

Мантийная конвекция и алмазы

В. Н. Пучков¹, Д. А. Зедгенизов^{1,2}

¹Институт геологии и геохимии им. академика А.Н. Заварицкого УрО РАН, 620110, г. Екатеринбург, ул. Академика Вонсовского, 15, e-mail: puchkv2@mail.ru

²Уральский государственный горный университет, 620144, г. Екатеринбург, ул. Куйбышева, 30

Поступила в редакцию 09.11.2022 г., принята к печати 18.11.2022 г.

Объект исследования. В настоящее время в геодинамической теории возобладало представление о том, что в мантии Земли преобладает термохимическая конвекция различных уровней, в которой центробежные ветви представлены плюмами, а центростремительные – зонами субдукции. **Цели и задачи исследования.** Изучение алмазов позволяет понять, когда, на каком уровне в мантии, в каких *P-T* условиях, в какой геохимической обстановке родились конкретные алмазы, которые были затем вынесены центробежным конвекционным потоком к поверхности Земли, и тем самым охарактеризовать этот поток. **Материалы и методы.** Обобщение многочисленных опубликованных материалов, характеризующих минеральные включения в алмазах, позволяют существенно конкретизировать общую картину конвекции в мантии Земли в разные эпохи и в разных регионах. **Результаты.** Результаты изучения включений в алмазах в сопоставлении с экспериментальными данными о *P-T* условиях образования минеральных парагенезисов этих включений и с геофизическими данными о свойствах мантии свидетельствуют о том, что глубина образования алмазов варьирует от низов литосферы в верхах верхней мантии до основания нижней мантии. При этом доля алмазов, содержащих минеральные включения, характерные для нижней мантии, составляет лишь первые проценты от общего количества алмазов. **Выводы.** Вынос разноглубинных алмазов на поверхность – неоспоримое свидетельство конвекции (в виде плюмовой активности) в мантии. Таким образом, пополняется все новыми фактами независимый источник сведений, подтверждающий реальность существования плюмов, охватывающих всю мантию, что немаловажно на фоне постоянно возобновляющейся дискуссии о плюмах и их классификации по глубинности зарождения. Вместе с тем изучение минеральных включений в алмазах, особенно когда это касается сверхглубинных алмазов, сталкивается с трудностями, связанными с тем, что они на пути к поверхности испытывают ретроградные изменения, резорбцию, иногда и полное растворение. Эти обстоятельства снижают вероятность встречаемости сверхглубинных алмазов и требуют особого учета при вынесении окончательных суждений о реальности существования глубинных плюмов.

Ключевые слова: мантия, конвекция, плюмы, субдукция, алмазы, карбонаты, кимберлиты

Источник финансирования

Работа выполнена по проекту РНФ № 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027>

Mantle convection and diamonds

Viktor N. Puchkov¹, Dmitry A. Zedgenizov^{1,2}

¹A.N. Zavaritsky Institute of Geology and Geochemistry, UB RAS, 15 Academician Vonsovsky st., Ekaterinburg 620110, Russia, e-mail: puchkv2@mail.ru

²Ural State Mining University, 30 Kuibyshev st., Ekaterinburg 620144, Russia

Received 09.11.2022, accepted 18.11.2022

Research subject. The present evolutionary stage of geodynamic theory is associated with the idea of thermochemical convection of various levels in the Earth's mantle, where the centrifugal branches are represented by plumes, and the centripetal – by subduction zones. **Aim.** The study of diamonds contributes to an understanding of when, at what level in mantle, under what *P-T* conditions and geochemical environment particular diamonds originated, which were then transported by centrifugal convection flows to the Earth's surface, thereby permitting characterization of this flow. **Materials and methods.** Generalization of published materials and characterization of mineral inclusions in diamonds allow the general structure of mantle convection to be clarified in different epochs and different regions. **Results.** The data obtained on mineral inclusions in diamonds, along with the experimental data on the *P-T* conditions of their mineral parageneses and geophysical data on mantle properties, indicate that the depth of diamond formation varies from the lower lithosphere in the upper

Для цитирования: Пучков В.Н., Зедгенизов Д.А. (2023) Мантийная конвекция и алмазы. *Литосфера*, 23(4), 476-490. <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-476-490>

For citation: Puchkov V.N., Zedgenizov D.A. (2023) Mantle convection and diamonds. *Lithosphere (Russia)*, 23(4), 476-490. (In Russ.) <https://doi.org/10.24930/1681-9004-2023-23-4-476-490>

© В.Н. Пучков, Д.А. Зедгенизов, 2023

part of the upper mantle (~150–250 km) to the bottom of the lower mantle. At the same time, the diamonds containing mineral inclusions, characteristic of the lower mantle, account for only the first percents of the general number of diamonds. *Conclusions.* The transport of diamonds from different depths of their origin is a reliable indication of convection processes (as a plume activity) in the mantle. This information provides evidence to the real existence of plumes, which is important in the context of ongoing discussions on the depth of their origin. However, the study of mineral inclusions in diamonds, particularly in superdeep diamonds, is a challenging task due to the retrograde changes, resorption and sometimes complete dissolution on their way to the surface. These circumstances minimize the probability of occurrence of superdeep diamonds and require consideration when making judgements about the reality of existence of superdeep diamonds.

Keywords: mantle, convection, plumes, subduction, diamonds, carbonatites, kimberlites

Funding information

The work was supported by Russian Scientific Foundation, Project No. 22-17-00027, <https://rscf.ru/project/22-17-00027>

ВВЕДЕНИЕ

Термин “плюм” впервые вошел в обиход более полувека назад (Morgan, 1971). Автор этого термина уже в самом названии небольшой статьи “Конвективные плюмы в нижней мантии” заложил некоторые темы для будущих оживленных, а порой и ожесточенных дискуссий: существуют ли плюмы вообще; если существуют, имеют ли они отношение к нижней мантии; являются ли они проявлением конвекции и т. д. После длительных обсуждений в течение полувека в современной геодинамике прочно установились две непротиворечивые концепции плит- и плюм-тектоники (Пучков, 2016), которые рассматривают разные стороны глобального тектонического процесса: первая описывает закономерности движения литосферных плит и явления в межплитных пространствах (деформации, магматизм, метаморфизм, образование и поглощение литосферы), вторая выявляет и объясняет причины образования внутриплитных Крупных Магматических Провинций (КМП, или LIPs – Large Igneous Provinces) (Ernst, 2014), обособленных друг от друга и независимых от межплитных границ, а также возникновение локальных внутриплитных магматических кластеров и вулканических цепей с закономерным последовательным увеличением или уменьшением возраста (time-progressive volcanic chains) (Puchkov et al., 2021). И та и другая концепции используют представления о конвекции в мантии и внешнем ядре, проявляющейся на разных структурных уровнях. Конвекция пространственно разделяется на частично обособленные контуры с разными параметрами, отражающими различия конвектирующей мантии по фазовому состоянию, составу, температуре, вязкости, направлению и скорости движения вещества. При этом плюмы и суперплюмы можно рассматривать как вертикальные и наклонные ветви конвекции в мантии, направленные центробежно, к поверхности Земли. Эти представления естественным образом дополняются современными

представлениями о субдукции – наклонных потоках в мантии, направленных центростремительно, от земной поверхности в сторону ядра, с поглощением мантией холодных слэбов океанической литосферы. Вместе с плюмами зоны субдукции образуют контуры конвекции разной глубинности в мантии. К настоящему времени выводы о существовании глубинной субдукции и плюмов получают независимое подтверждение и по данным изучения минеральных включений в природных алмазах (Brenker et al., 2002; Stachel et al., 2005; Walter et al., 2011; Kaminsky, 2012; Navon et al., 2017; Nestola et al., 2018; и др.). В настоящей работе рассматривается вопрос о том, какую помощь может оказать изучение включений в алмазах для решения актуальных проблем: как, когда, каким образом алмазы перемещаются из мест их образования в мантии на земную поверхность; какова роль конвекции, субдукции и мантийных плюмов в этом процессе.

МАНТИЙНЫЕ ПЛЮМЫ И КИМБЕРЛИТЫ

До сих пор, однако, обсуждается вопрос: существуют ли плюмы вообще. На сайте с красноречивым названием *Do plumes exist?* (mantleplumes.org) в числе прочих публикуются статьи и презентации, направленные против плюмовой парадигмы (Foulger, 2018). С нашей стороны были опубликованы обзоры, полно разбирающие аргументы за плюмовую теорию и против нее (Пучков, 2009, 2016) с однозначным выводом, что плюмы реальны и вместе с субдукцией входят в систему конвективных течений в земной мантии.

В целом представления о внутреннем строении Земли устоялись: Земля состоит из внешней силикатно-твердой коры, образующей вместе с холодными верхами мантии хрупкую литосферу; высоковязкой астеносферы, сменяющейся с глубиной твердой мантией (обычно разделяемой на верхнюю и нижнюю); жидкого внешнего ядра и твердого внутреннего ядра (Добрецов, 2011; и др.). Кроме подошвы коры, литосферы и астеносферы, важную

роль играют также другие границы, разделяющие в мантии зоны с разными геофизическими свойствами и, по данным экспериментов, с разным фазовым составом кристаллического вещества (Рингвуд, 1981).

Наиболее важным для наших целей является, в частности, раздел между верхней и нижней мантиями с переходной зоной между ними. О точном расположении этих границ высказывались различные мнения, отчасти восходящие к первоначальным моделям Джеффриса-Гутенберга и Буллена (Пушаровский, Пушаровский, 2010; см. также ссылки в этой работе). В последнее время благодаря ком-

пьютерной обработке данных о фазовых равновесиях и физических свойствах минералов (Stixrude, Lithgow-Bertelloni, 2007) установлен консенсус, согласно которому переходная зона между верхней и нижней мантиями отвечает интервалу от 410 до 660 км, соответственно по давлению – примерно между 15 и 23 ГПа (Frost, 2008; Добрецов, 2011; Kaminsky, 2012; Cid et al., 2014; Smith et al., 2018; Anzolini, 2018; и др.) (рис. 1).

Важной особенностью нижней мантии также является слой D'', расположенный на границе с ядром. Этот слой мощностью до 200 км не непрерывен, а прослеживается в виде двух антиподальных про-

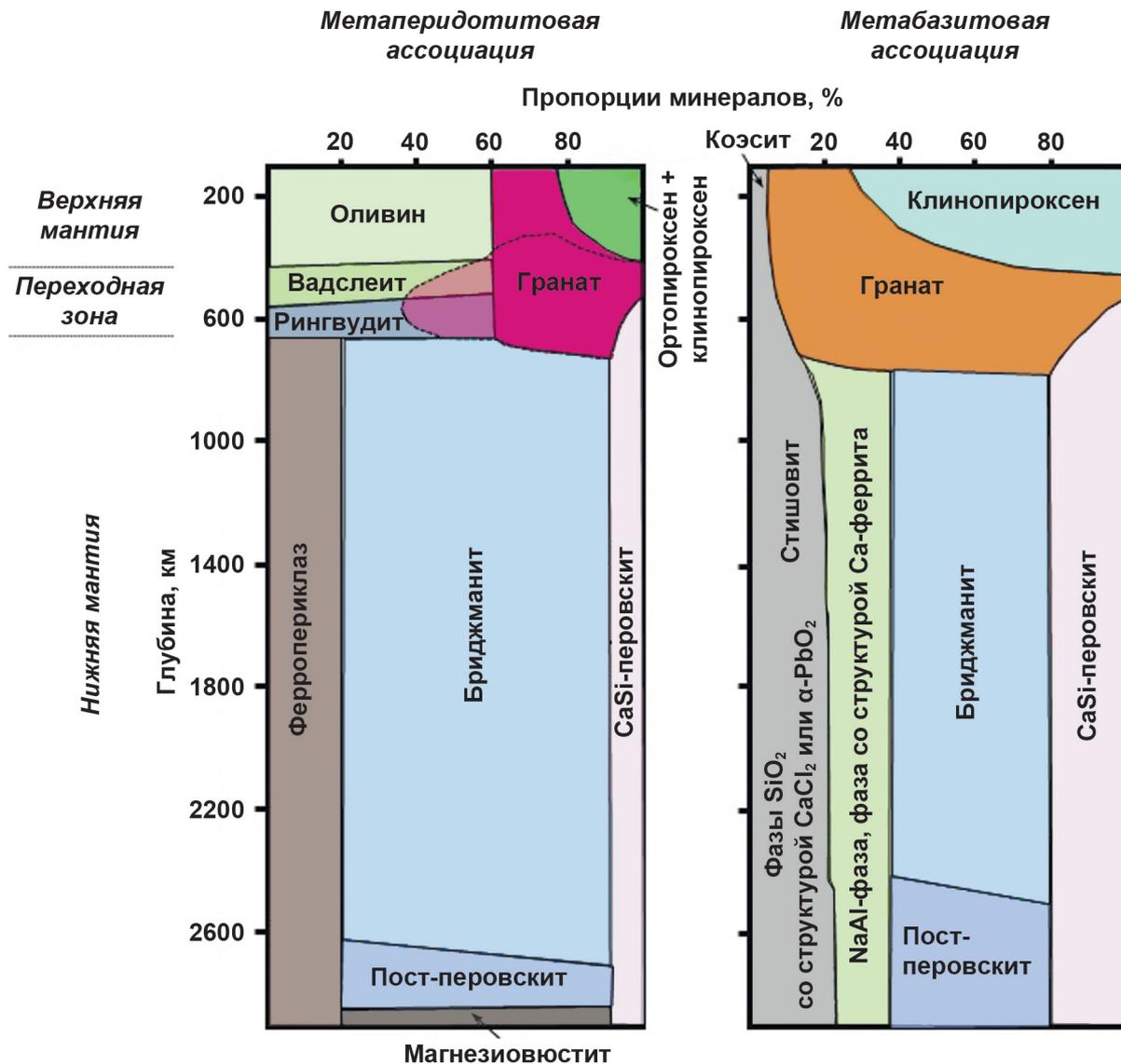


Рис. 1. Изменения минеральных ассоциаций и количественный минеральный состав в разных оболочках мантии в зависимости от температуры, давления и химического состава.

Fig. 1. Variation of mineral associations and quantitative share of minerals in different spheres of mantle depending on temperature, pressure and chemical composition.

винций пониженных скоростей поперечных сейсмических волн на границе ядра и мантии, обозначаемых как LLVSP (large low-shear-velocity provinces), или супервеллы. Считается, что именно эти провинции, Африканская (Тузо) и Тихоокеанская (Джейсон), являются источниками периодически возникающих мощных восходящих потоков, приводящих к плавлению мантийного вещества в приповерхностных условиях и возникновению крупных магматических провинций (LIPs). Эти провинции представлены обильными, преимущественно мафическими продуктами магматизма, внедрившимися и изливавшимися в течение коротких импульсов, продолжительностью до 5 млн лет. Среди магматических комплексов LIPs на континентах наиболее обильными являются обширные трапповые излияния; в случае их эрозии сохраняются их подводные каналы в виде систем долеритовых даек и силлов. В качестве менее обильных, но типичных сопровождающих магматических комплексов выступают базит-ультрабазитовые интрузии, в том числе расслоенные, трахибазальты, пикробазальты, А-граниты и связанные с ними риолиты, щелочные, карбонатитовые интрузии и кимберлиты.

Изучение кристаллических включений в алмазах в сопоставлении с экспериментальными данными о P - T условиях образования минеральных парагенезисов этих включений и с геофизическими данными о свойствах мантии свидетельствует о том, что глубина образования алмазов варьирует от низов литосферы в верхах верхней мантии до основания нижней мантии (Harte, 2010; Harte, Hudson, 2013). При этом доля алмазов, содержащих минеральные включения, характерные для нижней мантии, составляет лишь первые проценты от общего количества алмазов. Алмазы, которые выносятся в кимберлитовом веществе на земную поверхность, ксеногенны. Они образуются в мантийных высокобарических условиях на глубине не менее 150–250 км (ниже границы равновесия графит – алмаз) (Соболев, 1974). Время образования алмазов и их появления на поверхности Земли обычно не совпадает. Главная роль алмазоносных кимберлитовых или иных глубинных расплавов – преимущественно транспортная, а возраст алмазов и содержащих их ксеногенных мантийных фрагментов в фанерозойских и редко нео- или мезопротерозойских (рифейских) молодых кимберлитовых трубках значительно древнее и может достигать 3 млрд лет и более (Burgess et al., 2004; Richardson et al., 2004). В то же время сами кимберлиты, как правило, фанерозойские и редко нео- или мезопротерозойские (рифейские). Высокопродуктивные алмазоносные кимберлиты приурочены исключительно к кратонам архейского возраста, причем к тем участкам, где литосфера имеет наибольшую мощность, т. е. образует килевидные выступы в астеносферу (рис. 2).

Как показано (Torsvik et al., 2010), LIPs и кимберлиты на палеоконтинентальных реконструкциях тяготеют преимущественно к африканскому LLVSP. При этом наблюдается особо выраженная пространственная корреляция LIPs и кимберлитов с проекцией контура 1% замедления S -волн, названного PGZ (plume generation zone). Все это характеризует африканский LLVSP как источник глубинных плюмов, обогащенных щелочами, вызывающих, в свою очередь, образование кимберлитов. Подобную связь, хотя и менее четкую, демонстрируют и родственные кимберлитам карбонатиты (Kogarko, Veselovskiy, 2017; Kogarko, 2022). Однако есть и кластеры карбонатитов, расположенные над областями повышенных скоростей на границе ядро – мантия, но, возможно, они связаны с плюмами, образующимися над стагнирующими слэбами литосферы в промежуточной зоне между нижней мантией и верхней (Courtillet et al., 2003) (рис. 3).

Вынос разноглубинных алмазов на поверхность – неоспоримое свидетельство конвекции (в виде плюмовой активности) в мантии (Davies et al., 2004a; Doucet et al., 2021). Таким образом, пополняется все новыми фактами независимый источник сведений, подтверждающий реальность существования плюмов, охватывающих всю мантию, что немаловажно на фоне постоянно возобновляющейся дискуссии о плюмах и их классификации по глубинности зарождения (Courtillet et al., 2003; Пучков, 2009, 2016; см. также ссылки в этих работах). Вместе с тем исследователи, изучающие минеральные включения в алмазах, особенно когда это касается сверхглубинных алмазов, сталкиваются с трудностями, связанными с тем, что рассматриваемые минералы на пути к поверхности испытывают ретроградные изменения, резорбцию, иногда и полное растворение (Brenker et al., 2002; Zedgenizov et al., 2020). Эти обстоятельства снижают вероятность встречаемости сверхглубинных минералов в алмазах и требуют особого учета при вынесении окончательных суждений о реальности существования глубинных плюмов (Doucet et al., 2021; см. также ссылки в этой работе).

АЛМАЗЫ В ОКЕАНИЧЕСКОЙ КОРЕ И ОФИОЛИТАХ

Отдельный вопрос – характеристика алмазов в океанической коре и ее древних аналогах. В отличие от континентов возраст коры в океанах не превышает 200 млн лет, поскольку вся более древняя кора субдуцирована. Геохимической особенностью океанических алмазов является однородный легкий изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C}$ колеблется от -28 до -19% , в среднем $-25 \pm 4\%$), в то время как сверхглубинные алмазы содержат $\delta^{13}\text{C}$ от -28 до 3% , в среднем $-8 \pm 9\%$. Описаны случаи, когда алмазы с облегченным изотопным составом в цен-

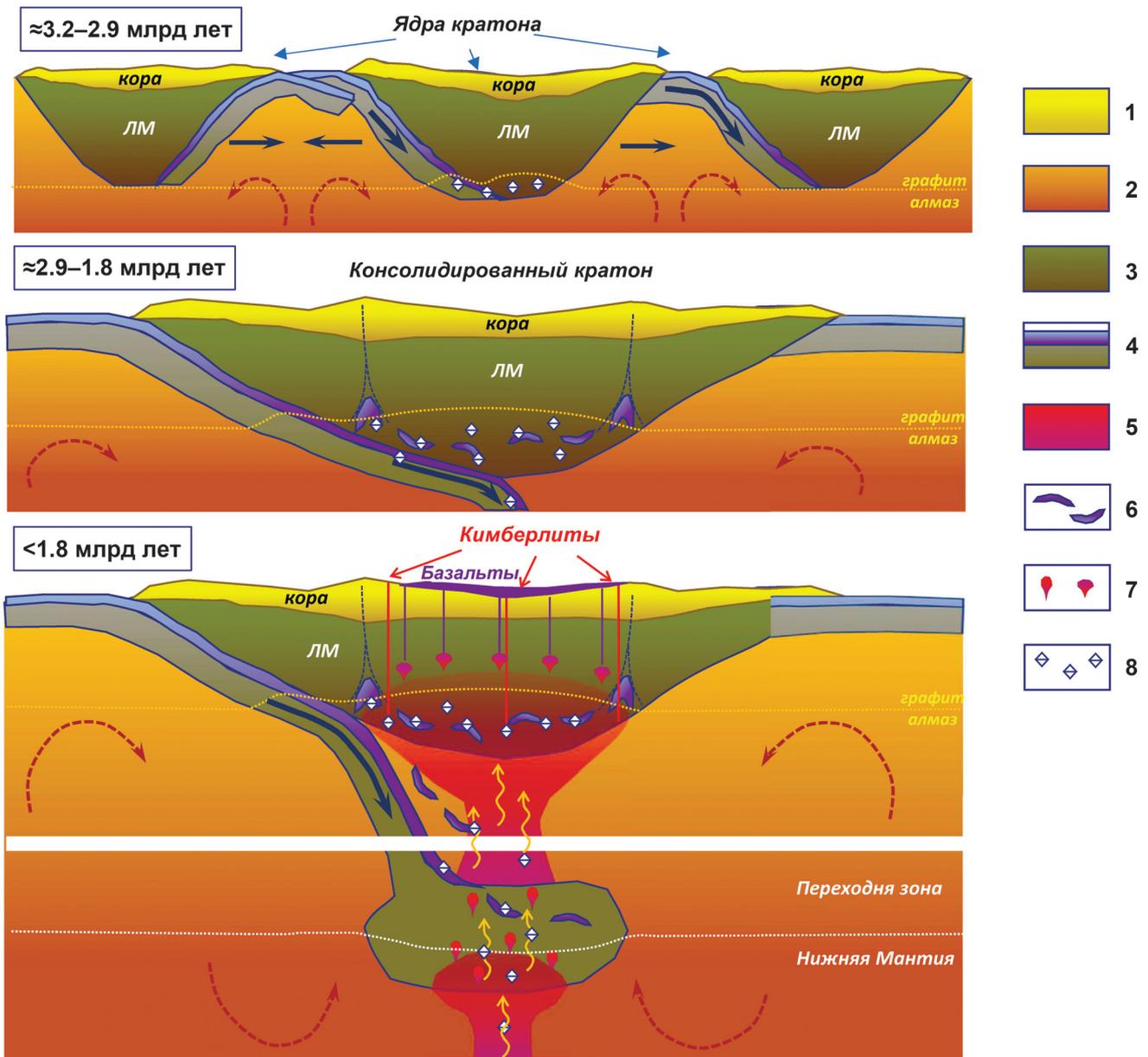


Рис. 2. Схема формирования и накопления алмазов в мантии и земной коре на фоне зон субдукции и плюма в разное геологическое время.

1 – кора кратона, 2 – мантия, 3 – литосферная мантия (ЛМ), 4 – слэб океанической литосферы, 5 – плюм, 6 – эклогиты в мантии, 7 – очаги плавления в мантии, 8 – алмазы.

Fig. 2. Formation and accumulation of diamonds in mantle and Earth’s crust at the background of subduction zones and plume, in different geological time.

1 – crust of a craton, 2 – mantle, 3 – lithospheric mantle (LM), 4 – slab of oceanic lithosphere in subduction zone, 5 – plume, 6 – eclogites in the mantle, 7 – melting points in the mantle, 8 – diamonds.

тре кристаллов сменяются углеродом мантийного типа в оторочке, что может быть объяснено геохимическим обменом с глубокими частями литосферы кратонов.

Находки алмазов в современной океанической коре, которые чрезвычайно редки и противоречи-

вы (о-ва Гавайи и Малаита), очевидным образом могут быть связаны с плюмами (Гавайи принадлежат типу ОИВ в вулканической гряде с правильной возрастной (time progressive) последовательностью, характерной для индивидуальных плюмов, а острова Малаита принадлежат плато Онтонг Джа-

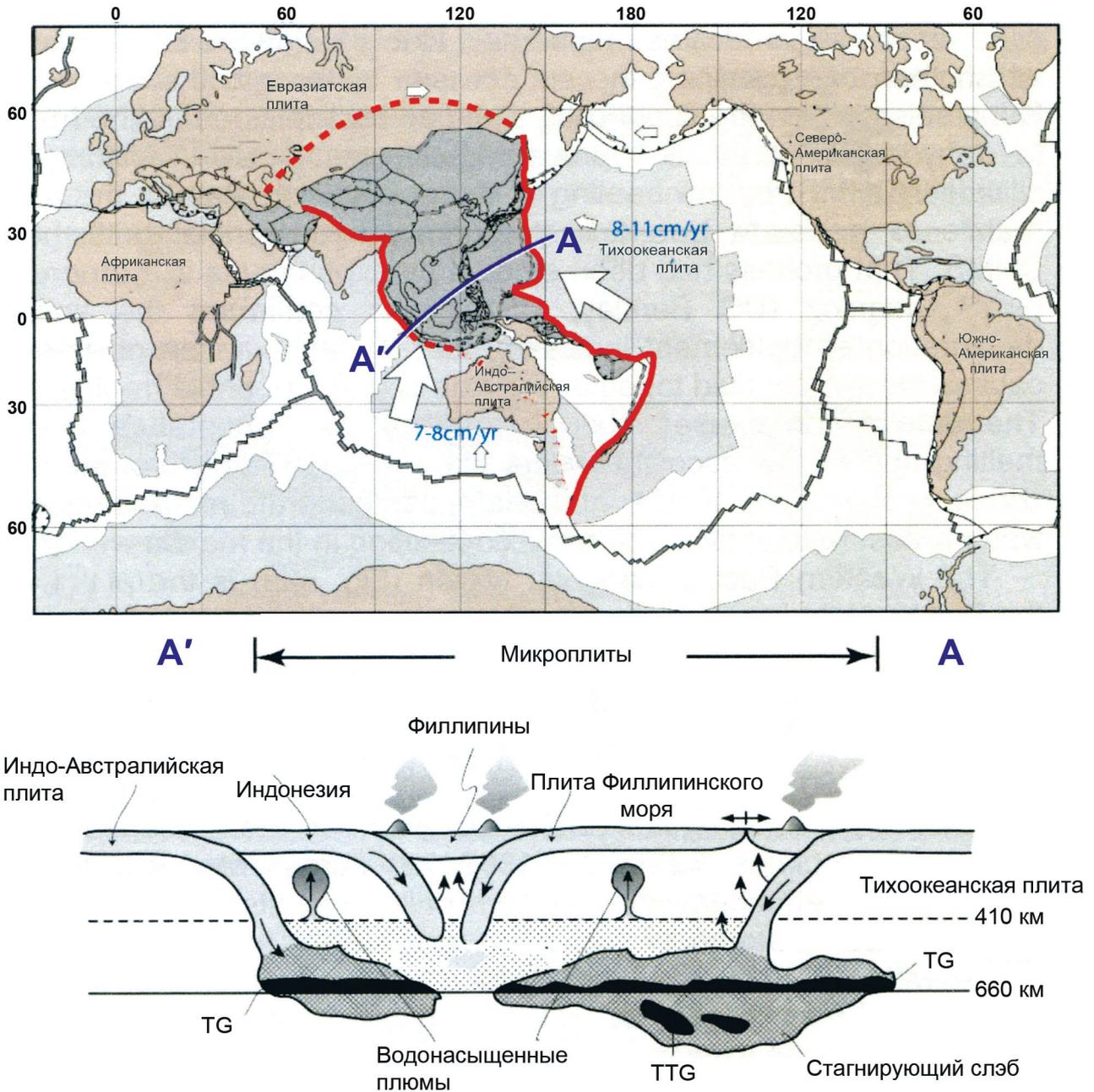


Рис. 3. Западно-Перитихоокеанская треугольная зона субдукции и связанные с ней плюмы “промежуточно-го” типа (Maruyama, Safonova, 2019, с изменениями: уточнена конфигурация треугольной зоны).

TTG – тоналит-тронджемит-гранодиоритовая ассоциация.

Fig. 3. West-Peripacific triangular zone of subduction and plumes of “transitional” type, connected with it (Maruyama, Safonova, 2019, with modification: the configuration of the triangular zone is changed).

TTG – a tonalite-trondhjemite-granodiorite association.

ва – океанической разновидности LIP (O-LIP). Алмазы содержатся также в офиолитах (фрагментах бывшей океанической коры, аккрезированной и обдуцированной в складчатых поясах). Здесь мы не рассматриваем UHP-комплексы офиолитов, связанные с поверхностью зоны субдукции; откат зо-

ны вызывал возвратное движение мантии – всплытие метаморфических комплексов с глубин десятков километров (иногда свыше 100 км – и тогда в них могли содержаться алмазы). Нас интересует преимущественно модель захвата алмазов плюмами из более глубокой мантии, выноса их к осно-

ванию океанической литосферы и далее к земной поверхности. Этот сценарий был предложен для объяснения формирования предполагаемых алмазоносных офиолитов Урала и некоторых других регионов (Иванов, 2013). Такие УНР-комплексы в офиолитах встречаются чаще, чем в современной океанической коре. В настоящее время было описано 13 местонахождений алмазов в офиолитах с возрастом от 125 до 430 млн лет, в большинстве своем связанных с плюмовыми источниками типов O-LIP и OIB (Doucet et al., 2021); 7 из них принадлежат зоне меланжа в сутурном поясе Ярлунг-Цангпо Тибета. Остальные находятся в провинциях и районах Хегеншань (внутренняя Монголия, Китай), Сартохай (Западная Джунгария, Китай), Мирдита (Албания), Мийткыйна (Мьянмар), Рай-Из (Полярный Урал), Розанти-Карсанти (Восточные Тавриды, Турция). В ряде публикаций отмечается парагенетическое присутствие алмазов в хромититах; в свою очередь, хромититы пространственно связаны с дунитами, образующими тела в гарцбургитах.

Справедливости ради следует отметить, что трактовка алмазов в океанической литосфере и офиолитах, а также островодужных комплексах как минералов *in situ* не является общепринятой: в последнее время появился ряд публикаций, трактующих такие алмазы как результат засорения проб при обработке их алмазосодержащим инструментом (Похиленко и др., 2019; и др.). Эти выводы подверглись критике со стороны Э.М. Галимова и Ф.В. Каминского (2021). Они предлагают модель восходящего потока мантийного вещества, который формирует океаническую кору в области срединно-океанических хребтов. В отличие от материковой литосферы, где проявление мантийной алмазоносности связано, как правило, с магматизмом кимберлитового и лампроитового типов, характеризующимся обильным углекислым флюидом, алмазообразование в океанической литосфере происходит в условиях среды, бедной флюидом и содержащей углерод преимущественно в его восстановленных формах, в условиях очень низкой фугитивности кислорода. Алмазы выносятся мантийным астеносферным потоком в виде наноразмерных частиц. Кристаллизация и наращивание алмаза протекает в парагенезисе с формированием хромититов, которые возникают при просачивании базальтоидной магмы через гарцбургиты литосферы. Именно в ходе этого процесса в зонах просачивания гарцбургиты, обедняясь легкоплавкой компонентой, превращаются в дуниты, а содержащиеся в них алмазосодержащие хромшпинели концентрируются в виде подформных залежей хромититов (Батанова, Савельева, 2009; Пучков, 2016, 2017). Последующее вовлечение океанической литосферы в зону субдукции может приводить к формированию алмазов в островодужных вулканитах (Толбачик, Авача).

В изложенной модели Э.М. Галимова и Ф.В. Каминского отсутствует упоминание о возможной роли плюмов при выносе алмазов к поверхности океанической литосферы. Однако мы уже отмечали прямую связь некоторых из находок океанических алмазов с OIB и O-LIPs вне действия COX (см. ранее). Тем не менее можно найти и примеры наложения и взаимодействия плюмовых и спрединговых геодинамических процессов (Пучков, 2016).

МИНЕРАЛЬНЫЕ ВКЛЮЧЕНИЯ В СВЕРХГЛУБИННЫХ АЛМАЗАХ

Многолетние исследования минеральных включений в сверхглубинных алмазах позволили выделить в них три типа минеральных ассоциаций переходной зоны и нижней мантии: метAPERИДОТИТОВАЯ, МЕТАБАЗИТОВАЯ (Harte, 2010) и КАРБОНАТИТОВАЯ (Kaminsky, 2012). МетAPERИДОТИТОВАЯ ассоциация преобладает в нижнемантийных алмазах и состоит из ферропериклаза (Mg, Fe)O, бриджманита (Mg, Fe)SiO₃ со структурой перовскита, фазой CaSiO₃ со структурой перовскита, джеффбенита (тетрагональной фазой альмандин-пиропового состава – TAPP). Метабазитовая ассоциация, образование которой главным образом связано с субдукцией океанической коры в основание переходной зоны, содержит майджоритовый гранат, стишовит, фазы Ca(SiTi)O₃ со структурой и некоторых других фаз (например, фазы Egg (AlSiO₃OH) с тетрагональной структурой). Карбонатитовая ассоциация представлена различными карбонатами, фосфатами, галидами и ассоциирующими минералами. Районы, где обнаружены глубинные алмазы, принадлежавшие нижней мантии, включают несколько континентов – Южную Африку и Южную Австралию: Трубка Коффифонтейн (Scott Smith et al., 1984; Moore et al., 1986); Орророо: район Южной Австралии, алмазы из кимберлитовой дайки K7 и древних россыпей (Tappert et al., 2009); Бразилию – штат Мато Гроссо, россыпное месторождение Сан Луи в районе Жуина. Позже нижнемантийные ассоциации были обнаружены в алмазах из коренных трубок в тех же и других районах: Пандреа и Коллиер-4 и из россыпи в р. Мачадо (Bulanova et al., 2008; Kaminsky et al., 2009a, b, 2010; см. также ссылки в этих работах); Северо-Западная Африка, Гвинея – россыпь Канкан (Stachel et al., 2000, 2002, 2005); Канада – провинция Слейв в Северо-Западных территориях, где глубинные включения найдены в трубках DO27, DO18, Рэнч Лэйк и Панда (Davies et al., 2004b; Tappert et al., 2005a, b) (см. рис. 2). Упомянется еще более десятка местонахождений алмазов, для которых также можно предполагать нижнемантийное происхождение (США, Венесуэла, Юго-Восточная Африка, россыпи Северо-Восточной Якутии и микроалмазы трубки Удачная).

Некоторые минеральные ассоциации (магнезиовюстит, самородное железо, карбиды железа), возможно, связаны со слоем D” на границе ядро – мантия (Kaminsky, Wirth, 2011). Сообщалось также о первой находке нитридов железа и карбонитридов в ассоциации с самородным железом, карбидами и переходными комплексами + карбид кремния, в алмазах из россыпей р. Рио Сорисо, Бразилия. Предполагается, что это свидетельствует о процессах инфильтрации жидкого металла и легких элементов из верхнего ядра в слой D” (Kaminsky, Wirth, 2017). В то же время высказывались и возражения (Zedgenizov, Litasov, 2017), но, во всяком случае, экспериментальные данные говорят о принципиальной возможности сверхглубинного происхождения этих минералов в свете сведений о фазовых переходах изучаемых веществ при давлениях 42–53 ГПа (Qin et al., 2020).

По результатам исследований минеральных включений в сверхглубинных алмазах высказывалось мнение, что петрологические свидетельства самого глубокого поступления мантийного вещества на поверхность ограничиваются верхними горизонтами нижней мантии или переходным слоем между нижней и верхней мантиями (до 650–700 км). Включения ферропериклаза в некоторых алмазах не подтверждают вовлечение и более глубоких горизонтов мантии и не опровергают его, этот тезис требует уточнения. Речь может идти о влечениях в алмазах окисного соединения (Mg, Fe)O, сильно обогащенного Mg, т. е. о собственно ферропериклазе в узком смысле слова. Однако редкие включения, обогащенные Fe, обычно описываются как магнезиовюстит, они встречаются в алмазах, в которых отсутствуют силикатные включения. Высказывались предположения об их “ультраглубинном происхождении в основании мантии” (Wirth et al., 2014; см. также ссылки в этой работе). Учитывая пониженные сейсмические скорости высокожелезистых (Mg, Fe)O и другие экспериментальные результаты, эти авторы склоняются к выводу, что алмазы, содержащие такие включения, образовались в подошве слоя D” на границе с ядром (см. рис. 1). Обогащение ферропериклаза железом, как в случае Рио Сорисо (Бразилия), еще ранее описанное в работе (Hauman et al., 2005), свидетельствует, по мнению этих авторов, о сверхглубинном (>1700 км) его происхождении, так что материал, возможно, поднимался в плюме, образованном на границе кора – мантия. Еще значительно ранее высказано предположение (Kesson, Fitz Gerald, 1992), что сосуществование перовскита и магнезиовюстита возможно при давлениях, отвечающих глубинам 800–1200 км в мантии.

Плюмы, возникающие на границе ядро – мантия и достигающие поверхности Земли (“моргановские”), еще можно подвергать сомнению, но существование “промежуточных”, или “вторич-

ных”, возникающих в основании переходной зоны (см. рис. 3), уже невозможно оспаривать (здесь использована трехчленная классификация плюмов (Courtillot et al., 2003)). Соответственно, распределение алмазов по глубинности не противоречит представлениям о существовании стагнирующих слэбов на границе нижней и верхней мантий и связанных с ними верхнемантийных плюмов, которые вместе образуют относительно неглубокие конвективные ячей (Зорин и др., 2006; Maruyama, Safonova, 2019; Лобковский и др., 2021; и др.). Наличие таких ячеек не противоречит существованию и более крупных контуров конвекции, включающих нисходящие потоки зон субдукции – от поверхности Земли до ядра и восходящие потоки суперплюмов – от ядра к поверхности.

За десятилетие, последовавшее за обсуждаемыми публикациями, стала известна, помимо ферропериклаза, серия минералов нижней мантии и переходной зоны, впервые идентифицированных в естественных условиях (Kaminsky, 2020): многие получили собственные имена: бриджманит – (Mg, Fe)SiO₃ (Tschauner et al., 2014) – высокобарический минерал с перовскитовой структурой (MgSi-перовскит), “доминирующий материал нижней мантии на глубинах 660–2700 км” (Zedgenizov et al., 2020), джеффбенит, ранее называемый TAPP, – (Mg, Fe²⁺, Ca)₃(Al, Fe³⁺, Cr)₂(Si, Ti)₃O₁₂, брейит – триклинная форма CaSiO₃ (Brenker et al., 2018), а также эллинаит – CaCr₂O₄. Один из главных минералов нижней мантии, CaSiO₃, все еще не получил название (Peruzzo et al., 2018), хотя это была первая природная фаза CaSiO₃ со структурой перовскитового типа, указывающая, согласно лабораторным экспериментам, на очень глубокое мантийное происхождение (Nestola et al., 2018). Недавно были открыты и другие неназванные оксиды (орторомбический MgO и CaCr₂O₄), фосфаты (Na₄Mg₃(PO₄)₂(P₂O₇) и Fe₂Fe₅(P₂O₇)₄), флюорид (Ba, Sr)AlF₅ и др. Среди этих новых минеральных фаз особо интересен твердый кубический азот, δ-N₂ (Kaminsky et al., 2013, 2015; Navon et al., 2017) и лед-VII (ice-VII) (Tschauner et al., 2018). Такие включения чистого азота, наряду с ранее идентифицированными в алмазе (Kaminsky, Wirth, 2017), демонстрируют значительную роль азота (и, возможно, других легких элементов) в глубинных зонах нашей планеты. Лед-VII, как и молекулярный H₂, ассоциирующий с CH₄, вокруг минеральных включений в алмазах (Smith et al., 2018) указывают на присутствие водосодержащих и углеродистых флюидов, что уже ранее предполагалось по определенным геохимическим и геофизическим данным. Было выяснено, что под действием сверхвысоких давлений химические элементы могут приобретать драматически новые свойства в нижней мантии. В результате неожиданные кристаллические структуры и совершенно новые вещества были предсказаны *ab initio* (e.g.,

Lyakhov et al., 2012); некоторые из них были синтезированы в экспериментах (Hu et al., 2016). Получил дополнительное подтверждение нижнемантийный характер алмазов из района Жуина (Бразилия), образование которых связано с рециклингом океанической коры, базальтов и пелагических осадков, субдуцированных до глубин верхней части нижней мантии (Cid et al., 2014; см. также ссылки в этой работе).

Определенная проблема связана с тем, что алмазы со сверхглубинными включениями встречаются сравнительно редко и составляют лишь 5–6% от общего количества алмазов. Возможны два объяснения этого явления (или оба объяснения сразу). Во-первых, это не вполне благоприятные условия для образования алмазов на сверхбольших глубинах и соответствующих высоких температурах (фугитивность кислорода и другие условия). Во-вторых, это их ретроградные преобразования на границе нижней и верхней мантий. Необходимо учитывать изменения, которые испытывают сверхглубинные минералы при подъеме к поверхности Земли, в частности, когда они пересекают, будучи в твердом состоянии, критическую глубину 650–670 км, где резко изменяется фазовый минеральный состав мантии. Описаны многие случаи, когда включения указывают на ретроградные изменения, а сами алмазы преобразовываются или даже аннигилируются в ходе частичной или полной резорбции под термальным воздействием плюмов и в условиях снижения давления при подъеме из нижней мантии (Kesson, Fitz Gerald, 1992; Joswig et al., 1999; Kerschhofer et al., 2000; Brenker et al., 2002; Bulanova et al., 2014; Ernst et al., 2018; Fedortchouk et al., 2019; Zedgenizov et al., 2020). На основании этих и многих других данных справедливо отмечается (Smith et al., 2018), что включения в подлитосферных алмазах склонны дестабилизироваться во время подъема в мантии и распадаться на более низкобарические минералы, часто расслаиваясь с образованием комплексов сложного состава. В качестве одной из частных иллюстраций можно отметить, что ретроградные изменения в процессе подъема глубинных сублитосферных минеральных ассоциаций с включениями SiO₂ в алмазах описываются в работе (Zedgenizov et al., 2019), где указывается, что все эти включения SiO₂ представлены только коэситом в ассоциации с микроблоками кианита. Однако вполне справедливо предполагается, что данные фазы образовались в результате ретроградного изменения Al-стишовита, о чем дополнительно свидетельствуют значительные внутренние стрессы включений и деформации вокруг них.

Хорошо известно, что сохранность высокобарических комплексов (УНР), выносимых на земную поверхность, в частности алмазов, зависит от скорости их эксгумации (e.g. Varuah et al., 2013). Большинство геофизических моделей указывают на уве-

личение вязкости мантии глубже 1000 км (Rudolph et al., 2015), что может коррелировать со снижением проницаемости нижней мантии для части субдуцирующих слэбов, с замедлением конвекции и, соответственно, с меньшей вероятностью сохранности первичных минеральных парагенезисов, выносимых медленно поднимающимся глубинным (плюмовым) веществом. Движение (транспортировка) сверхглубинных алмазов к поверхности, вероятно, является медленным и длительным, нередко прерывистым процессом, что может приводить к изменению свойств и состава окружающей среды и, соответственно, смене глубинных парагенезисов включений более близповерхностными. Судя по изотопному составу углерода в алмазах ($\delta^{13}\text{C}$), его источники могут быть как изотопно-тяжелые, первично мантийные, так и изотопно-легкие, поверхностные, связанные с взаимодействием метабазитов с морской водой при низких температурах, или биогенные, принесенные в глубины в ходе субдукции. При этом тип источника углерода может меняться в ходе роста индивидуального алмаза благодаря взаимодействию с мантийным материалом от первичного мантийного в ядре кристаллов до субдукционного/корового в периферии (Schulze et al., 2004; Zedgenizov et al., 2014).

На примере алмазов ряда трубок кратона Слейв показано (Davies et al., 2004b), что отсутствие корреляции между эклогитовыми и перидотитовыми алмазами по составу минеральных включений, С-изотопов и содержанию N исключает возможность единого источника и предполагает, что эклогитовые и перидотитовые алмазы образовались в разных, изменчивых термальных и химических режимах мантии. Так, изучение алмаза из кимберлитовой трубки “Мир” позволило выделить два этапа: на первом этапе, датированном 2.1 млрд лет, образовалась ранняя эклогитовая популяция на глубине 180 км; на втором этапе 0.9 млрд лет, после резорбции, образовалась вторая популяция на глубине 120 км (Bulanova et al., 2014). Геохимические и тектонические условия формирования популяций были различными: на втором этапе предполагался разогрев мантии, связанный с рифтогенезом; возможно, источником тепла и причиной рифтогенеза в этом случае был плюм. Подобный “эпизод разогрева” между образованием юрских и мел-третичных кимберлитов, связанный, возможно, с плюмовой активностью эпохи раскрытия Южной Атлантики, предполагается в истории алмазов штата Рондонья, Бразилия (Hunt et al., 2009).

Особого объяснения, однако, требует практическое отсутствие минералов со сверхглубинными характеристиками в якутских кимберлитах; *P-T* условия их образования, судя по подробным исследованиям (Ashchepkov et al., 2010), ограничиваются низами литосферы – верхами астеносферы. Плюмы/LIPs могут не только извлекать алма-

зы и поднимать их к поверхности, но и разрушать алмазы в “алмазном окне” под действием температуры. Поэтому Якутско-Вилюйский LIP/плюм возрастом 370 млн лет вынес к поверхности большое количество алмазов, а затем через 50 млн лет термальный пульс разрушил “алмазное окно” и последующий LIP/плюм в 245–220 млн лет прошел через безалмазную литосферу. Предполагается и возможность обратного процесса с восстановлением алмазов (Ernst et al., 2018).

ВЫВОДЫ

Вынос сверхглубинных алмазов с глубин переходной зоны и нижней мантии на поверхность – неоспоримое свидетельство конвекции (в виде плюмовой активности) в мантии (Davies et al., 2004a, Doucet et al., 2021). Таким образом, новыми фактами пополняется независимый источник сведений, подтверждающий реальность существования плюмов, охватывающих всю мантию, что немало важно на фоне постоянно возобновляющейся дискуссии о плюмах и их классификации по глубинности зарождения (Courtillet et al., 2003; Пучков, 2009, 2016; см. также ссылки в этих работах). Одновременно не следует недооценивать и роль противоположно направленных ветвей конвекции, а именно субдукционных. Как отмечает Л. Когарко (Kogarko, 2022), хондритовая мантия Земли изначально содержит очень небольшие объемы щелочных элементов со значительным преобладанием Na над K. Следовательно, источником щелочных пород, в том числе кимберлитов и карбонатов, является не хондритовая мантия, а скорее всего, участки мантии, измененные под влиянием синдицированного корового материала, проникавшего на большие глубины, вплоть до верхней поверхности ядра.

Необходимо также отметить, что исследователи, изучающие минеральные включения в алмазах, особенно когда это касается сверхглубинных алмазов, сталкиваются с трудностями, связанными с тем, что изучаемые минералы на пути к поверхности испытывают ретроградные изменения, резорбцию, а иногда и полное растворение. Эти обстоятельства снижают вероятность встречаемости сверхглубинных минералов в алмазах и требуют особого учета при вынесении окончательных суждений о реальности существования суперглубинных плюмов “моргановского” типа. Рассмотренная в настоящей работе проблема тем не менее остается предметом интенсивных дискуссий и, несомненно, требует дальнейших исследований.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Батанова В.Г., Савельева Г.Н. (2009) Миграция расплавов в мантии под зонами спрединга и образование

дунинов замещения: обзор проблемы. *Геология и геофизика*, **50**(9), 992-1012.

Галимов Э.М., Каминский Ф.В. (2021) Алмазы в океанической литосфере. Вулканические алмазы и алмазы в офиолитах. *Геохимия*, **66**(1), 3-14.

Добрецов Н.Л. (2011) Основы тектоники и геодинамики. Новосибирск: Новосиб. гос. ун-т, 492 с.

Зорин Ю.А., Турутанов Е.Х., Кожевников В.М., Рассказов С.В., Иванов А.В. (2006) О природе кайнозойских верхнемантийных плюмов в Восточной Сибири (Россия) и Центральной Монголии. *Геология и геофизика*, **47**(10), 1060-1074.

Иванов К.С. (2013) К вопросу об алмазоносности ультрабазитов Урала. *Урал. геол. журн.*, **5**(95), 32-36.

Лобковский Л.И., Рамазанов М.М., Котелкин В.Д. (2021) Развитие модели верхнемантийной конвекции, сопряженной с зоной субдукции, с приложениями к мел-кайнозойской геодинамике Центрально-Восточной Азии и Арктики. *Геодинамика и тектонофизика*, **12**(3), 456-470. <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0533>

Похиленко Н.П., Шумилова Т.Г., Афанасьев В.П., Литасов К.Д. (2019) Находки алмазов на Камчатке (вулканы Толбачик и Авачинский): природный феномен или контаминация синтетическим материалом? *Геология и геофизика*, **60**(5), 606-618.

Пучков В.Н. (2009) “Великая дискуссия” о плюмах: так кто же все-таки прав? *Геотектоника*, (1), 3-22.

Пучков В.Н. (2016) Взаимосвязь плитотектонических и плюмовых процессов. *Геотектоника*, (4), 88-104.

Пучков В.Н. (2017) Оставляет ли базальтоидная магма следы в мантийных перидотитах при своем перемещении к земной поверхности? *Геологический сборник № 14. Информ. мат-лы ИГ УНЦ РАН*. СПб.: Свое издательство, 149-151.

Пушаровский Ю.М., Пушаровский Д.Ю. (2010) Геология мантии Земли. М.: ГЕОС, 140 с.

Рингвуд А.Е. (1981) Состав и петрология мантии Земли. (Пер. с англ. под ред. М.А. Богомолова, Т.И. Фроловой). М.: Недра, 584 с.

Соболев Н.В. (1974) Глубинные включения в кимберлитах и проблема состава верхней мантии. Новосибирск: Наука, 263 с.

Anzolini C. (2018) Depth of formation of super-deep diamonds. *Plinius*, **44**, 1-7.

Ashchepkov I.V., Pokhilenko N.P., Vladykin N.V., Logvinova A.M., Afanasieva V.P., Pokhilenkova L.N., Kuligin S.S., Malygina E.V., Alyмова N.A., Kostrovitsky S.I., Rotman A.Y., Mityukhin S.I., Karpenko M.A., Stegnitsky Y.B., Khemelnikova O.S. (2010) Structure and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian craton, thermobarometric study. *Tectonophysics*, **485**, 17-41.

Baruah A., Gupta A.K., Mandala N., Singh R.N. (2013) Rapid ascent conditions of diamond-bearing kimberlitic magmas: Findings from highpressure-temperature experiments and finite element modeling. *Tectonophysics*, **594**, 13-26.

Brenker F., Nestola F., Brenker L., Peruzzo L., Secco L., Harris J.W. (2018) Breyite, IMA 2018-062, CNMNC Newsletter No. 45, October 2018. *Eur. J. Mineral.*, **30**, 1037-1043.

Brenker F.E., Stachel T., Harris J.W. (2002) Exhumation of

- lower mantle inclusions in diamond: ATEM investigation of retrograde phase transitions, reactions and exsolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **198**, 1-9.
- Bulanova G.P., Smith C.B., Kohn S.C., Walter M.J., Gombo L., Kearns S. (2008) Machado River, Brazil – a newly recognised ultradeep diamond occurrence. *9th International Kimberlite Conference: Extended Abstract*, No. 9IKC-A-00233. <https://doi.org/10.29173/ikc3471>
- Bulanova G.P., Wiggers de Vries D.F., Pearson D.G., Beard A., Mikhail S., Smelov A.P., Davies R. (2014) An eclogitic diamond from Mir pipe (Yakutia), recording two growth events from different isotopic source. *Chem. Geol.*, **381**, 40-54.
- Burgess R., Kiviets G.B., Harris J.W. (2004) Ar-Ar age determinations of eclogitic clinopyroxene and garnet inclusions in diamonds from the Venetia and Orapa kimberlites. *Lithos*, **77**(1-4), 113-124.
- Cid J.P., Nardi L.V.S., Cid C.P., Gisbert P.E., Balzaretto N.M. (2014) Acid compositions in a veined-lower mantle, as indicated by inclusions of (K, Na)-Hollandite + SiO₂ in diamonds. *Lithos*, **196-197**, 42-53.
- Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. (2003) Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **205**(3/4), 295-308. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01048-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01048-8)
- Davies R.M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., McCandless T.E. (2004a) Inclusions in diamonds from the K14 and K10 kimberlites, Buffalo Hills, Alberta, Canada: diamond growth in a plume? *Lithos*, **77**(1-4), 99-111.
- Davies R.M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Doyle B.J. (2004b) Mineral inclusions and geochemical characteristics of microdiamonds from the DO27, A154, A21, A418, DO18, DD17 and Ranch Lake kimberlites at Lac de Gras, Slave Craton, Canada. *Lithos*, **77**(1-4), 39-55.
- Doucet L.S., Li Zheng-Xiang, El Dien H.G. (2021) Oceanic and super-deep continental diamonds share a transition zone origin and mantle plume transportation. *Nature Sci. Rep.*, **11**, 16958. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96286-8>
- Ernst R.E. (2014) Large Igneous Provinces. Cambridge, Cambridge University Press, 633 p.
- Ernst R.E., Davies D.R., Jowitt S.M., Campbell I.H. (2018) When do mantle plumes destroy diamonds? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **502**, 244-252.
- Fedortchouk Y., Liebske C., McCammon C. (2019) Diamond destruction and growth during mantle metasomatism: An experimental study of diamond resorption features. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **506**, 493-506.
- Foulger G.F. (2018) Are mantle plumes real? *Durham Workshop on Realism & the Earth Sciences*, 15-16 January. URL: <http://www.mantleplumes.org/PPPs.html>
- Frost D.J. (2008) The upper mantle and transition zone. *Elements*, **4**, 171-176.
- Harte B. (2010) Diamond formation in the deep mantle: the record of mineral inclusions and their distribution in relation to mantle dehydration zones. *Mineral. Mag.*, **74**(2), 189-215.
- Harte B., Hudson N.C.F. (2013) Mineral Associations in Diamonds from the Lowermost Upper Mantle and Uppermost Lower Mantle. *Proc. 10th Int. Kimberlite Conf.* Vol. 1. (Eds D.G. Pearson et al.). New Delhi, Springer, 235-253. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1170-9>
- Hayman P.C., Kopylova M.G., Kaminsky F.V. (2005) Lower mantle diamonds from Rio Soriso (Juina area, Mato Grosso, Brazil). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **149**, 430-445. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0657-8>
- Hunt L., Stachel T., Morton R., Grütter H., Crease R.A. (2009) The Carolina kimberlite, Brazil—Insights into an unconventional diamond deposit. *Lithos*, **112S**, 843-85.
- Joswig W., Stachel T., Harris J.W., Baur W.H., Brey G.P. (1999) New Ca-silicate inclusions in diamonds – tracers from the lower mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **173**, 1-6.
- Kaminsky F. (2012) Mineralogy of the lower mantle: a review of 'super-deep' mineral inclusions in diamond. *Earth Sci. Rev.*, **110**(1), 127-147.
- Kaminsky F. (2020) Basic problems concerning the composition of the Earth's lower mantle. *Lithos*, 364-365, 105515. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105515>
- Kaminsky F., Wirth R. (2011) Iron carbide inclusions in lower-mantle diamond from Juina, Brazil. *Canad. Mineral.*, **49**(2), 555-572.
- Kaminsky F., Wirth R. (2017) Nitrides and carbonitrides from the lowermost mantle and their importance in the search for Earth's "lost" nitrogen. *Amer. Mineral.*, **102**, 1667-1676.
- Kaminsky F., Wirth R., Schreiber A. (2013) Carbonatitic inclusions in deep mantle diamond from Juina, Brazil: New minerals in the carbonate-halide association. *Canad. Miner.*, **51**(5), 669-688. <https://doi.org/10.3749/canmin.51.5.669>
- Kaminsky F., Ryabchikov I.D., Wirth R. (2015) A primary natrocarbonatitic association in the Deep Earth. *Mineral. Petrol.*, **110**. <https://doi.org/10.1007/s00710-015-0368-4>
- Kaminsky F., Khachatryan G.K., Andreatza P., Araujo D., Griffin W.L. (2009a) Superdeep diamonds from kimberlites in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil. *Lithos*, **112S**(2), 833-842.
- Kaminsky F., Wirth R., Matsyuk S., Schreiber A., Thomas R. (2009b) Nyerereite and nahcolite inclusions in diamond: evidence for lower-mantle carbonatitic magmas. *Mineral. Mag.*, **73**(5), 797-816.
- Kaminsky F., Sablukov S.M., Belousova E.A., Andreatza P., Tremblay M., Griffin W.L. (2010) Kimberlitic sources of super-deep diamonds in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil. *Lithos*, **114**(1-2), 16-29.
- Kerschhofer L., Schärer U., Deutsch A. (2000) Evidence for crystals from the lower mantle: baddeleyite megacrysts of the Mbuji Mayi kimberlite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **179**, 219-225.
- Kesson S.E., Fitz Gerald J.D. (1992) Partitioning of MgO, FeO, NiO, MnO and Cr₂O₃ between magnesium silicate perovskite and magnesiowüstite: implications for the origin of inclusions in diamond and the composition of the lower mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **111**(2-4), 229-240. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90181-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90181-T)
- Kogarko L.N. (2022) Plume related kimberlites and carbonatites. *Mineral. Petrol.*, <https://doi.org/10.1007/s00710-022-00789-9>
- Kogarko L.N., Veselovskiy R. (2017) Geodynamic regime of the carbonatites (absolute paleotectonic reconstructions). *Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits*. Proc. of XXXIV International Conference. Moscow: GEOKHI RAS, 105-108.
- Lyakhov A., Oganov A., Stokes H., Zhu Q. (2012) New developments in evolutionary structure prediction algorithm USPEX. *Computer Phys. Communications*, **184**. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.12.009>
- Maruyama S., Safonova I. (2019) Orogeny and mantle dy-

- namics – role of tectonic erosion and second continent in the mantle transition zone. Novosibirsk: IPC NSU, 208 p.
- Moore R.U., Utter M.L., Rickard R.S., Harris J.W., Gurney J.J. (1986) The occurrence of moissanite and ferro-periclase as inclusions in diamond. *4th International Kimberlite Conference Extended Abstracts*. Perth: Geological Society of Australia Abstracts, **16**, 409-411. <https://doi.org/10.29173/ikc1186>
- Morgan W.J. (1971) Convective Plumes in the Lower Mantle. *Nature*, **230**, 42-43.
- Navon O., Wirth R., Schmidt C., Jablon B.M., Schreiber A., Emmanuel S. (2017) Solid molecular nitrogen (6-N₂) inclusions in Juina diamonds: Exsolution at the base of the transition zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **464**, 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.035>
- Nestola F., Burnham A., Peruzzo L., Tauro L., Alvaro M., Walter M., Gunter M., Anzolini Ch., Kohn S. (2016) Tetragonal almandine-pyrope phase, TAPP: Finally a name for it, the new mineral jeffbenite. *Mineral. Mag.*, **80**. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.059>
- Nestola F., Korolev N., Kopylova M., Rotiroti N., Pearson D.G., Pamato M.G., Alvaro M., Peruzzo L., Gurney J.J., Moore A.E., Davidson J. (2018) CaSiO₃ perovskite in diamond indicates the recycling of oceanic crust into the lower mantle. *Nature*, **555**, 237-241. <https://doi.org/10.1038/nature25972>
- Puchkov V.N., Ernst R.E., Ivanov K.S. (2021) The importance and difficulties of identifying mantle plumes in orogenic belts: An example based on the fragmented large igneous province (LIP) record in the Ural fold belt. *Precamb. Res.*, **361**, 106186.
- Qin F., Qin S., Prakapenka V.B. (2020) High pressure behaviors and novel high-pressure phase of Si₃N₄ and TiN. *Lithos*, **372-373**(1), 105677. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105677>
- Richardson S.H., Shirey S.B., Harris J.W. (2004) Episodic diamond genesis at Jwaneng, Botswana, and implications for Kaapvaal craton evolution. *Lithos*, **77**(1-4), 143-154.
- Rudolph M.L., Lekić V., Lithgow-Bertelloni C. (2015) Viscosity jump in Earth's mid-mantle. *Science*, **350**(6266), 1349-1352. <https://doi.org/10.1126/science.aad1929>
- Schulze D.J., Harte B., Valley J.W., De R. Channer D.M. (2004) Evidence of subduction and crust-mantle mixing from a single diamond. *Lithos*, **77**(1-4), 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.022>
- Scott Smith B.H., Danchin R.V., Harris J.W., Stracke K.J. (1984) Kimberlites near Orroroo, South Australia. *Kimberlites 1: Kimberlites and Related Rocks*. (Ed. J. Kornprobst). Amsterdam, Elsevier, 121-142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42273-6.50017-1>
- Smith E.M., Shirey S.B., Richardson S.H., Nestola F., Bullock E.S., Wang J., Wang W. (2018) Blue boron-bearing diamonds from Earth's lower mantle. *Nature*, **560**, 84-86.
- Stachel T., Brey G.P., Harris J.W. (2005) Inclusions in Sublithospheric Diamonds: Glimpses of Deep Earth. *Elements*, **1**(2), 73-78.
- Stachel T., Harris J.W., Brey G.P., Joswig W. (2000) Kankan diamonds (Guinea) II: lower mantle inclusion parageneses. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **140**, 16-27.
- Stachel T., Harris J.W., Aulbach S., Deines P. (2002) Kankan diamonds (Guinea) III: 61JC and nitrogen characteristics of deep diamonds. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **142**(4), 465-475.
- Stixrude L., Lithgow-Bertelloni C. (2007) Influence of phase transformations on lateral heterogeneity and dynamics in Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **263**, 45-55.
- Tappert R., Stachel T., Harris J.W., Shimizu N., Brey G.P. (2005a) Mineral inclusions in diamonds from the Slave Province, Canada. *Europ. J. Mineral.*, **17**(3), 423-440.
- Tappert R., Stachel T., Harris J.W., Muehlenbachs K., Ludwig T., Brey G. (2005b) Diamonds from Jagersfontein (South Africa): messengers from the sublithospheric mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **150**(5), 505-522.
- Tappert R., Foden J., Stachel T., Muehlenbachs K., Tappert M., Wills K. (2009) The diamonds of South Australia. *Lithos*, **112S**, 806-821.
- Torsvik T.H., Burke K., Steinberger B., Webb S.J., Ashwal L.D. (2010) Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary. *Nature*, **466**, 352-355. <https://doi.org/10.1038/nature09216>
- Tschauner O., Ma Ch., Beckett J.R., Prescher C., Prakapenka V.B., Rossman G.R. (2014) Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. *Science*, **346**(6213), 1100-1102. <https://doi.org/10.1126/science.1259369>
- Tschauner O., Huang S., Greenberg E., Prakapenka V.B., Ma Ch., Rossman G.R., Shen A.H., Zhang D., Newville M., Lanzirrotti A., Tait K. (2018) Ice-VII inclusions in diamonds: evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle. *Science*, **359**(6380), 1136-1139. <https://doi.org/10.1126/science.aao3030>
- Walter M.J., Kohn S.C., Araujo D., Bulanova G.P., Smith C.B., Gaillou E., Wang J., Steele A., Shirey S.B. (2011) Deep mantle cycling of oceanic crust: evidence from diamonds and their mineral inclusions. *Science*, **334**, 54-57.
- Wirth R., Dobrzhinetskaya L., Harte B., Schreiber A., Green H.W. (2014) High-Fe (Mg, Fe)O inclusion in diamond apparently from the lowermost mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **404**, 365-375.
- Zedgenizov D.A., Litasov K.D. (2017) Looking for “missing” nitrogen in the deep Earth. *Mineralogist*, **102**, 1769-1770.
- Zedgenizov D.A., Kagi H., Shatsky V.S., Ragozin A.L. (2014) Local variations of carbon isotope composition in diamonds from São-Luis (Brazil): Evidence for heterogeneous carbon reservoir in sublithospheric mantle. *Chem. Geol.*, **363**, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.033>
- Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kagi H., Yurimoto H., Shatsky V.S. (2019) SiO₂ Inclusions in Sublithospheric Diamonds. *Geochem. Int.*, **57**(9), 964-972.
- Zedgenizov D., Kagi H., Ohtani E., Tsujimorie T., Komatsu K. (2020) Retrograde phases of former bridgmanite inclusions in superdeep diamonds. *Lithos*, **370-371**, 105659. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105659>

REFERENCES

- Anzolini C. (2018) Depth of formation of super-deep diamonds. *Plinius*, **44**, 1-7.
- Ashchepkov I.V., Pokhilenko N.P., Vladykin N.V., Logvinova A.M., Afanasieva V.P., Pokhilenkova L.N., Kuligin S.S., Malygina E.V., Alymova N.A., Kostrovitsky S.I., Rotman A.Y., Mityukhin S.I., Karpenko M.A., Stegnitsky Y.B., Khemelnikova O.S. (2010) Structure

- and evolution of the lithospheric mantle beneath Siberian craton, thermobarometric study. *Tectonophysics*, **485**, 17-41.
- Baruah A., Gupta A.K., Mandala N., Singh R.N. (2013) Rapid ascent conditions of diamond-bearing kimberlitic magmas: Findings from highpressure-temperature experiments and finite element modeling. *Tectonophysics*, **594**, 13-26.
- Batanova V.G., Savelieva G.N. (2009) Migration of melts in the mantle under spreading zones and genesis of dunites of substitution: a review of the problem. *Russ. Geol. Geophys.*, **50**(9), 763-778 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **50**(9), 992-1012).
- Brenker F., Nestola F., Brenker L., Peruzzo L., Secco L., Harris J.W. (2018) Breyite, IMA 2018-062, CNMNC Newsletter No. 45, October 2018. *Eur. J. Mineral.*, **30**, 1037-1043.
- Brenker F.E., Stachel T., Harris J.W. (2002) Exhumation of lower mantle inclusions in diamond: ATEM investigation of retrograde phase transitions, reactions and exsolution. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **198**, 1-9.
- Bulanova G.P., Smith C.B., Kohn S.C., Walter M.J., Gobbolo L., Kearns S. (2008) Machado River, Brazil – a newly recognised ultradeep diamond occurrence. *9th International Kimberlite Conference: Extended Abstract*, No.9IKC-A-00233. <https://doi.org/10.29173/ikc3471>
- Bulanova G.P., Wiggers de Vries D.F., Pearson D.G., Beard A., Mikhail S., Smelov A.P., Davies R. (2014) An eclogitic diamond from Mir pipe (Yakutia), recording two growth events from different isotopic source. *Chem. Geol.*, **381**, 40-54.
- Burgess R., Kiviets G.B., Harris J.W. (2004) Ar-Ar age determinations of eclogitic clinopyroxene and garnet inclusions in diamonds from the Venetia and Orapa kimberlites. *Lithos*, **77**(1-4), 113-124.
- Cid J.P., Nardi L.V.S., Cid C.P., Gisbert P.E., Balzaretto N.M. (2014) Acid compositions in a veined-lower mantle, as indicated by inclusions of (K, Na)-Hollandite + SiO₂ in diamonds. *Lithos*, **196-197**, 42-53.
- Courtillot V., Davaille A., Besse J., Stock J. (2003) Three distinct types of hotspots in the Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **205**(3/4), 295-308. [https://doi.org/10.1016/S0012-821X\(02\)01048-8](https://doi.org/10.1016/S0012-821X(02)01048-8)
- Davies R.M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., Doyle B.J. (2004b) Mineral inclusions and geochemical characteristics of microdiamonds from the DO27, A154, A21, A418, DO18, DD17 and Ranch Lake kimberlites at Lac de Gras, Slave Craton, Canada. *Lithos*, **77**(1-4), 39-55.
- Davies R.M., Griffin W.L., O'Reilly S.Y., McCandless T.E. (2004a) Inclusions in diamonds from the K14 and K10 kimberlites, Buffalo Hills, Alberta, Canada: diamond growth in a plume? *Lithos*, **77**(1-4), 99-111.
- Dobretsov N.L. (2011) Basic ideas of tectonics and geodynamics. Novosibirsk, Novosib. State University, 492 p. (In Russ.)
- Doucet L.S., Li Zheng-Xiang, El Dien H.G. (2021) Oceanic and super-deep continental diamonds share a transition zone origin and mantle plume transportation. *Nature Sci. Rep.*, **11**, 16958. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-96286-8>
- Ernst R.E. (2014) Large Igneous Provinces. Cambridge, Cambridge University Press, 633 p.
- Ernst R.E., Davies D.R., Jowitt S.M., Campbell I.H. (2018) When do mantle plumes destroy diamonds? *Earth Planet. Sci. Lett.*, **502**, 244-252.
- Fedorotchouk Y., Liebske C., McCammon C. (2019) Diamond destruction and growth during mantle metasomatism: An experimental study of diamond resorption features. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **506**, 493-506.
- Foulger G.F. (2018) Are mantle plumes real? *Durham Workshop on Realism & the Earth Sciences*, 15-16 January. URL: <http://www.mantleplumes.org/PPPs.html>
- Frost D.J. (2008) The upper mantle and transition zone. *Elements*, **4**, 171-176.
- Galimov E.M., Kaminsky F.V. (2021) Diamond in the oceanic lithosphere. Volcanic diamonds and diamonds in ophiolites. *Geochem. Int.*, **59**(1), 1-11 (translated from *Geokhimiya*, **66**(1), 3-14).
- Harte B. (2010) Diamond formation in the deep mantle: the record of mineral inclusions and their distribution in relation to mantle dehydration zones. *Mineral. Mag.*, **74**(2), 189-215.
- Harte B., Hudson N.C.F. (2013) Mineral Associations in Diamonds from the Lowermost Upper Mantle and Uppermost Lower Mantle. *Proc. 10th Int. Kimberlite Conf. Vol. 1.* (Eds D.G. Pearson et al.). New Delhi, Springer, 235-253. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1170-9>
- Hayman P.C., Kopylova M.G., Kaminsky F.V. (2005) Lower mantle diamonds from Rio Soriso (Juina area, Mato Grosso, Brazil). *Contrib. Mineral. Petrol.*, **149**, 430-445. <https://doi.org/10.1007/s00410-005-0657-8>
- Hunt L., Stachel T., Morton R., Grütter H., Crease R.A. (2009) The Carolina kimberlite, Brazil – Insights into an unconventional diamond deposit. *Lithos*, **112S**, 843-85.
- Ivanov K.S. (2013) On the question of diamonds in ultramafic rocks of the Urals. *Ural. geol. zhurn.*, **5**(95), 32-36. (In Russ.)
- Joswig W., Stachel T., Harris J.W., Baur W.H., Brey G.P. (1999) New Ca-silicate inclusions in diamonds – tracers from the lower mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **173**, 1-6.
- Kaminsky F., Wirth R., Schreiber A. (2013) Carbonatitic inclusions in deep mantle diamond from Juina, Brazil: New minerals in the carbonate-halide association. *Canad. Miner.*, **51**(5), 669-688. <https://doi.org/10.3749/canmin.51.5.669>
- Kaminsky F., Ryabchikov I.D., Wirth R. (2015) A primary natrocarbonatitic association in the Deep Earth. *Mineral. Petrol.*, **110**. <https://doi.org/10.1007/s00710-015-0368-4>
- Kaminsky F. (2012) Mineralogy of the lower mantle: a review of 'super-deep' mineral inclusions in diamond. *Earth Sci. Rev.*, **110**(1), 127-147.
- Kaminsky F., Wirth R., Matsyuk S., Schreiber A., Thomas R. (2009b) Nyerereite and nahcolite inclusions in diamond: evidence for lower-mantle carbonatitic magmas. *Mineral. Mag.*, **73**(5), 797-816.
- Kaminsky F.V. (2020) Basic problems concerning the composition of the Earth's lower mantle. *Lithos*, 364-365, 105515. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105515>
- Kaminsky F.V., Khachatryan G.K., Andreatza P., Araujo D., Griffin W.L. (2009a) Superdeep diamonds from kimberlites in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil. *Lithos*, **112S**(2), 833-842.
- Kaminsky F.V., Sablukov S.M., Belousova E.A., Andreatza P., Tremblay M., Griffin W.L. (2010) Kimberlitic sources of super-deep diamonds in the Juina area, Mato Grosso State, Brazil. *Lithos*, **114**(1-2), 16-29.
- Kaminsky F.V., Wirth R. (2011) Iron carbide inclusions in lower-mantle diamond from Juina, Brazil. *Canad. Mi-*

- neral., **49**(2), 555-572.
- Kaminsky F.V., Wirth R. (2017) Nitrides and carbonitrides from the lowermost mantle and their importance in the search for Earth's "lost" nitrogen. *Amer. Mineral.*, **102**, 1667-1676.
- Kerschhofer L., Schärer U., Deutsch A. (2000) Evidence for crystals from the lower mantle: baddeleyite megacrysts of the Mbuji Mayi kimberlite. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **179**, 219-225.
- Kesson S.E., Fitz Gerald J.D. (1992) Partitioning of MgO, FeO, NiO, MnO and Cr₂O₃ between magnesium silicate perovskite and magnesiowüstite: implications for the origin of inclusions in diamond and the composition of the lower mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **111**(2-4), 229-240. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90181-T](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90181-T)
- Kogarko L., Veselovskiy R. (2017) Geodynamic regime of the carbonatites (absolute paleotectonic reconstructions). *Magmatism of the Earth and related strategic metal deposits*. Proc. of XXXIV International Conference. Moscow, GEOKHI RAS, 105-108.
- Kogarko L.N. (2022) Plume related kimberlites and carbonatites. *Mineral. Petrol.*, <https://doi.org/10.1007/s00710-022-00789-9>
- Lobkovsky L.I., Ramazanov M.M., Kotelkin V.D. (2021) Upper mantle convection related to subduction zone and application of the model to investigate the Cretaceous-Cenozoic geodynamics of central east Asia and the Arctic. *Geodynamics & Tectonophysics*, **12**(3), 456-470. (In Russ.) <https://doi.org/10.5800/GT-2021-12-3-0533>
- Lyakhov A., Oganov A., Stokes H., Zhu Q. (2012) New developments in evolutionary structure prediction algorithm USPEX. *Computer Phys. Communications*, **184**. <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2012.12.009>
- Maruyama S., Safonova I. (2019) Orogeny and mantle dynamics – role of tectonic erosion and second continent in the mantle transition zone. Novosibirsk, IPC NSU, 208 p.
- Moore R.U., Utter M.L., Rickard R.S., Harris J.W., Gurney J.J. (1986) The occurrence of moissanite and ferro-periclase as inclusions in diamond. *4th International Kimberlite Conference Extended Abstracts*. Perth, Geological Society of Australia Abstracts, **16**, 409-411. <https://doi.org/10.29173/ikc1186>
- Morgan W.J. (1971) Convective Plumes in the Lower Mantle. *Nature*, **230**, 42-43.
- Navon O., Wirth R., Schmidt C., Jablon B.M., Schreiber A., Emmanuel S. (2017) Solid molecular nitrogen (6-N₂) inclusions in Juina diamonds: Exsolution at the base of the transition zone. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **464**, 237-247. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2017.01.035>
- Nestola F., Burnham A., Peruzzo L., Tauro L., Alvaro M., Walter M., Gunter M., Anzolini Ch., Kohn S. (2016) Tetragonal almandine-pyrope phase, TAPP: Finally a name for it, the new mineral jeffbenite. *Mineral. Mag.*, **80**. <https://doi.org/10.1180/minmag.2016.080.059>
- Nestola F., Korolev N., Kopylova M., Rotiroti N., Pearson D.G., Pamato M.G., Alvaro M., Peruzzo L., Gurney J.J., Moore A.E., Davidson J. (2018) CaSiO₃ perovskite in diamond indicates the recycling of oceanic crust into the lower mantle. *Nature*, **555**, 237-241. <https://doi.org/10.1038/nature25972>
- Pokhilenko N.P., Shumilova T.G., Afanasiev V.P., Litsov K.D. (2019) Diamonds in the Kamchatka Peninsula (Tolbachik and Avacha Volcanoes): natural origin or contamination? *Russ. Geol. Geophys.*, **60**(5), 463-472 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **60**(5), 606-618). <https://doi.org/10.15372/RGG2019024>
- Puchkov V.N. (2009) The Controversy over Plumes: Who is actually right? *Geotectonics*, **43**(1), 1-17 (translated from *Geotektonika*, (1), 3-22). <https://doi.org/10.1134/S0016852109010014>
- Puchkov V.N. (2016) Relationship between plume and plate tectonics. *Geotectonics*, **50**(4), 425-428 (translated from *Geotektonika*, (4), 88-104). <https://doi.org/10.1134/S0016852116040075>
- Puchkov V.N. (2017) Does basaltoid magma leave traces in mantle peridotites as it moves toward the Earth's surface? *Geological collection No. 14. Information materials of the IG USC RAS*. St.Petersburg, Svoe izdatel'stvo Publ., 149-151. (In Russ.)
- Puchkov V.N., Ernst R.E., Ivanov K.S. (2021) The importance and difficulties of identifying mantle plumes in orogenic belts: An example based on the fragmented large igneous province (LIP) record in the Ural fold belt. *Pre-camb. Res.*, **361**, 106186.
- Puscharovsky Yu.M., Puscharovsky D.Yu. (2010) Geology of the Earth's mantle. Moscow, GEOS, 140 p. (In Russ.)
- Qin F., Qin S., Prakapenka V.B. (2020) High pressure behaviors and novel high-pressure phase of Si₃N₄ and TiN. *Lithos*, **372-373**(1), 105677. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105677>
- Richardson S.H., Shirey S.B., Harris J.W. (2004) Episodic diamond genesis at Jwaneng, Botswana, and implications for Kaapvaal craton evolution. *Lithos*, **77**(1-4), 143-154.
- Ringwood A.E. (1981) Composition and petrology of the Earth's mantle. Moscow, Nedra Publ., 584 p. (In Russ.)
- Rudolph M.L., Lekić V., Lithgow-Bertelloni C. (2015) Viscosity jump in Earth's mid-mantle. *Science*, **350**(6266), 1349-1352. <https://doi.org/10.1126/science.aad1929>
- Schulze D.J., Harte B., Valley J.W., De R. Channer D.M. (2004) Evidence of subduction and crust-mantle mixing from a single diamond. *Lithos*, **77**(1-4), 349-358. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2004.04.022>
- Scott Smith B.H., Danchin R.V., Harris J.W., Stracke K.J. (1984) Kimberlites near Orreroo, South Australia. *Kimberlites I: Kimberlites and Related Rocks*. (Ed. J. Kornprobst). Amsterdam, Elsevier, 121-142. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42273-6.50017-1>
- Smith E.M., Shirey S.B., Richardson S.H., Nestola F., Bullock E.S., Wang J., Wang W. (2018) Blue boron-bearing diamonds from Earth's lower mantle. *Nature*, **560**, 84-86.
- Sobolev N.V. (1974) Deep-seated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle. Novosibirsk, Nauka Publ., 263 p. (In Russ.)
- Stachel T., Brey G.P., Harris J.W. (2005) Inclusions in Sub-lithospheric Diamonds: Glimpses of Deep Earth. *Elements*, **1**(2), 73-78.
- Stachel T., Harris J.W., Aulbach S., Deines P. (2002) Kankan diamonds (Guinea) III: 61JC and nitrogen characteristics of deep diamonds. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **142**(4), 465-475.
- Stachel T., Harris J.W., Brey G.P., Joswig W. (2000) Kankan diamonds (Guinea) II: lower mantle inclusion parageneses. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **140**, 16-27.
- Stixrude L., Lithgow-Bertelloni C. (2007) Influence of phase transformations on lateral heterogeneity and dynamics in Earth's mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **263**, 45-55.

- Tappert R., Foden J., Stachel T., Muehlenbachs K., Tappert M., Wills K. (2009) The diamonds of South Australia. *Lithos*, **112S**, 806-821.
- Tappert R., Stachel T., Harris J.W., Muehlenbachs K., Ludwig T., Brey G. (2005b) Diamonds from Jagersfontein (South Africa): messengers from the sublithospheric mantle. *Contrib. Mineral. Petrol.*, **150**(5), 505-522.
- Tappert R., Stachel T., Harris J.W., Shimizu N., Brey G.P. (2005a) Mineral inclusions in diamonds from the Slave Province, Canada. *Europ. J. Mineral.*, **17**(3), 423-440.
- Torsvik T.H., Burke K., Steinberger B., Webb S.J., Ashwal L.D. (2010) Diamonds sampled by plumes from the core-mantle boundary. *Nature*, **466**, 352-355. <https://doi.org/10.1038/nature09216>
- Tschauner O., Huang S., Greenberg E., Prakashenka V.B., Ma Ch., Rossman G.R., Shen A.H., Zhang D., Newville M., Lanzirrotti A., Tait K. (2018) Ice-VII inclusions in diamonds: evidence for aqueous fluid in Earth's deep mantle. *Science*, **359**(6380), 1136-1139. <https://doi.org/10.1126/science.aao3030>
- Tschauner O., Ma Ch., Beckett J.R., Prescher C., Prakashenka V.B., Rossman G.R. (2014) Discovery of bridgmanite, the most abundant mineral in Earth, in a shocked meteorite. *Science*, **346**(6213), 1100-1102. <https://doi.org/10.1126/science.1259369>
- Walter M.J., Kohn S.C., Araujo D., Bulanova G.P., Smith C.B., Gaillou E., Wang J., Steele A., Shirey S.B. (2011) Deep mantle cycling of oceanic crust: evidence from diamonds and their mineral inclusions. *Science*, **334**, 54-57.
- Wirth R., Dobrzhinetskaya L., Harte B., Schreiber A., Green H.W. (2014) High-Fe (Mg, Fe)O inclusion in diamond apparently from the lowermost mantle. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **404**, 365-375.
- Zedgenizov D., Kagi H., Ohtani E., Tsujimorie T., Komatsu K. (2020) Retrograde phases of former bridgmanite inclusions in superdeep diamonds. *Lithos*, **370-371**, 105659. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105659>
- Zedgenizov D.A., Kagi H., Shatsky V.S., Ragozin A.L. (2014) Local variations of carbon isotope composition in diamonds from São-Luis (Brazil): Evidence for heterogeneous carbon reservoir in sublithospheric mantle. *Chem. Geol.*, **363**, 114-124. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2013.10.033>
- Zedgenizov D.A., Litasov K.D. (2017) Looking for "missing" nitrogen in the deep Earth. *Mineralogist*, **102**, 1769-1770.
- Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Kagi H., Yurimoto H., Shatsky V.S. (2019) SiO₂ Inclusions in Sublithospheric Diamonds. *Geochem. Int.*, **57**(9), 964-972.
- Zorin Y.A., Turutanov E.K., Kozhevnikov V.M., Rasskazov S.V., Ivanov A.V. (2006) The nature of cenozoic upper mantle plumes in East Siberia (Russia) and Central Mongolia. *Russ. Geol. Geophys.*, **47**(10), 1046-1059 (translated from *Geologiya i Geofizika*, **47**(10), 1060-1074).