage model // Earth Planet. Sci. Lett. 1975. V. 26. P. 207–221.
- Sun S.S., McDonough W.F.* Chemical and isotopic systematics of oceanic basalts: implications for mantle composition and processes / Eds Saunders A.D., Norry M.J. Magmatism in Ocean Basins. Geol. Soc. London Spec. Publ. 1989. V. 42. P. 313–345.
- 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. P. 4017–4037.
- Zartman R.E., Haines S.M.* The plumbotectonic model for Pb isotopic systematics among major terrestrial reservoirs – A case for bi-directional transport // Geochim. Cosmochim. Acta. 1988. V. 51. P. 1327–1339.