УДК 551.14+552.323.6

ПЕРСПЕКТИВЫ ПОИСКОВ АЛМАЗОНОСНЫХ КИМБЕРЛИТОВ В СЕВЕРО-ВОСТОЧНОЙ ЧАСТИ СИБИРСКОЙ ПЛАТФОРМЫ

Н.В. Соболев^{1,2}, А.В. Соболев³, А.А Томиленко¹, Д.В. Кузьмин^{1,2}, С.А. Граханов⁴, В.Г. Батанова³, А.М. Логвинова^{1,2}, Т.А. Бульбак¹, С.И. Костровицкий⁵, Д.А. Яковлев⁵, Е.Н. Федорова¹, Г.Ф. Анастасенко⁶, Е.И. Николенко¹, А.В. Толстов⁷, В.Н. Реутский¹

¹Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН, 630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия ²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия

³Институт геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, 119991, Москва, ул. Косыгина, 19, Россия

⁴Институт геологии алмаза и благородных металлов СО РАН, 677980, Якутск, просп. Ленина, 39, Россия

⁵Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1а, Россия

⁶Санкт-Петербургский государственный университет, 199034, Санкт-Петербург, Университетская наб., 7/9, Россия ⁷НИГП, АК АЛРОСА (ПАО), 678170, Мирный, ул. Ленина, 6, Республика Саха (Якутия), Россия

Объектами настоящего исследования являются триасовые гипабиссальные алмазоносные кимберлиты возрастом 220—245 млн лет, содержащие вкрапленники неизмененного оливина, наиболее близкие по времени к главному этапу внедрения Сибирской трапповой провинции (252 млн лет), имевшему место в течение менее 1 млн лет. На основании сравнительного изучения аналитическим методом высокой точности характера распределения примесей Ti, Ca, Cr, Al примерно в 1000 образцах вкрапленников оливина с содержанием форстерита Fo=[100Mg/(Mg+Fe)] от 78 до 93 продемонстрировано влияние траппов на состав литосферы.

Предприняты сравнительные комплексные исследования алмазов из ряда северных россыпей и триасовых кимберлитов, включая определение изотопного состава углерода. Согласно результатам хромато-масс-спектроскопического анализа субмикроскопических флюидных включений в алмазах северных россыпей и кимберлитов, установлены преобладающие углеводороды широкого спектра составов с подчиненным значением N₂, H₂O и CO₂. Учитывая ранее полученные результаты исследования находок субкальциевых Cr-пиропов и алмазов в нижнекаменноугольных гравелитах Кютюнгдинского грабена, сделан вывод о перспективности обнаружения палеозойских кимберлитов в районе Толуопского кимберлитового поля. Результаты комплексных исследований алмазов, индикаторных минералов и U/Pb изотопного датирования многочисленных образцов детритного циркона из базального горизонта карнийского яруса верхнего триаса участка Булкур в низовьях р. Лена свидетельствуют о вероятности обнаружения алмазоносных кимберлитов в пределах северо-восточной части Сибирской платформы.

Проблема возраста вероятных коренных источников алмазов рассматриваемого региона может быть решена путем комплексного подхода к определению U/Pb изотопного возраста цирконов, перовскитов и рутилов из разрабатываемых россыпей алмазов и из базального горизонта карнийского яруса.

Литосферная мантия, гипабиссальный кимберлит, оливин, алмаз, мезозой, U/Pb изотопное датирование, циркон, перовскит, рутил, Сибирская платформа.

PROSPECTS OF SEARCH FOR DIAMONDIFEROUS KIMBERLITES IN THE NORTHEASTERN SIBERIAN PLATFORM

N.V. Sobolev, A.V. Sobolev, A.A. Tomilenko, D.V. Kuz'min, S.A. Grakhanov, V.G. Batanova, A.M. Logvinova, T.A. Bul'bak, S.I. Kostrovitskii, D.A. Yakovlev, E.N. Fedorova, G.F. Anastasenko, E.I. Nikolenko, A.V. Tolstov, and V.N. Reutskii

The objects of study are Triassic hypabyssal diamondiferous kimberlites with an age of 220–245 Ma, containing macrocrysts of unaltered olivine. The latter are close in the time of formation to the main stage of intrusion of the Siberian Trap Province (252 Ma), which lasted less than 1 Myr. A comparative high-precision analytical study of the Ti, Ca, Cr, and Al impurity patterns of about 1000 olivine macrocryst samples with a forsterite content Fo = [100Mg/(Mg + Fe)] of 78 to 93 has demonstrated the effect of traps on the lithospheric composition.

A comprehensive comparative study of diamonds from northern placers and Triassic kimberlites, including determination of their carbon isotope composition, was performed. Chromatography–mass-spectroscopic analysis of submicron fluid inclusions in diamonds from northern placers and kimberlites has shown prevailing hydrocarbons of a wide range of compositions and subordinate contents of N_2 , H_2O , and CO_2 . These findings, together with the results of previous studies of subcalcic Cr-pyropes and diamonds found in the Lower Car-

© Н.В. Соболев[∞], А.В. Соболев, А.А Томиленко, Д.В. Кузьмин, С.А. Граханов, В.Г. Батанова, А.М. Логвинова, Т.А. Бульбак, С.И. Костровицкий, Д.А. Яковлев, Е.Н. Федорова, Г.Ф. Анастасенко, Е.И. Николенко, А.В. Толстов, В.Н. Реутский, 2018 [∞]e-mail: sobolev@igm.nsc.ru DOI: 10.15372/GiG20181012 boniferous gritstones of the Kyutyungde graben, lead to the conclusion that the Toluopka kimberlite field is promising for Paleozoic kimberlites. The results of comprehensive studies of diamonds and indicator minerals and U/Pb isotope dating of numerous detrital zircon samples from the basal horizon of the Carnian Stage (Upper Triassic) of the Bulkur site in the lower reaches of the Lena River suggest the presence of diamondiferous kimberlites within the northeastern Siberian Platform.

The age of the probable primary diamond sources in the study area can be evaluated by an integrated U/Pb isotope dating of zircons, perovskites, and rutiles from the developed diamond placers and from the basal horizon of the Carnian Stage.

Lithospheric mantle, hypabyssal kimberlite, olivine, diamond, Mesozoic, U/Pb isotope dating, zircon, perovskite, rutile, Siberian Platform

введение

В ряду проблем геологии и освоения минеральных ресурсов Российской Арктики, рассмотренных в двух специальных выпусках журнала «Геология и геофизика», важное значение имеет оценка потенциала коренной и россыпной алмазоносности этой слабоосвоенной огромной территории [Добрецов, Похиленко, 2010; Добрецов, Конторович, 2013].

В пределах северо-восточной части Сибирской платформы известно более 700 кимберлитовых тел, локализованных в 15 полях палеозойского и мезозойского возрастов (рис. 1), с очень низкой алмазоносностью, за исключением тр. Малокуонапская триасового возраста в Куранахском кимберлитовом поле, содержание алмазов в которой приближается к промышленному [Зинчук, Коптиль, 2003]. Достоверное установление возраста внедрения кимберлитов изотопными методами является важнейшей задачей изучения их геологического положения [Дэвис и др., 1980; Брахфогель, 1984; Кинни и др., 1997; Зайцев, Смелов, 2010]. Указанная трубка наряду с кимберлитами Харамайского поля, значительная часть которых является слабоалмазоносными [Griffin et al., 2005; Черенкова, Черенков, 2007], с U/Pb возрастом 245 млн лет [Кинни и др., 1997] наиболее близка по времени к главному этапу внедрения Сибирской трапповой провинции 252 млн лет назад, имевшему место в течение менее 1 млн лет [Burgess et al., 2015]. Триасовый этап внедрения посттрапповых кимберлитов был подтвержден еще в 1980 г. U/Pb датированием цирконов в институте Карнеги, США [Дэвис и др., 1980], включая слабоалмазонос-



ную тр. Поздняя Лучаканского поля и детритовые цирконы россыпи р. Эбелях. В связи с недостаточной изученностью триасовой алмазоносной тр. Малокуонапская доступна только ограниченная информация по особенностям глубинных ксенолитов, представленных гипербазитами [Харькив и др., 1998]. Однако широкая серия составов ксенолитов гипербазитов и эклогитов известна в триасовых кимберлитах Харамайского поля [Griffin et al., 2005; Черенкова, Черенков, 2007].

Рис. 1. Схема расположения мезозойских (1) и палеозойских (2) кимберлитовых полей в пределах Сибирской платформы, по [Соболев и др., 2013] с лополнениями.

1-6 — показано приблизительное положение кимберлитовых трубок Малокуонапская и Университетская (1) в пределах Куранахского кимберлитового поля; Поздняя (2) в пределах Лучаканского поля, кимберлитовых трубок Харамайского поля (3); Удачная Далдынского поля (4); трубок Обнаженная, Оливиновая Куойкского поля (5); тр. Ивушка Толуопского поля (6). Врезка — положение региона исследований.

Внедрению серии девонских кимберлитов, в число которых входят все известные разрабатываемые коренные месторождения алмазов Якутии с U/Pb возрастом по цирконам 362 — 344 млн лет [Дэвис и др., 1980], также предшествовало излияние Вилюйской трапповой провинции с возрастом ⁴⁰Ar/³⁹Ar 373.4 ± 0.7 млн лет [Courtillot et al., 2010]. Интерес к изучению магматизма Сибирской платформы существенно повысился в связи с выявлением в северной ее части крупной изверженной провинции с возрастом 1470—1500 млн лет [Гладкочуб и др., 2016; Эрнст и др., 2016]. Серия целенаправленных исследований [Агашев и др., 2004; Sun et al., 2014] подтвердила ранее полученные результаты изотопного возраста кимберлитов Якутии [Дэвис и др., 1980].

Присутствие в рассматриваемом районе разновозрастных триасовых и юрских гипабиссальных кимберлитов, содержащих неизмененный оливин в серпентин-карбонатной либо карбонатной основной массе [Mitchell, 2008], близость возраста внедрения некоторых гипабиссальных кимберлитов, включая алмазоносные [Зинчук, Коптиль, 2003], к главному этапу внедрения Сибирской трапповой провинции [Burgess et al., 2015] открывает возможности оценки эффекта влияния траппов на состав литосферы, до ее глубинных зон, отмеченных присутствием алмазов вместе с неизмененным оливином в отдельных кимберлитовых трубках триасового возраста [Sobolev et al., 2017]. Алмазоносные кимберлиты выносят материал наиболее глубинных частей литосферы и могут служить для зондирования ее состава. С целью оценки возможного влияния Сибирской трапповой провинции на состав литосферы необходим выбор кимберлитов, максимально приближенных ко времени излияния траппов и в то же время сохранивших первичные особенности состава минералов, в частности, оливинов. Примесные элементы в оливинах, включая Ti, Cr, Ca, Al, отчетливо реагируют на метасоматические изменения и повышение температуры литосферы, сохраняющееся после внедрения траппов [Соболев и др., 2015а, б]. На этой же территории открыты многочисленные крупные россыпные месторождения алмазов преимущественно четвертичного возраста, коренные источники которых не установлены [Зинчук, Коптиль, 2003; Граханов и др., 2007].

В предлагаемой статье приведены результаты сравнительных комплексных исследований алмазов (ИК-спектроскопия и определение изотопного состава углерода) из ряда северных россыпей, слабоалмазоносных трубок и кимберлитов с повышенной алмазоносностью, включая результаты хромато-массспектрометрического анализа состава летучих компонентов из флюидных включений в алмазе из триасовой тр. Поздняя Лучаканского района в сопоставлении с типичными алмазами некоторых северных россыпей, учитывая предположение о возможной роли глубинных углеводородов и CO₂ в образовании алмазов [Соболев, 1960]. В работе также обсуждаются возможности оценки возраста алмазов из россыпей с повышенной достоверностью и представительностью.

МЕЗОЗОЙСКИЕ ТРАППЫ И КИМБЕРЛИТЫ

Изучение геологической истории и магматизма Сибирской платформы открывает широкие возможности для выяснения масштаба влияния на состав литосферы пермотриасовой Сибирской трапповой провинции, являющейся крупнейшей платобазальтовой провинцией Земли, доставившей на поверхность более 5 млн км³ изверженных пород менее чем за 1 млн лет на границе пермского и триасового периодов 252 млн лет [Burgess et al., 2015]. Сходство этой провинции с другими провинциями земного шара отмечалось еще в 1930-е годы, когда подчеркивалось, что геологическая карта Южно-Африканской платформы, где широким развитием характеризовалась формация Кару, «весьма похожа на геологическую карту Сибирской платформы» [Соболев, 1936, с. 191]. Это сопоставление послужило началом обоснования научного прогноза алмазоносности Сибирской платформы.

Как сказано выше, наиболее близкими по возрасту к главному этапу внедрения Сибирской трапповой провинции являются алмазоносные кимберлиты Куранахского (трубки Малокуонапская и Университетская) и Харамайского полей, внедрившиеся в интервале 245—226 млн лет [Кинни и др., 1997; Sun et al., 2014].

В тр. Малокуонапская выявлены только обломки пироповых пироксенитов, серпентинизированных дунитов и гарцбургитов [Харькив и др., 1998]. Главная информация по опробованию глубинных зон литосферы в триасе содержится в результатах исследования комплекса ксенолитов из кимберлитов Харамайского поля.

Харамайское кимберлитовое поле расположено у северо-западной границы Якутской алмазоносной провинции (см. рис. 1), вблизи юго-западной границы Анабарского щита. На площади около 600 км² обнаружено свыше 160 кимберлитовых тел, почти половина которых представлена трубками, а половина — дайками [Griffin et al., 2005; Черенкова, Черенков, 2007]. Особенности содержания примесей Cr₂O₃ и CaO в пиропах, определяющих степень потенциальной алмазоносности кимберлитовых тел [Соболев и др., 1969б; Sobolev et al., 1973; Туркин, Соболев, 2009] изучены для четырех даек и 19 кимберлитовых трубок поля, в общей сложности для 2100 зерен пиропов с переменным содержанием Cr₂O₃ из концентрата тяжелой фракции. Принципиальных различий в составе пиропов из разного количества опробованных даек и трубок не выявлено. Для тех и других установлены субкальциевые Сг-пиропы и пиропы с высоким, до 10 мас. % содержанием Сг₂О₂. В суммарной выборке выявлено восемь зерен субкальциевых Сг-пиропов, аналогичных по составу включениям в алмазах [Черенкова, Черенков, 2007], что не противоречит результатам опробования, характеризующим большинство кимберлитовых трубок и даек в качестве слабоалмазоносных с содержанием алмазов не выше 0.05 кар/т [Griffin et al., 2005]. Ксенолиты разнообразных перидотитов и эклогитов кратко охарактеризованы в работе [Черенкова, Черенков, 2007] и в одной из статей настоящего выпуска [Тычков и др., 2018]. Характерны также ксенолиты гранатовых вебстеритов и гранат-шпинелевых перидотитов с реакционными взаимоотношениями граната и шпинели. Подобные породы типичны для юрской тр. Обнаженная [Милашев, 1960; Соболев, Соболев, 1964, 1967]. Следует особо подчеркнуть находку ксенолита пиропового дунита, содержащего пироп с Cr₂O₂ = 7.78 и CaO = 2.45 мас. %, близкого по составу аналогичным ксенолитам тр. Удачная, которая является первой в триасовых кимберлитах Якутии [Черенкова, Черенков, 2007]. К числу необычных ксенолитов гипербазитов, типичных для палеозойской тр. Удачная [Соболев, 1974: Boyd et al., 1997], относится ксенолит катаклазированного пиропового перидотита, гранат которого содержит $TiO_2 = 0.80$ мас. %, а состав клинопироксена с 100Ca/(Ca+Mg) = 34.6 свидетельствует о высокой температуре образования породы [Черенкова, Черенков, 2007]. Разнообразием парагенезисов и состава гранатов и пироксенов характеризуются эклогиты, среди которых установлены высокожелезистые разности, содержащие рутил, ильменит и циркон. Для таких эклогитов типичны ориентированные вростки ильменита в рутиле, аналогичные описанным для кимберлитов трубки Мир и Южной Африки [Sobolev, Yefimova, 2000]. Присутствие высокожелезистых эклогитов отличает общий комплекс эклогитовых ксенолитов Харамайского поля от детально изученных эклогитов трубок Мир и Удачная [Beard et al., 1996; Snyder et al., 1997].

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДЫ

Основные аналитические исследования оливинов и алмазов проводили в Аналитическом центре ИГМ СО РАН. Анализы оливинов выполняли в полированных шлифах гипабиссальных кимберлитов и в препаратах, изготовленных при тщательном ручном измельчении кимберлитов с высвобождением отдельных зерен оливинов и последующим монтированием их в шашки из эпоксидной смолы.

Определение содержания петрогенных (Si, Fe, Mg) и примесных элементов (Al, Cr, Ti, Mn, Ca, Ni, Co) оливинов выполнялись преимущественно с помощью рентгеновского микроанализатора JEOL JXA 8100 методом высокой точности [Соболев и др., 2009а] с использованием апробированных эталонов [Лаврентьев и др., 1974], а также P, Zn, Na, включая элементные карты на все элементы, на микроанализаторе JXA 8230 в университете Фурье, Гренобль, Франция [Ваtanova et al., 2015].

Спектры ИК-поглощения алмазов получены с помощью ИК-Фурье спектрометра Bruker Vertex 70 с ИК-микроскопом HYPERION 2000. Спектральное разрешение составляло 1 см⁻¹. Концентрация дефектов определена по известным соотношениям, полученным в работах [Boyd et al., 1994, 1995] для А- и В1-центров.

Анализ газовой смеси, извлеченной из кристаллов алмаза при ударном их разрушении, был выполнен на газовом хромато-масс-спектрометре Thermo Scientific (USA) DSQ II MS/Focus GC [Tomilenko et al., 2015; Sokol et al., 2017a, b, 2018]. Препараты помещали в специальное устройство, включенное в газовую схему хроматографа перед аналитической колонкой, прогревали при 160 °C 133 мин в токе газа-носителя Не и при помощи пробойника разрушали. Старт анализа синхронизировали с моментом разрушения образца. Перед «рабочим» анализом и после него проводили холостые онлайн-анализы, позволяющие контролировать выделение сорбированных поверхностью образца газов, в том числе и атмосферных компонентов, а по окончании этого процесса записывать бланк системы. Относительные концентрации летучих компонентов в разделяемой смеси установлены методом нормировки: сумму площадей всех хроматографических пиков анализируемой смеси приравнивали к 100 %, а по величине площади отдельного компонента определяли его процентное содержание в анализируемой смеси.

ОСОБЕННОСТИ СОСТАВА ОЛИВИНОВ РАЗНОВОЗРАСТНЫХ КИМБЕРЛИТОВ

Магнезиальный оливин, содержащий около 90 % форстеритового компонента, является главной составной частью всех кимберлитов [Wagner, 1914; Алмазные месторождения..., 1959], но в подавляющем большинстве случаев представляет собой полные псевдоморфозы серпентина. Систематическое изучение состава оливина оказалось возможным только для редкой разновидности — гипабиссального кимберлита [Mitchell, 2008], сохранившегося в виде отдельных блоков и жил в ряде разрабатываемых коренных месторождений алмазов. Исключение представляют только отдельные кимберлитовые тела Гренландии [Arndt et al., 2010], Южной Африки [Howarth, Taylor, 2016] и Канады [Brett et al., 2009; Foley et al., 2013], содержащие преимущественно неизмененный оливин [Brett, 2009]. Однако в послед-

ние два десятилетия статус классического объекта исследований приобрела кимберлитовая тр. Удачная-Восточная, являющаяся одним из крупнейших разрабатываемых месторождений алмазов России. Здесь в процессе эксплуатации на глубине около 400 м выявлен крупный блок гипабиссального кимберлита, практически без серпентина, с содержанием до 60 об. % неизмененного оливина [Kamenetsky et al., 2004, 2008, 2009a,b; Соболев и др., 2015a].

Детальные исследования состава внутренних (ядер) и внешних (кайм) зон вкрапленников оливина разных размеров, относимых к оливину I, — ксеноморфные, часто крупные вкрапленники, и оливину II — идиоморфные вкрапленники, редко достигающие размера 1 мм [Kamenetsky et al., 2008, 2009а], продемонстрировали близкий состав реликтовых ядер и отличающийся состав узких внешних кайм [Kamenetsky et al., 2008; Соболев и др., 2015а]. Однако главный вывод позволили сделать результаты изучения редких минеральных включений в ядрах оливина. Если в начальный период изучения включений были выявлены только редкие вкрапленники клинопироксена и ортопироксена [Sobolev et al., 1989; Kamenetsky et al., 2009b], то дальнейшие исследования позволили установить несколько вкрапленников оливина I и оливина II, содержащих включения пиропа переменного состава с примесью Cr₂O₃ (мас. %) от 1.40 до 9.14 [Соболев и др., 2015а]. Одновременное присутствие клинопироксена в некоторых образцах и полное соответствие соотношения Cr₂O₃ и CaO «лерцолитовому тренду» [Соболев др., 19696; Sobolev et al., 1973] позволили сделать вывод, что, по крайней мере, часть реликтового оливина в кимберлитах относится к лерцолитовому парагенезису с повышенным содержанием Ті (до 200 г/т) [Соболев и др., 2015а]. Другая часть, доказанная первой находкой ксенолита алмазоносного серпентинита в тр. Айхал, Якутия [Соболев, 1969а], содержащего субкальциевый Сг-пироп, и серией других последующих находок, относится к мегакристаллическим пироповым перидотитам и является индикатором алмазоносности кимберлитов. Важным, по нашему мнению, результатом является выявление неоднородного распределения фосфора в центральных зонах (ядрах) некоторых изученных оливинов. Такая неоднородность, наряду с распределением других примесей, в частности, Ti, Ni и Ca, показана для оливина тр. Малокуонапская [Соболев и др., 2015а]. Подобный, но более интересный пример выявлен для оливина из другой триасовой трубки того же Куранахского поля — Университетская. На элементных картах (рис. 2) показана зональность по Р с образованием тонкой каймы, обогащенной Р. Похожая, но менее четкая зональность установлена также по Ti (400—530 г/т). Зональность оливина по P (100—250 г/т) часто



Рис. 2. Элементные карты, демонстрирующие неоднородное распределение примесей P_2O_5 и TiO₂ наряду с однородными распределениями примесей Cr_2O_3 , MgO и CaO в центре вкрапленника оливина из тр. Университетская.

BSE — изображение оливина в обратнорассеянных электронах.



Рис. 3. Соотношение содержания форстерита (Fo) и примесей CaO и Al₂O₃:

в центре (1) и крае (2) оливинов трубок Малокуонапская, Оливиновая, Университетская и трубок Харамайского поля (трубки Ачтах, Эклогит и Базовая); 3 — аналогичные данные для центра оливинов тр. Удачная-Восточная, 4 — то же, для края оливинов тр. Удачная-Восточная, 10 же, для края оливинов тр. Удачная-Восточная. Пояснения см. в тексте.



Рис. 4. Соотношение содержания форстерита (Fo) и примесей Cr₂O₃ и TiO₂ в оливинах тех же трубок.

Усл. обозн. см. на рис. 3.

получается в результате быстрого роста кристалла [Milman-Barris et al., 2008]. С Ті может получаться такая же зональность либо за счет колебания его содержания в расплаве, например, в результате подачи новой порции расплава. В любом случае сохранение зональности оливина свидетельствует о том, что время экспозиции кристалла и расплава было коротким, и процесс явно связан с кимберлитом.

На основании около 1000 анализов центральных однородных зон оливинов из гипабиссальных кимберлитов разновозрастных трубок сравнивались распределения содержания Al_2O_3 , CaO, Cr_2O_3 и TiO_2 наряду с переменным содержанием FeO, а следовательно, форстерита (Fo = [100Mg/(Mg + Fe)] с целью оценки эффекта влияния траппового магматизма. Вилюйская трапповая провинция, имеющая возраст 373.4 ± 0.7 млн лет [Coutrillot et al., 2010], по всей вероятности, должна оказывать эффект на кимберлиты, представляющие главные месторождения алмазов, внедрившиеся в интервале 362-344 млн лет [Дэвис и др., 1980; Sun et al., 2014]. Детально изученная кимберлитовая тр. Удачная-Восточная, для которой проанализированы около 500 вкрапленников оливина на петрогенные и примесные элементы [Катепetsky et al., 2008; Соболев и др., 2015а], представляет, по сути, эталонный пример девонской трубки, выбранной для сопоставления с триасовыми трубками Харамайского, Куранахского (Университетская и Малокуонапская) и юрской тр. Оливиновая Куойкского кимберлитового поля. Во всех указанных трубках с диапазоном возраста внедрения 364-150 млн лет отбирались идиоморфные вкрапленни-ки неизмененного оливина.

Результаты определения содержаний примесей CaO, Al_2O_3 , Cr_2O_3 и TiO₂ в ядрах и каймах вкрапленников оливина в триасовых (трубка Малокуонапская, Университетская, трубки Харамайского поля) и юрской тр. Оливиновая представлены на рис. 3, 4 в сравнении с аналогичными данными по трубке Удачная-Восточная, которая испытала эффект от излияния вилюйских траппов. Из рассматриваемых примесей наиболее четкий эффект пермотриасовых траппов фиксируется на содержании примесей Al_2O_3 , Cr_2O_3 и CaO как в ядрах, так и в каймах вкрапленников оливина триасовых трубок. Юрская, более поздняя тр. Оливиновая, такого эффекта не испытывает. Ядра вкрапленников оливина из кимберлита тр. Удачная-Восточная так же, как из изученных кимберлитов триасового возраста, отличаются по составу от оливинов, включенных в алмазы, из различных ксенолитов перидотитов, в основном по повышенной примеси Ti > 100 г/т [Sobolev et al., 2009].

Наиболее масштабный эффект рефертилизации литосферы происходил непосредственно после внедрения пермотриасовой крупной изверженной провинции (КИП) и длился на протяжении, по меньшей мере, несколько десятков миллионов лет [Sobolev et al., 2011b].

АЛМАЗЫ МЕЗОЗОЙСКИХ КИМБЕРЛИТОВ И СЕВЕРНЫХ РОССЫПЕЙ

С целью совершенствования методов прогноза алмазоносности актуальными являются исследования типоморфных признаков самих алмазов, наиболее устойчивых в экзогенных условиях с их индикаторными минералами. К таким типоморфным признакам, прежде всего, относится содержание структурных примесей азота и водорода [Соболев, Ленская, 1965; Соболев и др., 1966; Бокий и др., 1986; Зинчук, Коптиль, 2003].

Еще в начальной стадии сравнительных исследований особенностей алмазов коренных и россыпных месторождений Якутии была отмечена существенно более высокая роль алмазов эклогитового типа парагенезиса в северных россыпях [Ефимова, Соболев, 1977] с повышением роли изотопно-легких алмазов, типичных для указанного парагенезиса [Соболев и др., 1979]. Именно здесь впервые в мировой практике установлен полный парагенезис коэситового эклогита во включениях двух отдельно взятых алмазов [Соболев и др., 1976]. Более поздние исследования подтвердили и уточнили соотношение алмазов перидотитового и эклогитового парагенезиса в северных россыпях с преобладанием более чем 70 % эклогитовых алмазов [Shatsky et al., 2014, 2015]. Наряду с алмазами I разновидности [Орлов, 1973] в северных россыпях широко распространены алмазы, относимые Ю.Л. Орловым к V—VII разновидности ло-блоковое внутреннее строение, включения коэсита и ассоциирующих минералов, облегченный изотопный состав углерода, позволяющие отнести их к эклогитовому парагенезису [Рагозин и др., 2002; Шацкий и др., 2016]. Эти алмазы исключены нами из дальнейшего обсуждения, так как ни в каких кимберлитах они не обнаружены, но их содержание относительно других разновидностей варьирует в различных россыпях от 20 до 57 % [Граханов и др., 2007].

Получены ИК-данные по суммарному содержанию примеси азота для ограниченного количества кристаллов алмаза из слабоалмазоносных кимберлитов Ленинград (палеозой) и Поздняя (триас), а также для 33 кристаллов из ряда россыпей Анабарского района. Известно, что для полной характеристики необходима статистически представительная выборка по отдельным участкам, не менее 30 кристаллов [Хачатрян, 2010], так что данные по трубкам рассматриваются нами условно. Для 33 кристаллов из четырех россыпей суммарное содержание примеси азота установлено в среднем 602 ± 243 г/т, а для тру-





а — из триасовых кимберлитов тр. Малокуонапская (1) и различных трубок Лучаканского кимберлитового поля (2) [Граханов и др., 2015б]; б — алмазов из участка Булкур (3) [Граханов и др., 2015б], из северных россыпей [Ивановская, 1983; Shatsky et al., 2014] (4). Затененная область — принятый интервал мантийных значений δ¹³С [Shirey et al., 2013].

бок — в пределах 350 г/т. Эти данные для россыпей в общем ближе к пределам колебания содержания азота для алмазов с эклогитовыми включениями (среднее 950 г/т) по сравнению с алмазами, содержащими перидотитовые включения (среднее 513 г/т) [Shatsky et al., 2014].

Результаты определения изотопного состава углерода алмазов из триасовых кимберлитов и из северных россыпей представлены на рис. 5. Если среди алмазов из разрабатываемых кимберлитов Якутии и ЮАР доминируют кристаллы перидотитового парагенезиса [Shirey et al., 2013], то в триасовых кимберлитах Якутии (см. рис. 5, *a*) алмазы эклогитового парагенезиса играют повышенную роль. Перидотитовый и эклогитовый парагенезисы алмазов были выделены как на основании состава пиропов из алмазов [Соболев и др., 19696; Meyer, Boyd, 1972], так и в результате исследования состава гранатов из измененных алмазоносных перидотитов [Соболев и др., 1969а] и алмазоносного эклогита [Бобриевич и др., 1959], обнаруженных в Якутии, несмотря на то, что первая находка эклогита с алмазами была описана в ЮАР, но составы минералов не были исследованы [Bonney, 1899]. Еще более типичны алмазы эклогитового парагенезиса в россыпях (см. рис. 5, *б*) с максимальной долей таких кристаллов в карнийских отложениях участка Булкур. Для сравнения можно привести данные по алмазам из палеозойской тр. Ленинград. Среди 32 определений изотопного состава углерода алмазов этой трубки [Граханов и др., 20156] нет ни одного кристалла с δ^{13} С, выходящего за пределы интервала –5.74... –2.18 ‰, что подтверждает различие в соотношении перидотитовых и эклогитовых алмазов в палеозойских и мезозойских кимберлитах.

Полученные результаты, при исключении всех материалов по алмазам V—VII разновидности [Орлов, 1973], убедительно подтверждают наряду с имеющимися литературными данными [Соболев, Соболев, 1980; Dobretsov, Shatsky, 2004; Логвинова и др., 2011; Шацкий и др., 2016; и др.] существенную роль субдукционного компонента в образовании алмазов эклогитового парагенезиса и повышении его роли в литосферной мантии в краевой, северной зоне Сибирской платформы. Следует подчеркнуть, что это подтверждается не только повышением роли изотопно-легких алмазов в россыпях на примере алмазов участка Булкур (см. рис. 5, δ), но и в алмазах из триасовых кимберлитов, в особенности, кимберлитов Лучаканского поля (см. рис. 5, a). Прямым подтверждением участия корового компонента в процессах образования алмазов является алмазоносные породы коры, субдуцированные на глубины, соответствующие верхней мантии, и затем в течение сравнительно короткого времени эксгумированные на поверхность [Dobretsov, Shatsky, 2004; Sobolev et al., 2011; Schertl, Sobolev, 2013; Шацкий и др., 2016].

СОСТАВ ЛЕТУЧИХ КОМПОНЕНТОВ В АЛМАЗАХ

По данным газовой хромато-масс-спектрометрии в алмазах из кимберлитовой тр. Поздняя и россыпей Холомолох, Исток и Маят Якутской провинции было установлено большое количество летучих

Состав (отн. %) летучих компонентов, выделившихся при механическом вскрытии флюидных включений
в природных алмазах Якутии (по данным газового хромато-масс-спектрометрического анализа)

Компоненты	MW	Трубка	Россыпь		
		Поздняя	Холомолох	Исток	Маят
Алифатические углеводороды:		17.22	22.1	29.65	11.45
Парафины (CH ₄ -C ₁₈ H ₃₈)	16—254	7.56	12.5	18.80	6.09
Олефины (С ₂ H ₂ -С ₁₆ H ₃₂)	26—224	9.66	9.6	10.85	5.36
Циклические углеводороды:		4.90	5.15	4.26	7.78
Нафтены $(C_5H_{10}-C_{15}H_{28})$	56—208	0.73	1.40	0.56	0.78
Арены (C_6H_6 - $C_{18}H_{30}$)	78—246	4.16	3.70	3.54	6.95
Полициклические ароматические углеводороды ($C_{10}H_8$ - $C_{11}H_{10}$)	128—142	0.01	0.05	0.16	0.05
Кислородсодержащие углеводороды:		56.03	65.70	47.12	56.3
Спирты и эфиры (C_5H_8O - $C_{18}H_{26}O_4$)	32—306	14.81	6.10	15.96	3.07
Альдегиды (С ₂ H ₄ O-C ₁₄ H ₂₄ O)	44—212	16.08	11.1	4.59	11.82
Кетоны (С ₃ H ₆ O-С ₁₆ H ₃₂ O)	58—240	7.75	7.3	23.76	8.07
Карбоновые кислоты (C $_2$ H $_4$ O $_2$ -C $_{14}$ H $_{28}$ O $_2$)	60—228	17.39	32.5	2.87	33.34
Гетероциклические соединения:		0.74	0.43	2.75	1.1
Диоксаны (C ₄ H ₈ O ₂)	88	—	0.01	0.17	0.01
Фураны ($C_4H_6O-C_{13}H_{22}O$)	70—192	0.74	0.42	2.58	1.09
Азотсодержащие соединения (N ₂ -C ₁₅ H ₂₉ N)	28—223	0.88	11.7	7.61	1.75
Серосодержащие соединения (COS-C ₁₃ H ₂₂ S)	60—210	1.42	1.3	0.42	9.04
CO ₂	44	6.78	2.3	7.83	11.67
H ₂ O	18	12.0	0.04	0.3	0.9
Общее количество летучих компонентов		158	142	178	142
Алканы/Алкены		0.8	1.3	1.7	1.1
H/(H+O)		0.86	0.93	0.92	0.87
C/H		0.49	0.53	0.54	0.57
C/(O+H+C)		0.30	0.33	0.33	0.33

Примечание. Алмаз из кимберлитовой тр. Поздняя (обломок), $\delta^{13}C = -3.5$ ‰; алмаз из россыпи Холомолох (округлый бесцветный), $\delta^{13}C = -4.2$ ‰; алмаз из россыпи Исток (кубоид серый), $\delta^{13}C = -8.53$ ‰; алмаз из россыпи Маят (октаэдр бесцветный), $\delta^{13}C = -9.64$ ‰. МW — номинальная масса.

соединений (таблица). Исследования показали, что основными компонентами летучих в алмазах являются углеводороды и их производные: алифатические (парафины, олефины), циклические (нафтены, арены), кислородсодержащие (спирты, эфиры (простые и сложные), альдегиды, кетоны, карбоновые кислоты), гетероциклические соединения (диоксаны, фураны), азот-, галоген- и серосодержащие соединения, а также углекислота и вода (рис. 6—8, см. таблицу). Суммарное содержание углеводородов и их производных в алмазах из кимберлитов тр. Поздняя и россыпей Холомолох, Исток и Маят составляет 78.9, 93.4, 83.8 и 76.6 отн. % соответственно (см. таблицу; рис. 8). При этом суммарная доля алифатических (CH₄-C₁₈H₃₈) и циклических углеводородов (C₅H₁₀-C₁₈H₃₀) в алмазах из кимберлитовой трубки и россыпей существенно различается. Наибольшее относительное содержание этих углеводородов установлено для алмаза из россыпи Исток — 33.9 %. Для алмазов из тр. Поздняя и россыпей Холомолох и Маят их доля составляет 22.1, 27.3 и 19.2 % соответственно. Количество легких предельных углеводородов (метан CH₄ — н-бутан C₄H₁₀) в алмазах из тр. Поздняя и россыпей Холомолох, Исток и Маят весьма незначительное — 0.05, 0.13, 1.06 и 0.94 % соответственно. Метан был обнаружен только в алмазах из тр. Поздняя и россыпи Исток, но количество его ничтожно мало особенно в алмазе из тр. Поздняя — 0.001 %. Содержание средних предельных углеводородов (*н*-пентан C₅H₁₂ — *н*-додекан C₁₂H₂₆) в алмазах из тр. Поздняя и россыпей Холомолох, Исток и Маят составляет 4.74, 3.42. 6.5 и 3.96 % соответственно. Доля тяжелых предельных углеводородов (*н*-тридекан C₁₃H₂₈ - *н*-октадекан C₁₈H₃₈) для алмазов из тр. Поздняя и россыпей Холомолох, Исток и Маят существенно различается — 2.78, 8.96, 11.24 и 1.19 % соответственно.

Сопоставление содержания кислородсодержащих углеводородов в разных алмазах показало, что наибольшее их количество (65.7 отн. %) характерно для алмаза из россыпи Холомолох, а наименьшее — для алмаза из россыпи Исток (47.1 %) (см. таблицу). Если для алмазов из россыпей Холомолох



Рис. 6. Хроматограмма летучих компонентов из флюидных включений в алмазе из кимберлитовой тр. Поздняя, Лучаканское поле, в полном токе (TIC) (*a*) и фрагменты хроматограмм в интервале: *б* — m/z (43.00+57.00+71.00+85.00); *в* — m/z 60.00; *г* — бланк.

1 — диоксид углерода (CO₂); 2 — вода (H₂O); 3 — *н*-пропаналь (C₃H₆O); 4 — *н*-бутаналь (C₄H₈O); 5 — уксусная кислота (C₂H₄O₂); 6 — *н*-пентаналь (C₅H₁₀O); 7 — 1-гептен (C₇H₁₄); 8 — *н*-гептан (C₇H₁₆); 9 — *н*-гексаналь (C₆H₁₂O); 10 — *н*-бутановая кислота (C₄H₈O₂); 11 — (E)-3-октен (C₈H₁₆); 12 — (Z)-3-октен (C₈H₁₆); 13 — 1-октен (C₈H₁₈); 14 — 3-метилбутановая кислота (C₅H₁₀O₂); 15 — *н*-гептаналь (C₇H₄O); 16 — *н*-пентановая кислота (C₅H₁₀O₂); 17 — бензальдегид (C₇H₆O); 18 — *н*-нонан (C₉H₂₀); 19 — *н*-гексановая кислота (C₆H₁₂O₂); 20 — 2-этил-1-гексанол (C₈H₁₈O); 21 — *н*-гептановая кислота (C₇H₄O₂); 22 — *н*-нонаналь (C₉H₁₈O); 23 — *н*-октановая кислота (C₈H₁₆O₂); 24 — *и*-деканаль (C₁₀H₂₀O); 25 — *н*-додекан (C₁₂H₂₆); 26 — *н*-нонановая кислота (C₉H₁₈O₂); 31 — 2-тридеканон (C₁₁H₂₂O); 32 — *и*-тептадеканаль (C₁₁H₂₆O); 33 — 1-пентадецен (C₁₅H₃₀); 34 — *и*-пентадекан (C₁₅H₃₂); 35 — *и*-додекановая кислота (C₁₂H₂₄O₂); 36 — *и*-тетрадеканаль (C₁₄H₂₈O); 37 — *и*-тридекановая кислота (C₁₃H₂₆O₂); 38 — 2-пентадеканон (C₁₅H₃₀O); 39 — *и*-пентадеканаль (C₁₅H₃₀O); 40 — *и*-тетрадекановая кислота (C₁₄H₂₈O₂).

и Маят основными компонентами являются карбоновые кислоты ($C_2H_4O_2$ - $C_{14}H_{28}O_2$ — 32.5 и 33.3 %), то для алмаза из россыпи Исток — спирты и эфиры (C_5H_8O - $C_{18}H_{26}O_4$ — 15.9 %) и кетоны (C_3H_6O - $C_{16}H_{32}O$ — 23.7 %) (см. таблицу).

Согласно рассчитанным отношениям H/(O+H) (0.86 и 0.87), алмазы из тр. Поздняя и россыпи Маят кристаллизовались в достаточно близких окислительно-восстановительных условиях (см. таблицу). При этом алмазы из россыпей Холомолох и Исток кристаллизовались в более восстановительных условиях в сравнении с алмазами из тр. Поздней и россыпи Маят. Для них характерны более высокие отношения H/(O+H) 0.92 и 0.93 соответственно (см. таблицу).

Особый интерес представляют галогенсодержащие углеводороды в изученных алмазах. В алмазах из россыпей были обнаружены как хлорсодержащие предельные углеводороды (парафины) (1-хлорбутан C_4H_9Cl - 1-хлорундекан $C_{11}H_{23}Cl$), так и хлор- и бромсодержащие непредельные углеводороды (олефины) (1,1,2-трихлор-1-бутен $C_4H_5Cl_3$ и 4-дибром-циклобутен $C_4H_4Br_2$), а также циклический фторсодержащий углеводород (1-(2,2,3,3-тетрафторциклобутил)спиро[2.4]гепта-4,6-диен $C_{11}H_{10}F_4$). Их суммарное содержание в алмазах из россыпей Холомолох, Исток и Маят составляет 0.8, 1.8 и 1.5 % соответственно. В алмазе из тр. Поздняя были установлены только циклические хлор- и фторсодержащие углеводороды (0.6 %) (4-хлор-3-циклогексилтетрагидропиран $C_{11}H_{19}ClO$ и 1-(2,2,3,3-тетрафторциклобутил)спиро[2,4]гепта-4,6-диен $C_{11}H_{10}F_4$). Полученные данные однозначно свидетельствуют о



Рис. 7. Масс-хроматограммы летучих компонентов из флюидных включений в алмазах из россыпей Якутская провинция:

а — бесцветный округлый алмаз из россыпи Холомолох; *б* — бесцветный октаэдр из россыпи Маят; *в* — темно-серый кубоид из россыпи Исток; *г* — бланк.

1 — диоксид углерода (CO₂); 2 — вода (H₂O); 3 — *н*-бутаналь (C₄H₈O); 4 — уксусная кислота (C₂H₄O₂); 5 — *н*-гексан (C₆H₁₄); 6 — метилметакрилат (C₅H₈O₂); 7 — 1-гептен (C₇H₁₄); 8 — *н*-гептан (C₇H₁₆); 9 — *н*-бутановая кислота (C₄H₈O₂); 10 — *н*-октан (C₈H₁₈); 11 — *н*-гептаналь (C₇H₁₄O); 12 — *н*-нонан (C₉H₂₀); 13 — *н*-гексановая кислота (C₆H₁₂O₂); 14 — *н*-октаналь (C₈H₁₆O); 15 — бутилбензол (C₁₀H₁₄); 16 — *и*-нонаналь (C₉H₁₈O); 17 — деканаль (C₁₀H₂₀O); 18 — 8-ноненовая кислота (C₉H₁₆O₂); 19 — 1-тридецен (C₁₃H₂₆); 20 — ундеканнитрил (C₁₁H₂₁N); 21 — 1-тетрадецен (C₁₄H₂₈); 22 — *и*-декановая кислота (C₁₀H₂₀O₂); 23 — *и*-пентадекан (C₁₅H₃₂); 24 — *и*-пентадекано (C₁₅H₃₂); 25 — *и*-додекановая кислота (C₁₂H₂₄O₂); 26 — 2-тетрадеканон (C₁₄H₂₈O); 27 — γ-додекалактон (C₁₂H₂₂O₂); 28 — 2-пентадеканон (C₁₅H₃₀O); 29 — пентадеканитрил (C₁₅H₂₉N); 30 — *и*-октадекан (C₁₈H₃₈).

возможности образования галогенсодержащих углеводородов и их устойчивости в условиях верхней мантии.

Азот присутствует в алмазах как в молекулярной форме (N₂), так и в виде азотсодержащих соединений и азотсодержащих производных углеводородов. Было установлено 16 азотсодержащих соединений (от ацетонитрила C_2H_3N до пентадеканнитрила $C_{15}H_{29}N$). Наибольшее содержание азотсодержащих соединений обнаружено в алмазах из россыпи Холомолох 11.7 %, а наименьшее в алмазе из тр. Поздняя — 0.88 % (см. таблицу). Количество молекулярного азота в их составе весьма незначительно — от 0.37 % в алмазе из россыпи Маят до 0.1 % в алмазе из россыпи Исток. Известно, что в некоторых случаях содержание молекулярного азота в природных алмазах может быть существенно выше. Так, в «сверхглубинном» алмазе из россыпей Урала содержание молекулярного азота во флюидных включениях более 37 % [Sobolev et al., 2015].

Во всех изученных алмазах были обнаружены серосодержащие соединения: диоксид серы (SO₂), карбонил серы (COS), дисульфид углерода (CS₂) и диметилдисульфид (C₂H₆S₂). Кроме того, в алмазе из россыпи Маят, помимо этих соединений, были обнаружены тиофены (2-метилтиофен C₅H₆S (тиофен) — 2-нонилтиофен C₁₃H₂₂S). Наибольшее содержание серосодержащих соединений установлено в алмазе из россыпи Маят (9.0 %), а наименьшее — для алмаза из россыпи Исток (0.42 %) (см. таблицу).

Наибольшее содержание углекислоты характерно для алмаза из россыпи Маят — более 11.0 %. Для алмаза из россыпи Холомолох количество CO₂ по сравнению с другими алмазами наименьшее — около 2.0 %. Содержание воды в алмазе из тр. Поздняя (12 отн. %) существенно выше по сравнению с алмазами из россыпей Холомолох, Исток и Маят — 0.04, 0.3 и 0.9 отн. % соответственно (см. таблицу).



Рис. 8. Относительное содержание летучих компонентов в алмазах из кимберлитовой тр. Поздняя (*a*) и россыпей Холомолох (*б*), Исток (*в*) и Маят (*г*) Якутской провинции.

Желтое поле — алифатические, циклические, кислородсодержащие углеводороды и гетероциклические соединения; красное поле — CO₂; синее поле — H₂O; зеленое поле — азотсодержащие соединения.

Проведенные исследования позволили получить новые данные о составе флюидов в верхней мантии Земли. Изучение состава летучих в алмазах из кимберлитов тр. Поздняя и россыпей Холомолох, Исток и Маят показало, что кристаллизация рассмотренных алмазов в верхней мантии Земли происходила при активном участии алифатических, циклических, гетероциклических и кислородсодержащих углеводородов, содержание которых в составе флюидов составляло 90 отн. % и более, а также азот-, хлор-, фтор-, бром- и серосодержащих соединений. Важно отметить, что углеводороды, включая высокомолекулярные, были установлены также во флюидных включениях в минералах из кимберлитов и мантийных пород Якутской провинции и «сверхглубинном» алмазе из россыпей Урала [Томиленко и др., 2001, 2009; Сонин и др., 2014; Sobolev et al., 2015; Сокол и др., 2017; Tomilenko et al., 2018]. Хлорсодержащие силикаты, в частности содалит, установлены в основной массе кимберлита тр. Удачная-Восточная [Kamenetsky et al., 2004], а также во включениях в алмазах той же трубки [Соболев и др., 20096] в флогопите с содержанием Cl до 0.5 мас. %. Мы полагаем, что наблюдаемые вариации состава летучих компонентов в изученных алмазах являются следствием совокупности процессов, включающих смену окислительно-восстановительных условий кристаллизации алмаза [H/(O+H) изменяется от 0.86 до 0.93]. Кроме того, полученные данные свидетельствуют о том, что в верхней мантии существуют области в которых, по-видимому, возможен абиогенный синтез углеводородов и их производных, соответствующих по составу компонентам природного газа и нефти [Томиленко и др., 2001; Сонин и др., 2014; Sobolev et al., 2015; Сокол и др., 2017].

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ КРИТЕРИИ ПОИСКОВ КОРЕННЫХ ИСТОЧНИКОВ СЕВЕРНЫХ РОССЫПЕЙ АЛМАЗОВ

Анализ доступных материалов по палеозойским и мезозойским кимберлитам северо-восточной части Сибирской платформы свидетельствует о важной роли главных минералогических методов для прогнозных оценок [Соболев и др., 19696; Sobolev et al., 1973]. Наличие в концентратах тяжелой фракции субкальциевых Сг-пиропов с высокой степенью вероятности свидетельствуют об алмазоносности ожидаемых кимберлитов. Это было проверено при обогащении нижнекаменноугольных гравелитов Кютюнгдинского грабена, где в ряде проб были обнаружены такие пиропы [Соболев и др., 1981], а затем и алмазы [Pokhilenko, Sobolev, 1995]. В пределах территории Толуопского кимберлитового поля была обнаружена слабоалмазоносная тр. Ивушка, перекрытая пермскими отложениями и обоснован прогноз палеозойских алмазоносных кимберлитов с алмазами, близкими по качеству к тр. Удачная [Соболев и др., 1981; Pokhilenko, Sobolev, 1995].

В качестве мезозойского коллектора алмазов северо-восточной окраины Сибирской платформы рассматривается базальный горизонт карнийского яруса верхнего триаса [Граханов и др., 2007; 2015а,6; Соболев и др., 2013; Николенко и др., 2018], где обнаружены многочисленные алмазы и индикаторные минералы. В отношении индикаторных минералов, в частности, оливина, пикроильменита, хромшпинелидов обсуждаются их различные возможные источники [Соболев и др., 2013], включая Гулинский плутон, обнажающийся только на 30 %, могущий служить источником оливинов с повышенным содержанием CaO > 0.20 %, не типичным для кимберлитов [Соболев и др., 2009а; Sobolev et al., 2009], а также хромшпинелидов и пикроильменитов [Васильев, Гора, 2017]. Среди пикроильменитов в качестве потенциальных индикаторов кимберлитов можно рассматривать только индивиды, содержащие примесь Al₂O₃, свидетельствующую о возможной ассоциации с гранатом [Green, Sobolev, 1975].

Протяженный базальный горизонт карнийского яруса прослежен на большом расстоянии и простирается от низовьев р. Лена до м. Цветкова на Восточном Таймыре. Мощность горизонта 0.1—1.0 м. Наибольшая алмазоносность зафиксирована на участке в районе устья р. Булкур (левый приток Лены) [Граханов и др., 2007, 2015а,б; Николенко и др., 2018]. В пределах этого же участка отобраны 69 образцов цирконов, для которых выполнено U/Pb датирование с помощью SHRIMP-II [Граханов и др., 2015а]. Результаты продемонстрировали исключительное постоянство 54 определений со средним возрастом 244 млн лет. Для пяти образцов получен интервал 230—245 млн лет. Только 10 образцов, т.е. 14 % всей выборки, продемонстрировали интервал 263—466 млн лет. Как отмечено выше (см. рис. 5, б), более 50 % алмазов этого участка, для которых выполнены изотопные определения, характеризуются облегченным (эклогитовым) изотопным составом углерода.

Для U/Pb изотопного определения возраста вероятных кимберлитов значительные перспективы имеет хромсодержащий рутил перидотитового парагенезиса, что показано в работе [Malkovets et al., 2016] на примере определения возраста по рутилу тр. Интернациональная.

Характерно, что в тяжелой фракции участка Булкур в пироп-альмандиновых гранатах выявлены включения редкого оксида Ti и Zr (Ti₂ZrO₆), ранее обнаруженного в аналогичной ассоциации в концентратах кимберлитов трубок Юбилейная и Малокуонапская [Биллер и др., 2018]. Это позволяет рассматривать его в группе индикаторных минералов кимберлитов и, учитывая наличие клинопироксена в ассоциации, относить к группе минералов, представляющих фрагменты эклогитоподобных пород [Алмазные месторождения..., 1959] нижней части земной коры.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В пределах Сибирской платформы установлены две тщательно датированные крупные изверженные провинции (КИП), тесно связанные по времени с главными этапами внедрения кимберлитов. Это Вилюйская трапповая провинция, имеющая возраст 374 ± 0.7 млн лет, предшествовавшая внедрению серии девонских кимберлитов, включая все известные разрабатываемые месторождения алмазов с U/Pb возрастом по цирконам 367—344 млн лет. Главный этап излияния Сибирской трапповой провинции с возрастом 252 млн лет предшествовал внедрению большой группы триасовых кимберлитов, имеющих возраст 245—220 млн лет, включая слабоалмазоносные и трубку Малокуонапская, с содержанием алмазов, приближающихся к промышленному.

Составы оливинов триасовых кимберлитов Куранахского и Харамайского полей существенно расширены в сторону повышения содержания Fe, Al, Ca, Cr, Ti наряду с уникальными пределами колебания Fo, в особенности для тр. Малокуонапская от 78.0 до 93.0. Этот интервал отличается от любых изученных кимберлитов мира. Эти особенности могут свидетельствовать о рефертилизации глубинной части литосферы под Сибирским кратоном, непосредственно после внедрения пермотриасовой Сибирской КИП в течение, как минимум, нескольких десятков млн лет.

Неоднородность содержания Р в ядрах оливинов триасовых кимберлитов наряду с однородностью распределения других примесей указывает на высокие скорости их образования и свидетельствует об их генетической связи с процессами образования (преобразования) кимберлитовых магм. Эта особенность отсутствует для оливинов трубки Удачная-Восточная и до настоящего времени не отмечена в других кимберлитах.

Получены новые данные о составе флюидов в верхней мантии Земли. Изучение состава летучих в алмазах из кимберлитов триасовой тр. Поздняя и россыпей Холомолох, Исток и Маят северо-восточной части Сибирской платформы показало, что их кристаллизация в верхней мантии Земли происходила при активном участии алифатических, циклических, гетероциклических и кислородосодержащих углеводородов, содержание которых в составе флюидов составляло 90 отн. % и более, а также азот-фторбром и серосодержащих соединений.

Находки субкальциевых Cr-пиропов и алмазов в нижнекаменноугольных гравелитах Кютюнгдинского грабена свидетельствуют о перспективности обнаружения алмазоносных палеозойских кимберлитов в районе Толуопского кимберлитового поля.

Результаты комплексных исследований алмазов, индикаторных минералов и возрастные характеристики цирконов из базальных отложений карнийского яруса участка Булкур свидетельствуют о вероятности обнаружения алмазоносных кимберлитов триасового возраста в пределах северо-восточной части Сибирской платформы.

Исследование выполнено за счет гранта РНФ (проект 14-17-00602П).

ЛИТЕРАТУРА

Агашев А.М., Похиленко Н.П., Толстов А.В., Поляничко В.В., Мальковец В.Г., Соболев Н.В. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутской алмазоносной провинции // ДАН, 2004, т. 399, № 1, с. 95—99.

Алмазные месторождения Якутии / Ред. В.С. Соболев. М., Госгеолиздат, 1959, 527 с.

Биллер А.Я., Логвинова А.М., Бабушкина С.А., Олейников О.Б., Соболев Н.В. Включения шриланкита в гранатах из кимберлитовых тел и алмазоносных вулканогенно-осадочных пород Якутской кимберлитовой провинции // ДАН, 2018, т. 478, № 2, с. 179—183.

Бобриевич А.П., Смирнов Г.И., Соболев В.С. Ксенолит эклогита с алмазами // Докл. АН СССР, 1959, т. 126, № 3, с. 637—640.

Бокий Г.Б., Безруков Г.Н., Клюев Ю.А., Налетов А.М., Непша В.И. Природные и синтетические алмазы. М., Наука, 1986, 221 с.

Брахфогель Ф.Ф. Геологические аспекты кимберлитового магматизма северо-востока Сибирской платформы. Якутск, ЯФ СО АН СССР, 1984, 128 с.

Васильев Ю.Р., Гора М.П. Природа ультрамафит-мафитового комплекса Гулинского плутона (Полярная Сибирь) // ДАН, 2017, т. 476, № 2, с. 418—420.

Гладкочуб Д.П., Донская Т.В., Мазукабзов А.М., Писаревский С.А., Эрнст Р.Е., Станевич А.М. Мезопротерозойский мантийный плюм под северной частью Сибирского кратона // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (5), с. 856—873.

Граханов С.А., Шаталов В.И., Штыров В.А., Кычкин В.Р., Сулейманов А.М. Россыпи алмазов России. Новосибирск, Изд-во «Гео», 2007, 420 с.

Граханов С.А., Зинчук Н.Н., Соболев Н.В. Возраст прогнозируемых коренных источников алмазов на северо-востоке Сибирской платформы // ДАН, 2015а, т. 465, № 6, с. 715—719.

Граханов С.А., Молотков А.Е., Олейников О.Б., Павлушин А.Д., Помазанский Б.С. Типоморфизм и изотопия алмазов триасовых туффитов Булкурской антиклинали // Отечественная геология, 2015б, № 5, с. 16—21.

Добрецов Н.Л., Похиленко Н.П. Минеральные ресурсы Российской Арктики и проблемы их освоения в современных условиях // Геология и геофизика, 2010, т. 51 (1), с. 126—141.

Добрецов Н.Л., Конторович А.Э. Проблемы геологии и нефтегазоносности Арктики // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 967—971.

Дэвис Г.Л., Соболев Н.В., Харькив А.Д. Новые данные о возрасте кимберлитов Якутии, полученные уран-свинцовым методом по цирконам // Докл. АН СССР, 1980, т. 254, № 1, с. 175—179.

Ефимова Э.С., Соболев Н.В. Распространенность кристаллических включений в алмазах Якутии // Докл. АН СССР, 1977, т. 237, № 6, с. 1475—1478.

Зайцев А.И., Смелов А.П. Изотопная геохронология пород кимберлитовой формации Якутской провинции. Якутск, ООО РИЦ «Офсет», 2010, 105 с.

Зинчук Н.И., Коптиль В.И. Типоморфизм алмазов Сибирской платформы. М., Недра, 2003, 603 с.

Ивановская И.Н. Изотопный состав алмазов в связи с проблемой источника их углерода: Автореф. дис.... к.г.-м.н., М., 1983, 30 с.

Кинни П.Д., Гриффин Б.Дж., Хеамен Л.М., Брахфогель Ф.Ф., Специус З.В. Опеделение U-Pb возрастов перовскитов из якутских кимберлитов ионно-ионным масс-спектроскопическим (SHRIMP) методом // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (1), с. 91—99.

Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н., Соболев Н.В., Маликов Ю.И. Определение состава породообразующих минералов рентгеноспектральным микроанализом с электронным зондом // Заводская лаборатория, 1974, т. 40, № 6, с. 657—661.

Логвинова А.М., Вирт Р., Томиленко А.А., Афанасьев В.П., Соболев Н.В. Особенности фазового состава наноразмерных кристаллофлюидных включений в аллювиальных алмазах северо-востока Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (11), с. 1634—1648.

Милашев В.А. Родственные включения в кимберлитовой трубке «Обнаженная» (бассейн реки Оленек) // Зап. ВМО, 1960, ч. 89, вып. 3, с. 284—299.

Николенко Е.И., Логвинова А.М., Изох А.Э., Афанасьев В.П., Олейников О.Б., Биллер А.Я. Полифазные включения в хромшпинелидах из верхнетриасовых гравелитов северо-востока Сибирской платформы // ДАН, 2018, т. 480, № 3, с. 327—332.

Орлов Ю.Л. Минералогия алмаза. М., Наука, 1973, 264 с.

Рагозин А.Л., Шацкий В.С., Рылов Г.М., Горяйнов С.В. Включение коэсита в округлых алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы // ДАН, 2002, т. 384, № 4, с. 509—513.

Соболев А.В., Соболев С.В., Кузьмин Д.В., Малич К.Н., Петрунин А.Г. Механизм образования сибирских меймечитов и природа их связи с траппами и кимберлитами // Геология и геофизика, 2009а, т. 50 (12), с. 1293—1334.

Соболев В.С. Петрология траппов Сибирской платформы. Л., Главсевморпуть, 1936, 224 с.

Соболев В.С. Условия образования месторождений алмазов // Геология и геофизика, 1960, (1), с. 7-23.

Соболев В.С., Соболев Н.В. Ксенолиты в кимберлитах Северной Якутии и вопросы строения мантии Земли // Докл. АН СССР, 1964, т. 158, № 31, с. 108—111.

Соболев В.С., Соболев Н.В. О хроме и хромсодержащих минералах в глубинных ксенолитах кимберлитовых трубок // Геология рудных месторождений, 1967, № 2, с. 10—16.

Соболев В.С., Соболев Н.В. Новые доказательства погружения на большие глубины эклогитизированных пород земной коры // Докл. АН СССР, 1980, т. 250, № 3, с. 683—685.

Соболев В.С., Най Б.С., Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н. Ксенолиты алмазоносных пироповых серпентинитов из трубки «Айхал», Якутия // Докл. АН СССР, 1969а, т. 188, № 5, с. 1141—1143.

Соболев Е.В., Ленская С.В. О проявлении «газовых» примесей в спектрах природных алмазов // Геология и геофизика, 1965 (2), с. 151—159.

Соболев Е.В., Ленская С.В., Лисойван В.И., Самсоненко Н.Д., Соболев В.С. Некоторые физические свойства алмазов из якутского эклогита // Докл. АН СССР, 1966, т. 168, № 5, с. 1151—1153.

Соболев Н.В. Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск, Наука, 1974, 264 с.

Соболев Н.В., Лаврентьев Ю.Г., Поспелова Л.Н., Соболев Е.В. Хромовые пиропы из алмазов Якутии // Докл. АН СССР, 19696, т. 189, № 1, с. 162—165.

Соболев Н.В., Ефимова Э.С., Коптиль В.И., Лаврентьев Ю.Г., Соболев В.С. Включение коэсита, граната и омфацита в якутских алмазах — первая находка парагенезиса коэсита // Докл. АН СССР, 1976, т. 230, № 6, с. 1442—1444.

Соболев Н.В., Галимов Э.М., Ивановская И.Н., Ефимова Э.С. Изотопный состав углерода алмазов, содержащих кристаллические включения // Докл. АН СССР, 1979, т. 249, № 5, с. 1217—1220.

Соболев Н.В., Белик Ю.П., Похиленко Н.П., Лаврентьев Ю.Г., Кривонос В.Ф., Поляков В.Н., Соболев В.С. Хромсодержащие пиропы в нижнекаменноугольных отложениях Кютюнгдинского прогиба // Геология и геофизика, 1981 (2), с. 153—157.

Соболев Н.В., Логвинова А.М., Ефимова Э.С. Сингенетические включения флогопита в алмазах кимберлитов: свидетельство роли летучих в образовании алмазов // Геология и геофизика, 20096, т. 50 (12), с. 1588—1606.

Соболев Н.В., Логвинова А.М., Николенко Е.И., Лобанов С.С. Минералогические критерии алмазоносности верхнетриасовых россыпей северо-восточной окраины Сибирской платформы // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (8), с. 1162—1178.

Соболев Н.В., Соболев А.В., Томиленко А.А., Ковязин С.В., Батанова В.Г., Кузьмин Д.В. Парагенезис и сложная зональность вкрапленников оливина из неизмененного кимберлита трубки Удач-

ная-Восточная (Якутия): связь с условиями образования и эволюцией кимберлита // Геология и геофизика, 2015а, т. 56 (1—2), с. 337—360.

Соболев Н.В., Соболев А.В., Томиленко А.А., Батанова В.Г., Толстов А.В., Логвинова А.М., Кузьмин Д.В. Уникальные особенности вкрапленников оливина посттраповой алмазоносной кимберлитовой трубки Малокуонапская, Якутия // ДАН, 2015б, т. 463, № 5, с. 587—591.

Сокол А.Г., Томиленко А.А., Бульбак Т.А., Соболев Н.В. Синтез углеводородов при конверсии CO₂ флюида водородом: экспериментальное моделирование при 7.8 ГПа и 1350 °С // ДАН, 2017, т. 477, № 6, с. 699—703.

Сонин В.М., Бульбак Т.А., Жимулев Е.И., Томиленко А.А., Чепуров А.И., Похиленко Н.П. Синтез тяжелых углеводородов при температуре и давлении верхней мантии Земли // ДАН, 2014, т. 454, № 1, с. 84—88.

Томиленко А.А., Рагозин А.Л., Щацкий В.С., Шебанин А.П. Вариации состава флюидной фазы в процессе кристаллизации природных алмазов // ДАН, 2001, т. 378, № 6, с. 802—805.

Томиленко А.А., Ковязин С.В., Похиленко Л.Н., Соболев Н.В. Первичные углеводородные включения в гранате алмазоносного эклогита из кимберлитовой трубки Удачная, Якутия // ДАН, 2009, т. 426, № 4, с. 533—536.

Туркин А.И., Соболев Н.В. Пироп-кноррингитовые гранаты: обзор экспериментальных данных и природных парагенезисов // Геология и геофизика, 2009, т. 50 (12), с. 1506—1523.

Тычков Н.С., Юдин Д.С., Николенко Е.И., Малыгина Е.В., Соболев Н.В. Мезозойская литосферная мантия северо-восточной части Сибирской платформы по данным включений из кимберлитов // Геология и геофизика, 2018, т. 59 (10), с. 1564—1585.

Харькив А.Д., Зинчук Н.Н., Крючков А.И. Коренные месторождения алмазов мира. М., Недра, 1998, 555 с.

Хачатрян Г.К. Типизация алмазов из кимберлитов и лампроитов по распределению азотных центров в кристаллах // Руды и металлы, 2010, № 2, с. 46—60.

Черенкова А.Ф., Черенков В.Г. Кимберлиты Харамайского поля и глубинные ксенолиты в них. М., Геоинформмарк, 2007, 238 с.

Шацкий В.С., Зедгенизов О.А., Рагозин А.Л. Свидетельства присутствия субдукционного компонента в алмазоносной мантии Сибирского кратона // Геология и геофизика, 2016, т. 57 (1), с. 143—162.

Эрнст Р.Е., Округин А.В., Веселовский Р.В., Камо С.Л., Гамильтон М.А., Павлов В.Э., Сёдерлунд У., Чемберлейн К.Р., Роджерс К. Куонапская крупная изверженная провинция (север Сибири, 1500 млн лет): U-Pb геохронология, геохимия и корреляция с синхронным магматизмом других кратонов // Геология и геофизика, 2016, т. 57(5), с. 833—855.

Arndt N.T., Guitreau M., Boullier A.M., Le Roex A., Tommasi A., Cordier P., Sobolev A. Olivine, and the origin of kimberlite // J. Petrol., 2010, v. 51, p. 573—602.

Batanova V.G., Sobolev A.V., Kuzmin D.V. Trace element analysis of olivine: High precision analytical method for JEOL JXA-8230 electron probe microanalyser // Chem. Geol., 2015, v. 419, p. 149–157.

Beard B.L., Fraracci K.N., Taylor L.A., Snyder G.A., Clayton R.N., Mayeda T.K., Sobolev N.V. Petrography and geochemistry of eclogites from the Mir kimberlite, Yakutia, Russia // Contr. Miner. Petrol., 1996, v. 125, p. 293—310.

Bonney T.G. The parent rock of the diamond in South Africa // Proceedings of the Royal Society of London, 1899, v. 65, p. 223–236.

Boyd F.R., Pokhilenko N.P., Pearson D.G., Mertzman S.A., Sobolev N.V., Finger L.W. Composition of the Siberian cratonic mantle: evidence from Udachnaya peridotite xenoliths // Contr. Miner. Petrol., 1997, v. 128, p. 228—246.

Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S. The relationship between infrared absorption and the A defect concentration in diamond // Phil. Mag. B, 1994, v. 69, p. 1149—1153.

Boyd S.R., Kiflawi I., Woods G.S. Infrared absorption by the B nitrogen aggregate in diamond // Phil. Mag. B, 1995, v. 72, p. 351—361.

Brett R.C., Russell J.K., Moss S. Origin of olivine in kimberlite: Phenocryst or impostor? // Lithos, 2009, v. 112, p. 201–212.

Burgess S.D., Blackburn T.J., Bowning S.A. High-precision U-Pb geochronology of Phanerozoic Large Igneous Provinces // Volcanism and global environmental change. Cambridge University Press, 2015, p. 47–62.

Courtillot V., Kravchinsky V.A., Quidelleur X., Renne P.R., Gladkochub D.P. Preliminary dating of the Viluy traps (Eastern Siberia): Eruption at the time of Late Devonian extinction events? // Earth Planet. Sci. Lett., 2010, v. 300, p. 239—245.

Dobretsov N.L., Shatsky V.S. Exhumation of high pressure rocks of the Kokchetav massif: facts and models // Lithos, 2004, v. 78, p. 307—318.

Foley S.F., Prelevic D., Rehfeldt T., Jacob D.E. Minor and trace elements in olivines as probes into early igneous and mantle melting processes // Earth Planet. Sci. Lett., 2013, v. 363, p. 181–191.

Green D.H., Sobolev N.V. Coexisting garnets and ilmenites synthesized at high pressures from pyrolite and olivine basanite and their significance for kimberlitic assemblages // Contr. Miner. Petrol., 1975, v. 50, № 3, p. 217—229.

Griffin W.L., Natapov L.M., O'Reilly S.Y., van Achterbergh E., Cherenkova A.F., Cherenkov V.G. The Kharamai kimberlite field, Siberia: Modification of the lithospheric mantle by the Siberian Trap event // Lithos, 2005, v. 81, p. 167—187.

Howarth G.H., Taylor L.A. Multi-stage kimberlite evolution tracked in zoned olivine from the Benfontein sill, South Africa // Lithos, 2016, v. 262, p. 384—397.

Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Kamenetsky V.S., Maas R., Danyushevsky L.V., Thomas R., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V. Kimberlite melts rich in alkali chlorides and carbonates: A potent metasomatic agent in the mantle // Geology, 2004, v. 32, № 10, p. 845—848.

Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.G., Demouchy S., Faure K., Sharygin V.V., Kuzmin D.V. Olivine in Udachnaya-East kimberlite (Yakutia, Russia): Types, compositions and origins // J. Petrol., 2008, v. 49, № 4, p. 823—839.

Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin V.V., Demouchy S., Faure K., Sharygin V.V., Kuzmin D.V. How unique is the Udachnaya East kimberlite? Comparison with kimberlites from the Slave Craton (Canada) and SW Greenland // Lithos, 2009a, v. 112, p. 334—346.

Kamenetsky V.S., Kamenetsky M.B., Sobolev A.V., Golovin A.V., Sharygin V.V., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V. Can pyroxenes be liquidus minerals in the kimberlite magma? // Lithos, 2009b, v. 112, p. 213—222.

Malkovets V.G., Rezvukhin D.I., Belousova E.A., Griffin W.L., Sharygin I.S., Tretiakova I.G., Gibsher A.A., O'Reilly S.Y., Kuzmin D.V., Litasov K.D., Logvinova A.M., Pokhilenko N.P., Sobolev N.V. Crrich rutile: A powerful tool for diamond exploration // Lithos, 2016, v. 265, p. 304—311.

Meyer H.O.A., Boyd F.R. Composition and origin of crystalline inclusions in natural diamonds // Geochim. Cosmochim. Acta, 1972, v. 36, p. 1255—1273.

Milman-Barris M.S., Beckert J.R., Baker M.B., Hofmann A.E., Morgan Z., Crowley M.R., Vielzeuf D., Stolper E. Zoning of phosphorous in igneous olivine // Contr. Miner. Petrol., 2008, v. 155, p. 739—765.

Mitchell R.H. Petrology of hypabyssal kimberlites: relevance to primary magma compositions // J. Volcanol. Geotherm. Res., 2008, v. 174, p. 1–8.

Pokhilenko N.P., Sobolev N.V. Mineralogical mapping of the north-east section of the Yakutian kimberlite province and its main results // Extended Abstracts, VI International Kimberlite Conference, Novosibirsk, 1995, p. 446—448.

Schertl H-P., Sobolev N.V. The Kokchetav Massif, Kazakhstan: «Type locality» of diamond-bearing UHP metamorphic rocks // J. Asian Earth Sci., 2013, v. 63, p. 5–38.

Shatsky V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kalinina V.V. Carbon isotopes and nitrogen contents in placer diamonds from the NE Siberian craton: implications for diamond origins // Eur. J. Miner., 2014, v. 26, p. 41—52.

Shatsky V.S., Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kalinina V.V. Diamondiferous subcontinental lithospheric mantle of the northeastern Siberian Craton: Evidence from mineral inclusions in alluvial diamonds // Gondwana Res., 2015, v. 28, p. 106—120.

Shirey S.B., Cartigny P., Frost D.J., Keshaw S., Nestola F., Nimis P., Pearson D.G., Sobolev N.V., Walter M.J. Diamonds and the geology of mantle carbon // Rev. Miner. Geochem., 2013, v. 75, p. 355–421.

Snyder G.A., Taylor L.A., Crozaz G., Halliday A.N., Beard B.L., Sobolev V.N., Sobolev N.V. The origins of Yakutian eclogite xenoliths // J. Petrol., 1997, v. 38, p. 85–113.

Sobolev A., Sobolev N.V., Smith Ch.B., Dubessy J. Fluid and melt compositions in lamproites and kimberlites based on the study of inclusions in olivine // Kimberlites and related rocks. Special Publication, v. 14, Sydney, Geological Society of Australia, N.S.W., 1989, v. 2, p. 220–240.

Sobolev N.V., Yefimova E.S. Composition and petrogenesis of Ti-oxides associated with diamonds // Int. Geol. Rev., 2000, v. 42, № 8, p. 758—767.

Sobolev N.V., Lavrent'ev Yu.G., Pokhilenko N.P., Usova L.V. Chrome-rich garnets from the kimberlites of Yakutia and their parageneses // Contr. Miner. Petrol., 1973, v. 40, p. 39—52.

Sobolev N.V., Logvinova A.M., Zedgenizov D.A., Pokhilenko N.P., Malygina E.V., Kuzmin D.V., Sobolev A.V. Petrogenetic significance of minor elements in olivines from diamonds and peridotite xenoliths from kimberlites of Yakutia // Lithos, 2009, v. 112, p. 701–713.

Sobolev N.V., Schertl H.-P., Valley J.W., Page F.Z., Kita N.T., Spicuzza M.J., Neuser R.D., Logvinova A.M. Oxygen isotope variations of garnets and clinopyroxenes in a layered diamondiferous calc-silicate rock from Kokchetav Massif, Kazakhstan: a window into the geochemical nature of deeply subducted UHPM rocks // Contr. Miner. Petrol., 2011a, v. 162, p. 1079–1092.

Sobolev N.V., Logvinova A.M., Fedorova E.N., Luk'yanova L.I., Wirth R., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Reutsky V.N., Efimova E.S. // Proc. AGU Fall Meeting (San Francisco, CA, December 14–18, 2015), V11C-3073, 2015.

Sobolev N.V., Schertl H.-P., Neuser R.D., Tomilenko A.A., Kuzmin D.V., Logvinova A.M., Tolstov A.V., Kostrovitsky S.I., Yakovlev D.A., Oleinikov O.B. Formation and evolution of hypabyssal kimberlites from the Siberian Craton: Part 1 — New insights from cathodoluminescence of the carbonates // J. Asian Earth Sci., 2017, v. 145, p. 670—678.

Sobolev S.V., Sobolev A.V., Kuzmin D.V., Krivolutskaya N.A., Petrunin A.G., Arndt N.T., Radko V.A., Vasiliev Yu.R. Linking mantle plumes, large igneous provinces and environmental catastrophes // Nature, 2011b, v. 4776, № 7364, p. 312—316.

Sokol A.G., Palyanov Y.N., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Palyanova G.A. Carbon and nitrogen speciation in nitrogen-rich C–O–H–N fluids at 5.5–7.8 GPa // Earth Planet. Sci. Lett., 2017a, v. 460, p. 234–243.

Sokol A.G., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A, Palyanova G.A., Sokol I.A., Palyanov Y.N. Carbon and nitrogen speciation in N-poor C-O-H-N fluids at 6.3 GPa and 1100–1400 °C // Sci. Rep., 2017b, v. 7, p. 706. doi:10.1038/s41598-017-00679-7.

Sokol A.G., Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Kruk A.N., Zaikin P.A., Sokol I.A., Seryotkin Y.V., Palyanov Y.N. The Fe–C–O–H–N system at 6.3–7.8 GPa and 1200–1400 °C: implications for deep carbon and nitrogen cycles // Contr. Miner. Petrol., 2018, v. 173, p. 47.

Sun J., Liu C.Z., Tappe S., Kostrovitsky S.I., Wu F.Y., Yakovlev D.A., Yang Y.H., Yang J.H. Repeated kimberlite magmatism beneath Yakutia and its relationship to Siberian flood volcanism: Insights from in situ U-Pb and Sr-Nd perovskite isotope analysis // Earth Planet. Sci. Lett., 2014, v. 404, p. 283—295.

Tomilenko A.A., Chepurov A.I., Sonin V.M., Bul'bak T.A., Zhimulev E.I., Chepurov A.A., Timina T.Yu., Pokhilenko N.P. The synthesis of methane and heavier hydrocarbons in the system graphite-ironserpentine at 2 and 4 GPa and 1200 °C // High Temperatures-High Pressures, 2015, v. 44, № 6, p. 451—465.

Tomilenko A.A., Bul'bak T.A., Logvinova A.M., Sonin V.M., Sobolev N.V. The compositional features of volatiles in diamongs from the placers in the northeastern part of the Siberian Platrorm by gas chromatography-mass spectrometry // Dokl. Earth Sci., 2018, v. 481, № 1, p. 953—957.

Wagner P.A. The diamond fields of Southern Africa. Johannesburg, Transvaal Leader, 1914, 347 p.

Поступила в редакцию 3 августа 2018 г.