

**ПРОБЛЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С КРИСТАЛЛОГЕНЕЗИСОМ
И ГЛУБИННЫМ ЦИКЛОМ УГЛЕРОДА**

**Н.В. Соболев^{1,3}, Н.Л. Добрецов^{2,3}, Э. Отани^{1,4}, Л.А. Тэйлор⁵, Г.-П. Шертл⁶,
Ю.Н. Пальянов^{1,3}, К.Д. Литасов^{1,3}**

¹ *Институт геологии и минералогии им. В.С. Соболева СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

² *Институт нефтегазовой геологии и геофизики им. А.А. Трофимука СО РАН,
630090, Новосибирск, просп. Академика Коптюга, 3, Россия*

³ *Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 2, Россия*

⁴ *Department of Earth Science, Tohoku University, 980-8578, Sendai, Japan*

⁵ *Planetary Geosciences Institute, University of Tennessee, Knoxville, USA*

⁶ *Institute of Geology, Mineralogy and Geophysics, Ruhr University, 44780, Bochum, Germany*

Представлен аналитический обзор основных результатов и тенденций по программе «Глубинный цикл углерода». В первом разделе рассматриваются проблемы, связанные с зонами субдукции с упором на геолого-геофизические данные по Камчатке и Кокчетавской палеосубдукционной зоне. Экспериментальным исследованиям в широком диапазоне давлений посвящен раздел «Кристаллогенезис и экспериментальная минералогия». С алмазной тематикой связаны статьи, объединенные в разделы «Кристаллогенезис алмаза» и «Алмаз и кимберлитовый магматизм» на примере Якутской алмазоносной провинции.

Мантия, ядро, субдукция, магматизм, высокие давления и температуры, эксперимент, перидотит, эклогит, алмаз, углерод.

PROBLEMS RELATED TO CRYSTALLOGENESIS AND THE DEEP CARBON CYCLE

N.V. Sobolev, N.L. Dobretsov, E. Ohtani, L.A. Taylor, H.P. Schertl, Yu.N. Palyanov, and K.D. Litasov

We present an analytical review of the key results and research trends in the Deep Carbon Cycle program. The first section addresses the issues related to subduction zones with emphasis on geological and geophysical data on Kamchatka and the Kokchetav paleosubduction zone. Experimental studies over a wide pressure range are discussed in the section “Crystallogenesis and experimental mineralogy”. The papers addressing the diamond issues on the example of the Yakutian diamondiferous province are grouped in the sections “Diamond crystallogeny” and “Diamond and kimberlite magmatism”.

Mantle, core, subduction, magmatism, high pressures and temperatures, experiment, peridotite, eclogite, diamond, carbon

ВВЕДЕНИЕ

В предлагаемом специальном тематическом выпуске журнала «Геология и геофизика» представлена большая часть докладов симпозиума «Глубинный цикл углерода: минералогия и кристаллохимия углеродсодержащих соединений», проведенного в рамках III Международной конференции «Кристаллогенезис и минералогия» (Новосибирск, 27 сентября — 1 октября 2013 г.), а также статьи, касающиеся программы «Глубинный цикл углерода». Этот выпуск поддержан руководством Международной программы «Глубинный цикл углерода» DCO (Deep Carbon Observatory).

В спецвыпуске вошли 25 статей, объединенных в четыре раздела. Он открывается разделом «Геология и глубинный цикл углерода», в котором обсуждены проблемы, связанные с зонами субдукции, поскольку субдукция — главный процесс, обеспечивающий поступление углерода в мантию и замыкающий глубинный цикл углерода. В этом разделе также обсуждена проблема гидротермальных углеводородов (на примере Камчатки).

Для понимания глубинного цикла углерода важную роль играют экспериментальные исследования в широком диапазоне давлений. Работам этого направления посвящен раздел «Кристаллогенезис и экспериментальная минералогия». В глубинном цикле углерода среди углеродсодержащих фаз главную роль играют алмаз и карбонаты, включая карбонатитовые расплавы. С алмазом связана большая часть статей выпуска, объединенных в разделы «Кристаллогенезис алмаза» и «Алмаз и кимберлитовый магматизм».

Рассмотрим коротко проблемы, поднятые в статьях названных четырех разделов, и нерешенные вопросы, дополняя ту дискуссию, которая имеется внутри статей.

ГЕОЛОГИЯ И ГЛУБИННЫЙ ЦИКЛ УГЛЕРОДА

В этом разделе, открывающем спецномер, объединены статьи, опирающиеся больше других на геологические и геолого-минералогические данные и содержащие определенный вклад в общую концепцию глубинного цикла углерода [Добрецов, Шацкий, 2012]. В качестве модельных объектов выбраны современные зоны субдукции Камчатки и Японии и палеосубдукционная зона Кокчетавского пояса (Сев. Казахстан), содержащая тектонические линзы, извлеченные из зоны субдукции с глубин 150—200 км (максимальные по глубине из известных геологических объектов) [Добрецов и др., 2006; Schertl, Sobolev, 2013]. Курило-Камчатская зона субдукции и вулканизма является главным объектом исследований для российских геологов, где в последние годы развиваются и международные проекты, и где возможна проверка и развитие теоретических моделей путем комплексирования разных методов и их применения к объектам вулканизма, максимально варьирующим по своим условиям [Добрецов и др., 2012, 2015].

Как уже упоминалось, зоны субдукции являются главным механизмом погружения углерода на мантийные глубины (до 200 км и более). Исходными углеродсодержащими субстанциями являются карбонатные осадки и илы (глины), обогащенные органическим веществом (битумами), а конечными продуктами трансформации углерода в зонах субдукции являются графит- и алмазсодержащие метаморфические породы, карбонатитовые расплавы, обнаруживаемые в метаморфических, реже магматических минералах в виде раскристаллизованных расплавных включений и, наконец, гидротермальная нефть, обнаруженная в вулканических кальдерах на Камчатке, в Японии, Новой Зеландии и других местах. Все эти три объекта природного глубинного углерода описаны в пяти статьях настоящего раздела.

Выпуск открывает *статья Н.Л. Добрецова, И.Ю. Кулакова и др.*, где обсуждаются исходные данные и модели процессов субдукции. На основе анализа результатов разномасштабных сейсмотомографических исследований делается предположение о многоуровневой системе миграции флюидов и расплавов над погружающимся слэбом, возможные физико-химические сценарии эволюции глубинных источников вулканизма с учетом широкого круга геологических и геофизических данных. В качестве преобладающей модели в фанерозое обосновывается горячая зона субдукции, в которой на глубине 180 км достигается температура 1000—1100 °С, что подтверждается данными по Кокчетавской зоне [Schertl, Sobolev, 2013; Добрецов и др., 2015а; Михно, Корсаков, 2015].

Исследования Камчатки и Японии подтверждают определяющую роль выплавления андезитов при субдукции океанической коры, а также сложности построения модели с независимой миграцией расплавов и флюидов [Kogiso et al., 2009; Добрецов и др., 2015а,б]. На примере Камчатки уточнена роль промежуточных камер на глубинах 50—80 км и около 30 км и показано значение малоглубинных камер (2—15 км) как этапов подготовки к извержению. Чередование центров с преобладанием более спокойных базальтовых извержений и центров эксплозивных кальдерообразующих дацитандезитовых извержений объясняется возникновением струи из очагов около 30 км глубиной в первом случае и из очагов вблизи поверхности погружающегося слэба глубиной 100—120 км во втором типе центров извержений. Модельным объектом для взаимодействия обоих типов может быть Ключевская группа вулканов, где начаты детальные и максимально разнообразные исследования. Тем не менее построение адекватной многоуровневой модели процессов субдукции еще предстоит сделать.

Для разных типов субдукционного магматизма, вероятно, существуют разные ключевые звенья. Для андезитового катастрофического (кальдерообразующего) магматизма важнейшую роль играет накопление линз расплава вблизи поверхности слэба и пульсационное, часто катастрофическое развитие из них газово-расплавных струй. Для преимущественно базальтовых центров вулканизма главную роль должны играть мантийные очаги на глубине 50—80 км, где происходит не частичное плавление, как часто предполагается, а реакционное плавление с добавкой дацит-андезитовых флюидорасплавных струй из зоны субдукции и удалением более сухих пикрит-базальтоидных расплавов (модель типа пульсационно-проточного реактора). Для возникновения тоналитовых батолитов боливийского типа предлагается еще один механизм [Gerya, 2011].

Подток глубинных расплавов вдоль поверхности слэба с глубин 200 км и более может обусловить распад надкритических расплавов-флюидов с появлением наиболее разнообразных вулканических се-

рий. Другой вариант широкой вариации состава расплавов — участие карбонатных пород в зонах субдукционного плавления, что рассмотрено в других статьях на примере Кокчетавской зоны [Буслов и др., 2015; Михно, Корсаков, 2015].

В статье Н.Л. Добрецова, Е.В. Лазаревой и др. подробно охарактеризованы геологические, геохимические и микробиологические особенности нефти, поровых растворов и самого участка гидротермального нефтепроявления кальдеры Узон. По сравнению с первыми обзорами, характеризующими эту проблему [Карпов, 1988; Simoneit, 1990], достигнут большой прогресс, особенно в отношении микробиологии и многовариантного генезиса гидротермальной нефти [Гумеров и др., 2011; Лазарева и др., 2012; Фурсенко и др., 2014].

Основные термальные проявления кальдеры Узон контролируются сочетанием линейно-разломных нарушений, из которых главным является субширотная магмопроводящая зона между вулканами Кихпиныч и Тауншиц, и округлые каналы просачивания растворов. Нефтяная площадка расположена на краю наиболее горячего участка Восточного поля с высокой фумарольной активностью. В пределах Нефтяной площадки и в кальдере Узон в целом вариации pH и Eh хорошо сопоставляются с границами устойчивости стабильных и метастабильных ионов S и Fe.

Геохимические особенности нефти и растворов характеризуются близкими содержаниями групп элементов (Cl, B, I, Br), (S, As, S), а также Hg и Pb и различными — (Ti, V, Cr), (Co, Ni, Cu, S). Гидротермальная нефть из Узона и других мест в зонах субдукции отличается от других нефтей, в частности, наиболее низкими значениями биомаркеров Ts/Tm и Pr/Ph как наиболее «незрелая» нефть [Конторович и др., 2011; Фурсенко и др., 2014].

В исследованных микробных сообществах кальдеры Узон доля архей среди бактерий и архей колеблется от 2 до 70 %. Во всех пробах, кроме одной, в значительном количестве присутствует тип кренархей, в четырех пробах из восьми большим числом последовательностей представлены метанообразующие представители эвриархей [Гумеров и др., 2011]. Для сравнения на дне оз. Байкал бактериальные маты в местах выхода холодных метановых «сипов» содержат от 1 до 60 % архей [Земская и др., 2014], с увеличением содержания архей от поверхности в глубину осадков. Таким образом, археи очень чувствительны к окислительным условиям, и для выяснения действительной роли бактерий и архей в генезисе гидротермальной нефти еще многое предстоит сделать.

Три последние статьи этого раздела посвящены Кокчетавским алмазсодержащим породам. Краткое сравнение Кокчетавской палеосубдукционной зоны с современными зонами субдукции приведено в первой из них.

В статье М.М. Буслова и др., а также в статье А.О. Михно и А.В. Корсакова главное внимание уделено метакarbonатным известково-силикатным породам. Доля карбонатных осадков в зонах субдукции оценивается не более 10—15 %, причем распространены они преимущественно в приэкваториальных зонах Центральной и Южной Америки, желобе Тонга и Кермадек. А в большинстве других желобов отсутствуют [Poli, Schmidt, 2002]. Но в Кокчетавской зоне, как и в большинстве других комплексов ультравысоких давлений, они относятся к чехлу микроконтинентов, вовлеченных в зону субдукции, а не к осадкам желоба [Добрецов и др., 2006].

В работе М.М. Буслова и др. обосновывается, что алмазсодержащие породы Кумдыкольского террейна по характеру переслаивания и составу пород наиболее близки к породам шарыкской свиты илектинской серии, характерной для чехла фрагмента срединного массива от р. Чаглинка до оз. Шалкар, непосредственно примыкающей с севера к алмазсодержащему террейну. В разрезе этой свиты, вскрытом в карьере около пос. Березняковка, карбонатные породы составляют 15—20 %, метатерригенные породы (филлиты и песчаники) около 80—85 %, как и в штольне алмазного месторождения Кумдыколь. Филлитовидные сланцы, обогащенные органическими битумоидами и метапесчаники с карбонатно-графитистым цементом могли быть аналогами биотитовых гнейсов с алмазами в Кумдыкольском террейне. Эти осадочные породы, обогащенные графитом, сульфидами и карбонатами Ca, Mg, Fe, субдуцировались под венд-кембрийскую Ишимско-Селетинскую островную дугу с образованием алмазсодержащих пород на глубине 160—200 км. Детритовые цирконы в ордовикских породах датируются возрастными 755—720 и 640—566 млн лет, характеризующими, вероятно, двухэтапное формирование этой островной дуги.

Эксгумация алмазсодержащих и других высокобарических пород Кокчетавского пояса происходила в несколько этапов. Наиболее ранний этап был очень быстрым (6—15 см/год) и протекал в течение 0.5—2.0 млн лет с быстрой закалкой высокобарических ассоциаций [Dobretsov, Shatsky, 2004; Sobolev et al., 2011; Добрецов, Кулаков и др., 2015]. Более поздние этапы эксгумации происходили медленно с многочисленными остановками и сопровождалась повторным низкобарическим метаморфизмом амфиболитовой, а затем зеленосланцевой фации. На рис. 1 сопоставлены разные варианты регрессивных этапов (эксгумации) в метаморфических породах Кумдыкольского террейна [Schertl, Sobolev, 2013; Добрецов и др., 2015a; Михно, Корсаков, 2015]. Наибольшие вариации *P-T* тренда характеризуют первый дискуссионный этап эксгумации от 7 до 4 ГПа.

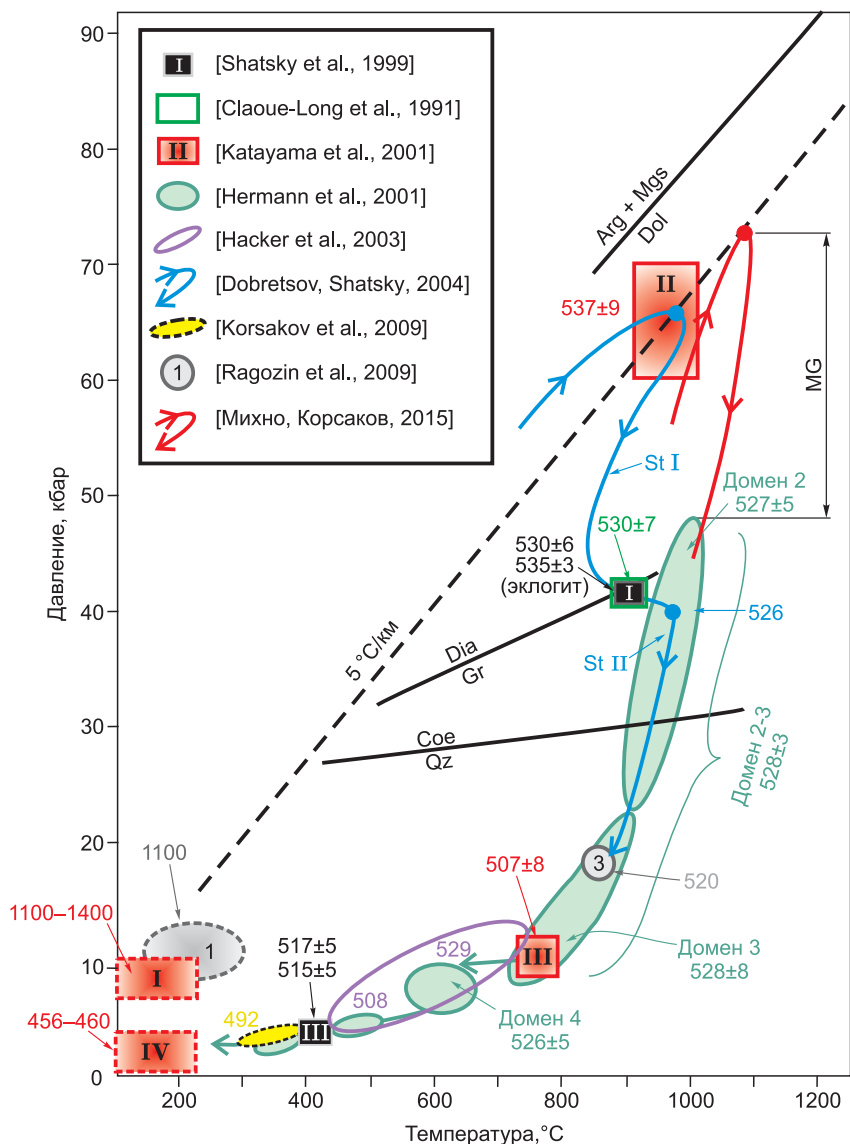


Рис. 1. Сопоставление *PT*-кривых, характеризующих эксгумацию магматических пород из Кокчетавской палеозоны субдукции по данным работ [Dobretsov, Shatsky, 2004; Schertl, Sobolev, 2013; Добрецов и др., 2015a; Михно, Корсаков, 2015].

Стрелки MG показывают вероятный интервал несмесимости карбонатитовых и силикатных расплавов.

Еще одной дискуссионной проблемой алмазоносных метаморфических пород Кумдыкольского террейна является сильное обеднение части метаморфических пород легкими редкоземельными элементами (LREE = La, Ce, Pr, Nd, Sm), а также Th и U, описанное в работах [Stepanov et al., 2012, 2014]. Это объяснено растворением минералов-концентраторов названных элементов (монацита и алланита) в образующемся расплаве и высокой степенью экстракции расплавов. В этой интерпретации много спорного. Во-первых, эта особенность установлена на участке Барчикуль и практически отсутствует в разрезах участка Кумдыколь. Во-вторых, названные породы испытали несколько стадий эксгумаций и плавления, что подтверждается большим разбросом возраста гранитоидов от 510 до 460 млн лет [Добрецов и др., 2006]. Но ни на одной стадии не сформировались высококалийевые расплавы типа шошонитов, что должно было быть при реализации вышеизложенной модели [Stepanov et al., 2014].

В работе А.О. Михно и А.В. Корсакова диагностированы разные силикатные, силикатно-карбонатитовые и сульфидные включения, которые рассматриваются как продукты раскристаллизации высокобарических расплавов. Симплектитовые структуры типа Са-гранат + калишпат + алланит + кальцит,

установленные во включениях в гранате и вокруг некоторых зерен граната, связаны также с кристаллизацией карбонатитовых расплавов.

Плавление карбонатных и карбонатно-глинистых пород обусловлено, прежде всего, наличием флюидной фазы, обогащенной H_2O , с дополнительным влиянием щелочей ($K_2O + Na_2O$), привнесенных во флюиде и/или присутствующих в мергелистых породах. Совместное нахождение силикатных и карбонатных включений в одной зоне роста пироксена свидетельствует о разрыве несмесимости карбонатитового и силикатного расплавов. Вероятная несмесимость наблюдается при P - T параметрах 4.5—7.0 ГПа и 950—1100 °С (см. рис. 1). При этом в карбонатитовом расплаве может растворяться до 18 % SiO_2 , а в силикатном — до 4.5 % $CaCO_3$. Параметры несмесимости силикатных и карбонатитовых расплавов согласуются с экспериментальными данными по плавлению эклогита в присутствии CO_2 и H_2O [Kiseeva et al., 2012]. Сульфидные включения, по крайней мере частично, образовались также на высокобарической стадии. В любом случае приведенные данные расширяют поле возможных составов расплавов в зоне субдукции.

Работа А.О. Михно и А.В. Корсакова основана на детальном изучении серии образцов, отобранных в штольне, отвалах штольни и в скважинах. К сожалению, структурные соотношения, наблюдаемые в обнажениях, пример которых приведен в этой статье на рис. 2, не использованы. Поэтому последовательность образования разнотипных включений и расплавов, которые возможны на разных стадиях субдукции и эксгумации, в работе не установлены. Подобные стадии были намечены в работах [Добрецов и др., 1998; Theunissen et al., 2000].

В статье Г.-П. Шертла и др. применен комплексный подход к исследованию слоистых известково-силикатных пород (доломитовых мраморов и гранат-пироксеновых пород), относящихся к серии алмазонасных пород Кокчетавского массива и характеризующихся наиболее высокой алмазонасностью. Главный метод — катодолюминесцентная микроскопия совместно с электронно-зондовым анализом (EPMA) и электронной микроскопией (ТЕМ). Именно указанные породы содержат основную информацию о PT -условиях пика метаморфизма и о самых ранних стадиях эксгумации [Sobolev et al., 2011]. Исследование симплектитовых кайм вокруг граната показало важную роль люминесцирующих вторичных клинопироксенов, шпинели, а также корунда и сапфирина, что подтверждает высокотемпературный характер ранней стадии регрессивного метаморфизма, связанного с субдукцией [Соболев и др., 2001, 2006; Schertl et al., 2004; Sobolev et al., 2011] (см. рис. 1). Впервые для алмазосодержащих известково-силикатных пород в симплектитовых каймах вокруг граната выявлено существенное преобладание иглоподобных выделений корунда в матрице вторичного клинопироксена, ассоциирующего с флогопитом, и впервые обнаруженным в метаморфических породах высококалийевым (K_2O до 4.5 мас. %) магнезиальным (Mg#95) амфиболом.

КРИСТАЛЛОГЕНЕЗИС И ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ МИНЕРАЛОГИЯ

Следующий раздел посвящен экспериментальным и теоретическим исследованиям в области кристаллогенезиса углеродсодержащих и родственных систем.

В статье А.Ф. Шацкого и др. на основании цикла работ [Shatskiy et al., 2013a; Shatskiy et al., 2014] впервые приводится детальный обзор фазовых диаграмм двойных и тройных карбонатных систем при высоких давлениях. Большинство систем изучено при давлении 6 ГПа, которое соответствует области генерации карбонатных и кимберлитовых расплавов в мантии Земли. До этого была изучена всего одна диаграмма $CaCO_3$ — $MgCO_3$ при 6 ГПа [Vuob et al., 2006]. Результаты экспериментального исследования карбонатсодержащих перидотитов и эклогитов при давлениях до 10—20 ГПа [Dasgupta et al., 2004; Dasgupta, Hirschmann, 2006; Литасов, 2011; Ghosh et al., 2014] показали, что близосидусные расплавы имеют щелочно-карбонатитовый состав, однако определение реального солидуса в этих системах затруднено из-за малого количества расплава и трудностей диагностики субсолидусных щелочных фаз среди продуктов экспериментов. Исследования в карбонатитовых системах продемонстрировали стабильность двойных щелочных карбонатов и показали возможное положение солидуса в перидотитовых и эклогитовых системах [Litasov et al., 2013a]. Данные представленной работы А.Ф. Шацкого с соавторами позволили выявить все вариации составов карбонатных расплавов в петрологически важных тройных карбонатных системах, а также обосновать солидусы карбонатсодержащих перидотитовых, эклогитовых и мергелисто-пелитовых систем. Особый интерес эти результаты имеют для решения проблемы генезиса алмаза, учитывая экспериментально обоснованную роль карбонатных расплавов, способных в процессах алмазообразования быть одновременно и средой кристаллизации, и источником углерода [Pal'yanov et al., 2002, 2005]. Статья имеет важнейшее значение для понимания петрогенезиса карбонатных расплавов в мантии, а также для общего понимания процессов переноса вещества в области генерации глубинных магм.

В статье Баталевой и др. приведены результаты экспериментального моделирования процессов генерации железистых карбонатно-силикатных расплавов в ходе взаимодействия карбонат—оксид—металл, при P - T параметрах литосферной мантии. Основной целью этого исследования является выявление закономерностей и механизмов взаимодействия окисленных минеральных фаз (карбонатов, оксидов, силикатов), расплавов и флюидов с восстановленными Fe^0 -содержащими породами в глубинных зонах Земли. С использованием оригинальной методики [Palyanov et al., 2007] ранее уже исследованы алмазообразующие редокс-реакции в системах карбонат—металл [Palyanov et al., 2013] и карбонат—оксид [Bataleva et al., 2012].

Экспериментально установлено, что при взаимодействии карбонат—оксид—металл при температурах ниже солидуса (1150—1450 °C, 6.3 ГПа) реализуются реакции декарбонатизации с образованием Fe , Mg -граната и CO_2 -флюида и углеродпродуцирующие редокс-реакции, в результате которых в ассоциации с графитом кристаллизуются высокожелезистые фазы — Fe_3C и $(\text{Fe},\text{Mg})\text{O}$. В интервале 1450—1650 °C и при 7.5 ГПа реализуются процессы частичного плавления с образованием железистого карбонатно-силикатного расплава, сосуществующего с графитом и Fe^{3+} -содержащими алмандином, феррошпинелью и магнетитом. Также установлено, что полученные карбонатно-силикатные расплавы, обогащенные одновременно Fe^{2+} и Fe^{3+} , являются потенциальными агентами окислительного метасоматоза в условиях литосферной мантии, которые могут образовываться в поле устойчивости элементарного углерода при значениях f_{O_2} на уровне буфера CCO . В условиях восстановленной мантии (в присутствии карбидов или оксидов железа) расплавы подобного состава могут являться одновременно источником углерода и средой кристаллизации графита.

Минералогическое исследование природных и синтетических углеродсодержащих соединений включает характеристику их кристаллических структур. Структурное и химическое разнообразие карбонатных соединений привлекает повышенное внимание как с точки зрения термодинамики и фазовых соотношений в PT -поле, так и с точки зрения теории кристаллических структур.

Работа С.В. Кривовичева с соавторами посвящена расшифровке структуры редкого водного фосфат-карбоната натрия, кальция и магния — гирвасита из доломитовых карбонатитов Ковдорского массива. В ней выполнен анализ структурной сложности минерала по классификации, предложенной в работах [Krivovichev, 2013, 2014], а также проведено сравнение со структурами других сложных карбонатов. Важность структурных исследований карбонатов в этой работе подчеркивается исследованиями сложных карбонатных систем при высоком давлении [Шацкий и др., 2015], где установлен ряд новых соединений, кристаллические структуры которых пока не охарактеризованы. Первая работа по расшифровке структур новых двойных карбонатов на примере $\text{Ca}_3\text{Na}_2(\text{CO}_3)_4$, синтезированного при 6 ГПа и 1000 °C [Gavryushkin et al., 2014], показала их существенное значение для теоретической кристаллохимии.

Следующие статьи К.Д. Литасова и др. и П.И. Дорогокупца и др. посвящены расчетно-теоретическим аспектам исследования минеральных ассоциаций в мантии и ядре Земли, при этом в них используются два различных подхода — первопринципный расчет и термодинамический анализ экспериментальных данных по уравнениям состояния и фазовым диаграммам веществ. В статье К.Д. Литасова с коллегами методом функционала плотности было проведено теоретическое моделирование карбидов железа, которые могут быть стабильны в условиях внутреннего ядра Земли при давлениях до 500 ГПа. В целом эта работа повторяет исследование З.Г. Бажановой и др. [2012], однако содержит более детальные и полные данные о параметрах упругости и магнитных переходах в карбидах железа. Несмотря на то, что расчеты проводятся при 0 К, они предоставляют сведения о стабильных фазах системы Fe—C при давлениях, недоступных для эксперимента [Litasov et al., 2013b], а также дают возможность определить максимальное количество углерода во внутреннем ядре Земли. При допущении, что углерод является единственным легким элементом в системе, данные первопринципных расчетов показывают содержание углерода 2.8—2.9 и 2.1—2.2 мас. % при 5000 и 7000 К соответственно на границе внутреннего ядра. Последующие расчеты методами молекулярной динамики призваны помочь охарактеризовать фазы железа и его соединений при высоких температурах. В конечной перспективе все более точные расчеты первопринципными методами при высоких давлениях и температурах позволят создать термодинамическую модель твердых и жидких фаз, описывающих все физические, геохимические и реологические свойства материалов, которые могут присутствовать в глубинах Земли. Выполнение такой задачи реально в ближайшие 10 лет.

Термодинамическое описание фаз, стабильных при высоком давлении, на основании P - V - T уравнений состояния минералов является основой для построения взаимосогласованной модели внутреннего строения Земли и других объектов в пределах и за пределами Солнечной системы. Однако недостаток экспериментальных и теоретических данных не позволяет построить всеобъемлющую картину. Наиболее значимые попытки построения подобных согласованных систем сделаны в работах [Holland, Powell, 2011; Stixrude, Lithgow-Bertelloni, 2011]. В них модели сделаны либо методами экстраполяции

при давлениях до 30 ГПа, либо учитывают приближенные плотностные и скоростные характеристики веществ без рассмотрения всех термодинамических констант.

В работе П.И. Дорогокупца с соавторами на основании экспериментальных данных, а также с учетом унифицированных шкал давления [Соколова и др., 2013] построена термодинамическая модель, включающая все твердые фазы в системе $\text{MgSiO}_3\text{—MgO}$ (за исключением низкобарных фаз), и построена фазовая диаграмма, впервые включающая равновесие $\text{MgSiO}_3\text{—перовскит—постперовскит}$. Данная модель послужит основой для последующего расчета минеральных ассоциаций и плавления в более сложных силикатных и оксидных системах, а также в системах с участием карбонатов и других минералов углерода.

Последняя статья раздела Э. Отани и др. посвящена развитию одного из передовых методов исследования вещества при сверхвысоких давлениях и температурах — неупругого рассеяния рентгеновских лучей, которое позволяет определить скорости звуковых волн в образце. Одновременные измерения методом рентгеновской дифракции позволяют получить плотность вещества. Впервые образец железа исследован в алмазной ячейке при температурах до 1000 К при 63 ГПа, а также до 174 ГПа при более низких температурах. Экспериментальные результаты более детально описаны в работе [Ohtani et al., 2013]. Пока эти исследования настолько трудоемки, что дают противоречивые результаты. Сравнение полученных данных по соотношению плотности и звуковых волн (так называемый закон Бёрча) в hcp-Fe с моделью PREM [Dziewonski, Anderson, 1981] показало, что состав ядра может отличаться от традиционной модели с легкими элементами, и наоборот, может включать тяжелые элементы. Разрабатываемая методика стабильного нагрева образца при температурах до 3000—4000 К в течение 10—30 ч позволит более точно охарактеризовать закон Бёрча для hcp-Fe при параметрах ядра Земли.

КРИСТАЛЛОГЕНЕЗИС АЛМАЗА

Этот раздел начинается с работы Ю.Н. Пальянова и др., в которой представлены результаты экспериментальных исследований по кристаллизации алмаза в кимберлитовом расплаве. Актуальность тематики определяется, прежде всего, установленной возможностью генетической связи природных алмазообразующих сред с кимберлитовыми расплавами [Sobolev, 1977; Boyd et al., 1994; Shimizu, Sobolev, 1995; Navon et al., 1999; Zedgenizov et al., 2009; Weiss et al., 2014]. Как показано в недавнем обзоре [Palyanov et al., 2014], в последние десятилетия проведен большой объем экспериментальных исследований по кристаллизации алмаза в различных системах, включая среды, моделирующие природные алмазообразующие составы, однако результаты экспериментов по алмазообразованию в кимберлитовом расплаве представлены лишь в одной работе [Arima et al., 1993], выполненной при завышенных для природного процесса $P\text{—}T$ параметрах ($T = 1800\text{—}2200$ °С, $P = 7\text{—}7.5$ ГПа). Следует отметить, что в работе Ю.Н. Пальянова и др. диапазон условий имеет гораздо большее соответствие природным процессам благодаря оригинальной методике и учету кинетического фактора. Полученные результаты позволили определить условия роста алмаза на затравках в кимберлитовом расплаве, равновесном с оливином, пироксеном и гранатом, составившие 1400 °С при 7.5 ГПа и 1520 °С при 6.3 ГПа. Экспериментально обосновано, что нуклеация алмаза требует более высоких $P\text{—}T$ параметров (1570 °С, 7.5 ГПа). В результате исследований определены основные факторы, контролирующие процессы нуклеации и роста алмаза в кимберлитовых расплавах, к которым, прежде всего, относятся температура, давление и состав среды кристаллизации. Установленные закономерности и механизмы кристаллизации алмаза, а также данные по кристаллогенезису алмаза в условиях регенерации, несомненно, будут полезны при решении сложных вопросов генезиса алмаза.

В работе Р.Дж. Энджела и др. первопринципными методами в квазигармоническом приближении рассчитано $P\text{—}V\text{—}T$ уравнение состояния алмаза, которое согласуется с экспериментальными данными по сжимаемости и измерению термического расширения при атмосферном давлении. Небольшие отклонения наблюдаются только в области высоких температур (выше 2000 К). Таким образом, показано, что $P\text{—}T$ параметры формирования алмаза можно оценить с высокой точностью без учета ангармонических колебаний электронов. На основе нового уравнения состояния в работе предложен метод оценки $P\text{—}T$ параметров формирования пары алмаз—включение по остаточному давлению во включении.

В статье А.В. Кузюра и др. представлены результаты экспериментального определения коэффициентов межфазового распределения редких элементов в многокомпонентных перидотит-карбонатной и эклогит-карбонатной системах при $P\text{—}T$ параметрах термодинамической стабильности алмаза. Работа может представлять интерес для выявления закономерностей генетически связанных процессов мантийных реакций с расплавами, кимберлитобразования и формирования алмазообразующих расплавов.

В статье А.Ф. Хохрякова, Д.В. Нечаева приведены новые данные по экспериментальному изучению особенностей образования протогенетических включений графита в природном алмазе при мантийных $P\text{—}T$ параметрах. Установлено, что алмазы, полученные в экспериментах в хлоридных и карбо-

натных системах, моделирующих природные алмазообразующие среды, содержат плотные скопления различных по форме зерен и пластинок графита. Отличительным признаком таких алмазов является значительное низкочастотное смещение (до 1328 см^{-1}) и уширение (до 6.5 см^{-1}) рамановской линии алмаза, свидетельствующие о высокой величине остаточных деформаций. Материалы предшествующих экспериментальных исследований [Khokhryakov et al., 2009; Нечаев, Хохряков, 2013] и результаты, полученные в представленной статье, показывают, что образование графита в природных условиях могло происходить на различных этапах кристаллогенезиса алмаза в качестве как стабильной, так и метастабильной фазы.

Изотопные характеристики углерода мантийных минералов традиционно предоставляют информацию об источниках углерода в мантии [Deines, 2002]. В частности, на основании обнаружения изотопно-легких алмазов впервые было сделано предположение об участии в алмазообразовании субдуцированного корового вещества [Соболев, Соболев, 1980].

В статье В.Н. Реутского и др., помимо тщательного анализа литературных данных, приводятся новые экспериментальные материалы по фракционированию изотопов углерода непосредственно при кристаллизации алмаза при температурах и давлениях мантии. Экспериментально показано, что при кристаллизации вблизи буфера IW алмаз обогащен тяжелым изотопом относительно металл-углеродного расплава, а в области буфера CCO — обогащен легким изотопом относительно углекислотно-карбонатного флюида, из которых он кристаллизуется. Суммарная величина экспериментально наблюдаемого фракционирования составляет почти 10 ‰, что, конечно, не объясняет всего диапазона вариаций значений $\delta^{13}\text{C}$ природных алмазов, но позволяет оценивать тенденции изменения состава алмаза, не связанные со сменой источника углерода. Работа является пионерской и чрезвычайно актуальной как в плане интерпретации данных по природным алмазам различного генезиса, так и для построения моделей глобального углеродного цикла.

АЛМАЗ И КИМБЕРЛИТОВЫЙ МАГМАТИЗМ

В статье А.Г. Сокола и А.Н. Крука проведено обобщение опубликованных данных о параметрах мультифазного насыщения вблизи ликвидуса для различных модельных составов кимберлитовых расплавов при давлениях 5.5—6.5 ГПа. На основании экспериментальных данных, опубликованных в работах [Eggler, Wendlandt, 1979; Edgar, Charbonneau, 1993; Girniss et al., 1995, 2011; Ulmer, Sweeney, 2002; Mitchell, 2004; Шарыгин и др., 2013; Sokol et al., 2013a, 2014] авторами выполнен анализ температур ликвидуса моделирующих кимберлиты мультикомпонентных систем, а также $T - \text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ параметров стабильности твердых фаз непосредственно под ним. Это позволило оценить потенциальный состав протолита и возможный флюидный режим генерации кимберлитов. Установлено, что оливинсодержащий мультифазный рестит стабилен вблизи ликвидуса при $X_{\text{CO}_2} < 0.5$. Для значительной части составов первичных магм с $X_{\text{CO}_2} < 0.5$ протолитом может быть карбонатизированный гранатсодержащий лерцолит. Генерация части первичных магм с высоким содержанием кальция ($\text{MgO}/\text{CaO} < 2$) и $X_{\text{CO}_2} < 0.5$ возможна из карбонатизированного гранатсодержащего верлита.

Главная проблема — источник карбонатизации лерцолитов и образование верлитов (привнос Ca). Обычно обсуждается модель мантийного метасоматоза. В ней в неявном виде предполагается участие флюидов по аналогии с коровым метасоматозом с участием флюидов. Если же речь идет о взаимодействии с карбонатитовыми расплавами [Шацкий и др., 2015], то лучше говорить о реакциях магматического замещения по аналогии с коровыми процессами [Коржинский, 1952, 1955].

Обосновано, что карбонатитовые расплавы/флюиды за счет многостадийного преобразования и окисления, ведущих к карбонатизации и флогопитизации протолита, как минимум на начальном этапе, могли обеспечить условия для буферирования фугитивностей CO_2 и H_2O в образующемся кимберлитовом расплаве. На заключительных этапах дополнительным источником воды для этих процессов могли быть номинально безводные минералы, содержащие в своей структуре ОН дефекты [Sokol et al., 2013b; Рагозин и др., 2014], хотя эта проблема нуждается в дополнительных экспериментах и балансовых расчетах (откуда эта вода и в каких количествах?).

Впервые в работе Н.В. Соболева с соавторами на примере кимберлитовой тр. Удачная-Восточная доказан высокобарический парагенезис реликтовых центральных зон вкрапленников оливина. Указанный лерцолитовый парагенезис представлен включениями типичного пиропы, содержащего от 1.4 до 9.1 мас. % Cr_2O_3 (с Mg\# 75.6—83.7) и клинопироксена с Mg\# 86—93 и примесью Cr_2O_3 до 4 мас. % и Na_2O от 1.5 до 6.0 мас. %. Повышенное содержание Ti ($> 150\text{ г/т}$) вмещающего однородного оливина и неравновесный характер множественных включений клинопироксена свидетельствуют о вероятном реакционном характере ранней стадии кристаллизации указанного парагенезиса на этапе образования и эволюции кимберлита. Указанный факт также исключает участие гипотетических ксеногенных пироповых перидотитов в образовании указанных оливинов. Сложный состав внешних регенерированных зон вкрапленников оливина, количество которых иногда значительно превышает 10 и носит осцилляцион-

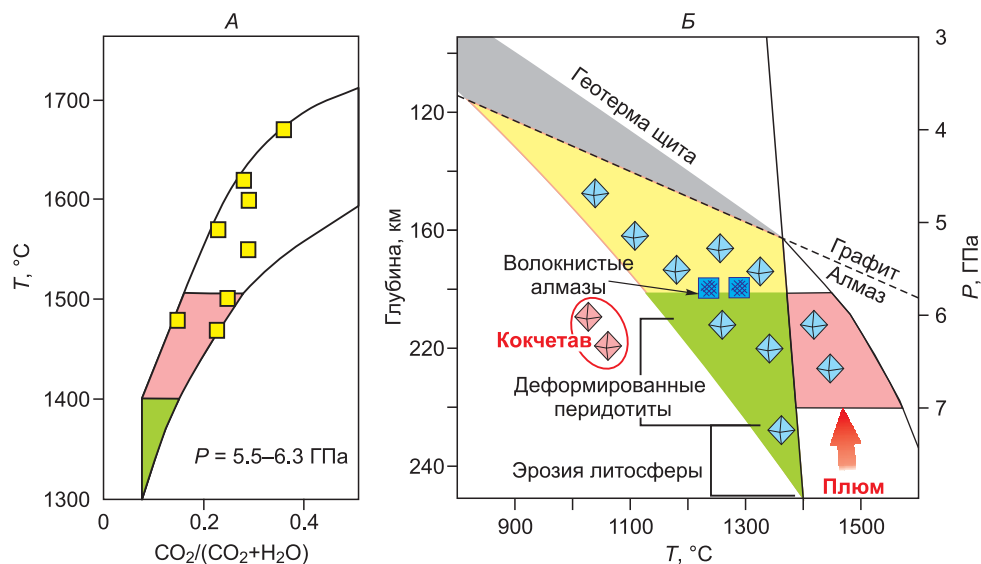


Рис. 2. Сопоставление экспериментальных и модельных данных для образования кимберлитовой магмы:

А — экспериментальная зависимость температуры ликвидуса кимберлитовой магмы от соотношения $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ при 5.5—6.3 ГПа [Сокол, Крук, 2015] и *Б* — плюмовая модель [Похиленко и др., 2015], иллюстрирующие PT -условия формирования перидотитов, взаимодействия с карбонатитовыми расплавами, образования обычных и волокнистых алмазов. Розовым цветом показана ликвидусная область и зеленым цветом — субсолидусная область кимберлитовой магмы при $T = 1300\text{--}1520$ °C и $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}) = 0.1\text{--}0.3$. Красной линией показано PT -поле для кокчетавских алмазоносных пород максимальных давлений и температур [Михно, Корсаков, 2015].

ный характер, свидетельствует о быстрой смене условий роста и растворения оливина в процессе эволюции кимберлита.

В статье Н.П. Похиленко с коллегами рассмотрены модели преобразования корневой части кратонов карбонатитовыми расплавами. При этом примерно одинаковая модель предложена как на основании петрологических данных [Howarth et al., 2014], так и на основании экспериментального изучения кимберлитов, а также включений и интерстиций в деформированных перидотитах [Sharygin et al., 2015]. Показано, что алмаз образуется на ранней стадии воздействия карбонатитового расплава на перидотиты литосферной мантии. На рис. 2 показано сравнение экспериментальных данных зависимости температуры ликвидуса кимберлитовых составов [Сокол, Крук, 2015] с моделью реакции карбонатитового плюма, из работы Н.П. Похиленко и др. [2015]. Соответствие получается при допущении доли $\text{CO}_2/(\text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O})$ около 0.15—0.25, причем температура 1400—1300 °C соответствует солидусу и субсолидусным реакциям в ксенолитах, а 1400—1500 °C — близкиликвидусным условиям, которые в природном кимберлитовом расплаве трудно измерить. Последующее воздействие окисленных флюидов/расплавов приводит к исчезновению алмаза. В работе обсуждается модель образования карбонатитовых диапиров на уровне переходного слоя мантии, которые могут всплывать сквозь мантию по механизму растворения—осаждения [Добрецов, Шацкий, 2012; Litasov et al., 2013c; Shatskiy et al., 2013b]. На уровне границы литосфера—астеносфера подобные диапиры формируют источник кимберлитовых и родственных магм. Кроме моделей реакционного взаимодействия перидотитов с карбонатитовыми расплавами в статье детально рассмотрены варианты взаимодействия с восстановленным флюидом [Foley, 2011; Litasov et al., 2014].

В работе Д.А. Зедгенизова и др. методом дифракции обратнорассеянных электронов исследованы особенности кристаллической структуры сверхглубинных алмазов из Бразилии. Показано, что максимальные деформации наблюдаются вокруг включений MgSi -, CaSi - и CaTiSi -перовскитов, SiO_2 (стишовита?) и Mg_2SiO_4 (рингвудита?), которые интерпретированы как результат возможных фазовых переходов в минеральных включениях. Данное направление, несомненно, представляет интерес как один из источников генетической информации об алмазах, образованных в мантии на разных уровнях глубинности, включая астеносферу, переходную зону и нижнюю мантию.

Далее следует статья А.М. Логвиновой и др. Уникальный характер ксенолита алмазоносного пиропового перидотита (гарцбургита) из кимберлитовой тр. Удачная, существенно отличающегося от всех без исключения подобных находок (80 образцов) в кимберлитах различных регионов земного шара,

подтверждается исключительно высоким содержанием (9.5 об. %) микрокристаллов алмаза (10—700 мкм) в интерстициях зерен пиропы и энстатита. Абсолютное большинство микроалмазов относится к очень редкому типу ПА безазотных алмазов с содержанием примеси азота менее 15 г/т [Shirey et al., 2013] в совокупности с высокой степенью его агрегации. Совершенно необычный для алмазов ультраосновного типа парагенезиса изотопный состав углерода ($\delta^{13}\text{C} = 22.9 \text{ ‰ PDB}$) свидетельствует о том, что флюид, метасоматизирующий ультраосновной субстрат, обладал соответствующими коровыми метками [Тэйлор и др., 2005].

В работе Р.Д. Нойзера и др. на примере изучения восьми включений оливина из четырех алмазов кимберлитовой тр. Юбилейная впервые сделана попытка использования метода дифракции обратнорассеянных электронов (EBSD) для исследования особенностей возможной взаимной ориентировки алмазов и их минеральных включений. Наличие или отсутствие такой ориентировки даже для случаев полной унаследованности включенных минералов, в частности, оливином, пироксеном, гранатом [Соболев и др., 1972] морфологии вмещающего алмаза, может дать ответ об одновременном характере (сингенетическом) роста, либо о раннем образовании (протогенетическом) соответствующего минерала по отношению и алмазу [Taylor et al., 2003]. Полученные данные свидетельствуют о перспективности метода и о выявлении даже на основе исследования взаимной ориентировки только в ограниченном количестве образцов различных структурных соотношений между включениями и вмещающими алмазами.

Работа С.Ю. Скузватова и др. посвящена детальному изучению внутреннего строения алмазов с облакоподобными микровключениями из кимберлитовой тр. Мир методами ИК-спектроскопии и фотолюминесценции, что позволило авторам провести реконструкцию эволюции кристаллогенетических процессов при полистадийном росте.

Для статьи З.В. Спеццуса и др. объектами исследований стали алмазы из ксенолитов эклогитов и перидотитов тр. Нюрбинская. На основе результатов ИК-картирования плоскопараллельных алмазных пластин определены вариации типов и концентрации азотных центров. Авторы определили различия дефектно-примесной структуры алмазов из перидотитовых и эклогитовых ксенолитов, проанализировали возможные причины типоморфизма алмазов тр. Нюрбинская и сделали заключение о вероятном генезисе большинства алмазов эклогитового парагенезиса в результате мантийного «метасоматоза».

В статье С.В. Туткова и др. представлены результаты исследования дефектно-примесной структуры кубических алмазов II разновидности из россыпей северо-востока Сибирской платформы. С помощью ИК-спектроскопии установлено, что в этих необычных кристаллах присутствуют не только известные азотные дефекты А, С и X, но и ряд других центров (γ_1 1240 см⁻¹, 1270 см⁻¹, 1290 см⁻¹, а также линии в интервале 1350—1380 см⁻¹). В работе представлен ряд новых результатов и обсуждается генетическое значение полученной информации о структурных дефектах для реконструкции условий роста и посткристаллизационного отжига изученных кристаллов алмаза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Приведенный обзор и оригинальные статьи спецномера хорошо иллюстрируют как прогресс в изучении проблем глубинного цикла углерода, так и большое число дискуссионных моментов и нерешенных вопросов. Можно выделить три направления, где концентрируются нерешенные вопросы.

1. Вероятные концентрации и формы нахождения углерода (и других легких элементов) во внутреннем и внешнем ядре. В статье [Литасов и др., 2015] оценка содержаний углерода 2.1—3.0 % на границе внутреннего ядра выглядит достаточно правдоподобной, но до полного решения проблемы еще очень далеко. Более того, состав ядра может отличаться от общепринятых моделей с легкими элементами и включать, наоборот, тяжелые элементы [Отани и др., 2015]. К этой же тематике относятся вопросы, касающиеся поведения углеродсодержащих соединений на границе ядро—мантия и их роли в формировании нижнемантийных плюмов.

2. Вероятные модели генерации карбонатитовых расплавов в нижней и верхней мантии [Добрецов, Шацкий, 2012; Шацкий и др., 2015], а также вероятные изменения перидотитов верхней мантии в верлиты или карбонатизированные лерцолиты под влиянием карбонатитовых расплавов [Сокол, Крук, 2015; Похиленко и др., 2015]. Традиционная модель «мантийного метасоматоза» изначально, скорее всего, была слишком произвольной и многовариантной. Модели взаимодействия с карбонатитовыми расплавами вносят заметную определенность и лучше согласуются с экспериментальными данными [Пальянов и др., 2015], но остаются большие неопределенности в отношении вероятного состава карбонатитового расплава и степени его реакции с перидотитами, достаточными для образования алмазоносных кимберлитовых расплавов, а также роли воды в этих процессах.

3. Роль субдукционных процессов на глубине (150—300 км) в образовании изотопно-легких алмазов [Соболев, Соболев, 1980], хотя возможны и другие механизмы [Реутский и др., 2015]. Наиболее дискуссионным является выбор плюмовой или жильной модели [Похиленко и др., 2015]. К этому приемыкает проблема образования в этих зонах дополнительных порций карбонатитовых расплавов, а также

высококальциевых силикатных расплавов шощонитового типа. Такие возможности вытекают из материалов, приведенных для Кокчетавской палеосубдукционной зоны [Stepanov et al., 2014; Добрецов и др., 2015а; Михно, Корсаков, 2015]. Но парадокс заключается в том, что как раз в этой зоне, в ее верхней части, следы подобных расплавов не фиксируются ([Буслов и др., 2015], см. также дискуссию в первом разделе), но широко распространены в субдукционных зонах андийского типа [Добрецов, 2010; Добрецов и др., 2015а,б], глубинная часть которых плохо изучена.

Список нерешенных вопросов этими примерами не исчерпывается. Но мы надеемся, что приведенные в статье сведения новая информация и конструктивная дискуссия стимулируют дополнительные исследования и быстрый прогресс в решении проблемы глубинного цикла углерода.

Статьи, вошедшие в спецвыпуск выполнены в рамках ряда крупных проектов Министерства образования и науки РФ (№ 14.В25.31.0032), Российского научного фонда (гранты 14-27-00054, 14-17-00601, 14-17-00609) грантов Президента РФ (НШ 2024.2014.5, MD-500.2013.5), РФФИ (грант 14-05-92107), интеграционных проектов СО РАН 2012-2014 (№ 97, 22).

ЛИТЕРАТУРА

Бажанова З.Г., Оганов А.Р., Джанола О. Системы Fe—C и Fe—H при давлениях внутреннего ядра Земли // Успехи физических наук, 2012, т. 182, с. 521—530.

Баталева Ю.В., Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Борздов Ю.М., Баюков О.А. Роль пород, содержащих самородное железо, в образовании железистых карбонатно-силикатных расплавов: экспериментальное моделирование при *P-T* параметрах литосферной мантии // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 188—203.

Буслов М.М., Добрецов Н.Л., Вовна Г.М., Киселев В.Н. Структурное положение, состав и геодинамическая природа алмазонасных метаморфических пород Кокчетавской субдукционно-коллизийной зоны Центрально-Азиатского складчатого пояса (Северный Казахстан) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 89—109.

Гумеров В.М., Марданов А.В., Белецкий А.В., Бонч-Осмоловская Е.А., Раввин Н.В. Молекулярный анализ биоразнообразия микроорганизмов в источнике Заварзино, кальдера Узон, Камчатка // Микробиология, 2011, т. 80, № 2, с. 258—265.

Добрецов Н.Л. Петрологические и геохимические особенности субдукционного магматизма // Петрология, 2010, № 1, с. 1—24.

Добрецов Н.Л., Кирдяшкин А.Г. Моделирование процессов субдукции // Геология и геофизика, 1997, т. 38 (5), с. 846—856.

Добрецов Н.Л., Шацкий А.Ф. Глубинный цикл углерода и глубинная геодинамика // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (11), с. 1455—1475.

Добрецов Н.Л., Тениссен К., Смирнова Л.В. Структурная и геодинамическая эволюция алмазосодержащих метаморфических пород Кокчетавского массива (Казахстан) // Геология и геофизика, 1998, т. 39 (12), с. 1645—1666.

Добрецов Н.Л., Буслов М.М., Жимулев Ф.И., Травин А.В., Заячковский А.А. Венд-раннеордовикская эволюция и модель эксгумации пород сверхвысоких давлений Кокчетавской субдукционно-коллизийной зоны (Северный Казахстан) // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (4), с. 428—444.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов Ю.Д. Пути миграции магм и флюидов и составы вулканических пород Камчатки // Геология и геофизика, 2012, т. 53 (12), с. 1633—1661.

Добрецов Н.Л., Кулаков И.Ю., Литасов К.Д., Кукарина Е.В. Значение геологии, экспериментальной петрологии и сейсмотомографии для комплексной оценки субдукционных процессов // Геология и геофизика, 2015а, т. 56 (1—2), с. 21—55.

Добрецов Н.Л., Лазарева Е.В., Жмодик С.М. и др. Геологические, гидрогеохимические и микробиологические особенности Нефтяной площадки кальдеры Узон (Камчатка) // Геология и геофизика, 2015б, т. 56 (1—2), с. 56—88.

Дорогокупец П.И., Дымшиц А.М., Соколова Т.С., Данилов Б.С., Литасов К.Д. Уравнения состояния форстерита, вадслеита, рингвудита, акимотоита, MgSiO₃-перовскита и постперовскита и фазовая диаграмма системы Mg₂SiO₄ при давлениях до 130 ГПа // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 224—246.

Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С., Панин А.В., Евтушенко О.В., Рагозин А.Л., Каги Х. Свидетельства фазовых переходов минеральных включений в суперглубинных алмазах из месторождения Сао-Луис (Бразилия) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 384—396.

Земская Т.И., Ситникова Т.Я., Хлыстов О.М. Исследования глубинных зон Байкала // Вестник РАН, 2014, т. 84 (6), с. 500—505.

- Карпов Г.А.** Современные гидротермы и ртутно-сурьмяно-мышьяковое оруденение. М., Наука, 1988, 183 с.
- Конторович А.Э., Бортникова С.Б., Карпов Г.А., Каширцев В.А., Костырева Е.А., Фомин А.Н.** Кальдера вулкана Узон (Камчатка) — уникальная природная лаборатория современного нефтидогенеза // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (8), с. 986—990.
- Коржинский Д.С.** Гранитизация как магматическое замещение // Изв. АН СССР, Серия геологическая, 1952, № 2, с. 56—69.
- Коржинский Д.С.** Очерк метасоматических процессов // Основные проблемы в учении о магматогенных рудных месторождениях. М., Изд-во АН СССР, 1955, с. 334—456.
- Кривовичев С.В., Чернятьева А.П., Бритвин С.Н., Яковенчук В.Н.** Кристаллическая структура гирвасита $\text{NaCa}_2\text{Mg}_3(\text{PO}_4)_3(\text{CO}_3)(\text{H}_2\text{O})_6$ — сложного водного фосфат-карбоната с электронейтральными гетерополиэдрическими слоями // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 204—213.
- Кузюра А.В., Литвин Ю.А., Джеффрис Т.** Коэффициенты межфазового распределения редких элементов в карбонатно-силикатных материнских средах алмазов и парагенных включений (эксперимент при 7.0—8.5 ГПа) // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 286—299.
- Лазарева Е.В., Анисимова Н.С., Брянская А.В., Огородникова О.Л., Жмодик С.М.** Особенности минералообразования в микробных сообществах, развивающихся по изливу источника Термофильный (кальдера Узон, Камчатка) // Труды Кроноцкого заповедника, Петропавловск-Камчатский, 2012, вып. 2, с. 143—156.
- Литасов К.Д.** Физико-химические условия плавления мантии Земли в присутствии С-О-Н-флюида по экспериментальным данным // Геология и геофизика, 2011, т. 52 (5), с. 613—635.
- Литасов К.Д., Попов З.И., Гаврюшкин П.Н., Овчинников С.Г., Федоров А.С.** Первопринципные расчеты уравнений состояния и относительной стабильности карбидов железа при давлениях ядра Земли // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 214—223.
- Логвинова А.М., Тэйлор Л.А., Федорова Е.Н., Елисеев А.П., Вирт Р., Ховарт Дж., Реутский В.Н., Соболев Н.В.** Уникальный ксенолит алмазоносного перидотита из кимберлитовой трубки Удачная (Якутия): роль субдукции в образовании алмазов // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 397—415.
- Михно А.О., Корсаков А.В.** Карбонатитовый, силикатный и сульфидный расплавы: гетерогенность минералообразующей среды в породах сверхвысоких давлений Кокчетавского массива // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 110—132.
- Нечаев Д.В., Хохряков А.Ф.** Образование эпигенетических включений графита в кристаллах алмаза: экспериментальные данные // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (4), с. 523—532.
- Нойзер Р.Д., Шергл Г.-П., Логвинова А.М., Соболев Н.В.** Исследование включений оливина в сибирских алмазах методом дифракции обратнорассеянных электронов: признаки сингенетического роста? // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 416—425.
- Отани Э., Мибе К., Сакамаки Т., Камада С., Такахаси С., Фукуи Х., Цуцуи С., Барон А.К.Р.** Скорости звуковых волн, измеренные методом неупругого рассеяния рентгеновских лучей при высоких давлениях и температурах в алмазной ячейке с резистивным нагревом // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 247—253.
- Пальянов Ю.Н., Сокол А.Г., Хохряков А.Ф., Крук А.Н.** Условия кристаллизации алмаза в кимберлитовом расплаве по экспериментальным данным // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 254—272.
- Похиленко Н.П., Агашев А.М., Литасов К.Д., Похиленко Л.Н.** Взаимоотношения карбонатитового метасоматоза деплетированных перидотитов литосферной мантии с алмазообразованием и карбонатит-кимберлитовым магматизмом // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 361—383.
- Рагозин А.Л., Каримова А.А., Литасов К.Д., Зедгенизов Д.А., Шацкий В.С.** Содержание воды в минералах мантийных ксенолитов из кимберлитов трубки Удачная (Якутия) // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (4), с. 549—567.
- Реутский В.Н., Пальянов Ю.Н., Борздов Ю.М., Сокол А.Г.** Изотопное фракционирование углерода при кристаллизации алмаза в модельных системах // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 308—315.
- Скузоватов С.Ю., Зедгенизов Д.А., Ракевич А.Л., Шацкий В.С., Мартынович Е.Ф.** Полистадийный рост алмазов с облакоподобными микровключениями из кимберлитовой трубки Мир: по данным изучения оптически-активных дефектов // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 426—441.
- Соболев В.С., Соболев Н.В.** Новые доказательства погружения на большие глубины эклэгитизированных пород земной коры // Докл. АН СССР, 1980, т. 250 (3), с. 683—685.
- Соболев Н.В., Боткунов А.И., Бакуменко И.Т., Соболев В.С.** Кристаллические включения с октаэдрической огранкой в алмазах // Докл. АН СССР, 1972, т. 204, с. 117—120.

Соболев Н.В., Шертл Х.П., Бурхард М., Шацкий В.С. Необычный пироп-гроссуляровый гранат и его парагенезис из алмазосодержащих известково-силикатных пород Кокчетавского массива, Казахстан // Докл. РАН, 2001, т. 380 (2), с. 237—241.

Соболев Н.В., Шертл Г.-П., Нойзер Р.Д. Особенности состава и парагенезиса гранатов ультра-высокобарических известково-силикатных метаморфических пород Кокчетавского массива (Северный Казахстан) // Геология и геофизика, 2006, т. 47 (4), с. 521—531.

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

Сокол А.Г., Крук А.Н. Условия генерации кимберлитовых магм: обзор экспериментальных данных // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 316—336.

Соколова Т.С., Дорогокупец П.И., Литасов К.Д. Взаимосогласованные шкалы давлений на основании уравнений состояния рубина, алмаза, MgO, B₂-NaCl, а также Au, Pt и других металлов до 4 Мбар и 3000 К // Геология и геофизика, 2013, т. 54 (2), с. 237—261.

Специус З.В., Богуш И.Н., Ковальчук О.Е. ИК-картирование алмазных пластин из ксенолитов эколгитов и перидотитов трубки Нюрбинская (Якутия): генетические следствия // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 442—454.

Титков С.В., Ширяев А.А., Зудина Н.Н., Зудин Н.Г., Солодова Ю.П. Дефекты в кубических алмазах из россыпей северо-востока Сибирской платформы по данным ИК-микроспектроскопии // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 455—466.

Тэйлор Л.А., Специус З.В., Уизли Р., Спикуцца М., Вэлли Д.У. Океанические протолиты алмазосных перидотитов: свидетельство их корового происхождения на примере якутских кимберлитов // Геология и геофизика, 2005, т. 46 (12), с. 1198—1206.

Фурсенко Е.А., Каширцев В.А., Конторович А.Э., Фомин А.Н. Геохимия нафтидов из локализованных на суше гидротермальных источников и вопросы их генезиса (Узон, Йеллоустоун, Новая Зеландия) // Геология и геофизика, 2014, т. 55 (5—6), с. 918—930.

Хохряков А.Ф., Нечаев Д.В. Типоморфные особенности включений графита в алмазе: экспериментальные данные // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 300—307.

Шарыгин И.С., Литасов К.Д., Шацкий А.Ф., Головин А.В., Отани Е., Похиленко Н.П. Экспериментальное исследование плавления кимберлита трубки Удачная-Восточная при 3—6.5 ГПа и 900—1500 °С // ДАН, 2013, т. 448, с. 452—457.

Шацкий А.Ф., Литасов К.Д., Пальянов Ю.Н. Фазовые взаимоотношения в карбонатных системах при *P-T* параметрах литосферной мантии: обзор экспериментальных данных // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 149—187.

Шертл Г.-П., Нойзер Р.Д., Логвинова А.М., Вирт Р., Соболев Н.В. Катодолюминесцентная микроскопия известково-силикатных пород сверхвысоких давлений Кокчетавского массива: что мы можем узнать нового о силикатах, углеродсодержащих минералах и алмазах? // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 133—148.

Энджел Р.Дж., Альваро М., Нестола Ф., Маццучелли М.Л. Термоупругие свойства алмаза и их значение для определения давления образования систем алмаз—включение // Геология и геофизика, 2015, т. 56 (1—2), с. 273—285.

Arima M., Nakayama K., Akaishi M., Yamaoka S., Kanda H. Crystallization of diamond from a silicate melt of kimberlite composition in high-pressure and high-temperature experiments // *Geology*, 1993, v. 21, p. 968—970.

Bataleva Yu.V., Palyanov Yu.N., Sokol A.G., Borzdov Yu.M., Palyanova G.A. Conditions for the origin of oxidized carbonate-silicate melts: implications for mantle metasomatism and diamond formation // *Lithos*, 2012, v. 128—131, p. 113—125.

Boyd S.R., Pineau F., Javoy M. Modeling the growth of natural diamonds // *Chem. Geol.*, 1994, v. 116, p. 29—42.

Buob A., Luth R.W., Schmidt M.W., Ulmer P. Experiments on CaCO₃-MgCO₃ solid solutions at high pressure and temperature // *Amer. Miner.*, 2006, v. 91, p. 435—440.

Claoue-Long J., Soboлев N., Shatsky V., Soboлев A. Zircon response to diamond pressure metamorphism in the Kokchetav massif, USSR // *Geology*, 1991, p. 710—713.

Dasgupta R., Hirschmann M.M. Melting in the Earth's deep upper mantle caused by carbon dioxide // *Nature*, 2006, v. 440, p. 659—662.

Dasgupta R., Hirschmann M.M., Withers A.C. Deep global cycling of carbon constrained by the solidus of anhydrous, carbonated eclogite under upper mantle conditions // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2004, v. 227, p. 73—85.

- Deines P.** The carbon isotope geochemistry of mantle xenoliths // *Earth Science Reviews*, 2002, v. 58, p. 247—278.
- 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.
- Dziewonski A.M., Anderson D.L.** Preliminary reference Earth model // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 1981, v. 25, p. 297—356.
- Edgar A.D., Charbonneau H.E.** Melting experiments on a SiO₂-poor, CaO-rich aphanitic kimberlite from 5—10 GPa and their bearing on sources of kimberlite magmas // *Amer. Miner.*, 1993, v. 78, p. 132—142.
- Eggler D.H., Wendlandt R.F.** Experimental studies on the relationships between kimberlite magma and partial melting of peridotite / Eds. F.R. Boyd, H.O.A. Meyer // *Kimberlites, diatremes and diamonds: their geology, petrology, and geochemistry*. 1979, American Geophysical Union, Washington. p. 331—378.
- Foley S.F.** A reappraisal of redox melting in the Earth's mantle as a function of tectonic setting and time // *J. Petrol.*, 2011, v. 52, p. 1363—1391.
- Gavryushkin P.N., Bakakin V.V., Bolotina N.B., Shatskiy A.F., Seryotkin Y.V., Litasov K.D.** Synthesis and crystal structure of new carbonate Ca₃Na₂(CO₃)₄ homeotypic with orthoborates M₃Ln₂(BO₃)₄ (M = Ca, Sr, Ba) // *Crystal Growth and Design*, 2014, v. 14, p. 4610—4616.
- Gerya T.** Intra-oceanic subduction zones // *Arc-continent collision* / Eds. D. Brown, P.D. Ryan. Springer-Vergag, Berlin-Heidelberg, Frontier in Earth Science series, 2011, p. 23—51.
- Ghosh S., Litasov K.D., Ohtani E.** Phase relations and melting of carbonated peridotite between 10 and 20 GPa: a proxy for alkali- and CO₂-rich silicate melts in the deep mantle // *Contr. Miner. Petrol.*, 2014, v. 167, p. 1—23.
- Girnis A.V., Brey G.P., Ryabchikov I.D.** Origin of group IA kimberlites: fluid saturated melting experiments at 45—55 kbar // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1995, v. 134, p. 283—296.
- Girnis A.V., Bulatov V.K., Brey G.P.** Formation of primary kimberlite melts — constraints from experiments at 6—12 GPa and variable CO₂/H₂O // *Lithos*, 2011, v. 127, p. 401—413.
- Hacker B.R., Abers G.A., Peacock S.M.** Subduction factory 1. Theoretical mineralogy, densities, seismic wave speeds, and H₂O contents // *J. Geophys. Res.*, 2003, v. 108, p. 2029—2054.
- Hermann J., Rubatto D., Korsakov A., Shatsky V.S.** Multiple zircon inclusion growth during fast exhumation of diamondiferous, deeply subducted continental crust (Kokchetav massif, Kazakhstan) // *Contr. Miner. Petrol.*, 2001, v. 141, p. 66—82.
- Holland T.J.B., Powell R.** An improved and extended internally consistent thermodynamic dataset for phases of petrological interest, involving a new equation of state for solids // *J. Metam. Geol.*, 2011, v. 29, p. 333—383.
- Howarth G.H., Barry P.H., Pernet-Fisher J.F., Baziotis I.P., Pokhilenko N.P., Pokhilenko L.N., Bodnar R.J., Taylor L.A., Agashev A.M.** Superplume metasomatism: evidence from Siberian mantle xenoliths // *Lithos*, 2014, v. 184, p. 209—224.
- Katayama I., Maruyama S., Parkinson C.D., Terada K., Sano Y.** Ion micro-probe U-Pb zircon geochronology of peak and retrograde stages of ultrahigh-pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif, northern Kazakhstan // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2001, v. 188, p. 185—198.
- Khokhryakov A.F., Nechaev D.V., Sokol A.G., Palyanov Yu.N.** Formation of various types of graphite inclusions in diamond: experimental data // *Lithos*, 2009, v. 112S, p. 683—689.
- Kiseeva E.S., Yaxley G.M., Hermann J., Litasov K.D., Rosenthal A., Kamenetsky V.S.** An experimental study of carbonated eclogite at 3.5—5.5 GPa: implications for silicate and carbonate metasomatism in the cratonic mantle // *J. Petrol.*, 2012, v. 53, p. 727—759.
- Kogiso T., Omori S., Maruyama S.** Magma genesis beneath Northeast Japan arc: a new perspective on subduction zone magmatism // *Gondwana Res.*, 2009, v. 16, p. 446—457.
- Korsakov A.V., De Gussem K., Zhukov V.P., Perraki M., Vandenabeele P., Golovin A.V.** Aragonite-calcite-dolomite relationships in UHPM polycrystalline carbonate inclusions from the Kokchetav Massif, Northern Kazakhstan // *Eur. J. Miner.*, 2009, v. 21, p. 1301—1311.
- Krivovichev S.V.** Structural complexity of minerals: information storage and processing in the mineral world // *Miner. Mag.*, 2013, v. 77, p. 275—326.
- Krivovichev S.V.** Which inorganic structures are the most complex? // *Angew. Chem. Int. Ed.*, 2014, v. 53, p. 654—661.
- Litasov K.D., Shatskiy A., Ohtani E., Yaxley G.M.** The solidus of alkaline carbonatite in the deep mantle // *Geology*, 2013a, v. 41, p. 79—82.
- Litasov K.D., Sharygin I.S., Dorogokupets P.I., Shatskiy A.F., Gavryushkin P.N., Sokolova T.S., Ohtani E., Li J., Funakoshi K.** Thermal equation of state to 31 GPa and 1473 K and thermodynamic properties of iron carbide, Fe₃C // *J. Geophys. Res. Solid Earth*, 2013b, v. 118, p. 5274—5284, doi: 10.1002/2013JB010270.

- Litasov K.D., Shatskiy A., Ohtani E.** Earth's mantle melting in the presence of C-O-H-bearing fluid // *Physics and chemistry of the deep Earth* / Ed. S. Karato. Wiley, New York, 2013c, p. 38—65.
- Litasov K.D., Shatskiy A., Ohtani E.** Melting and subsolidus phase relations in peridotite and eclogite systems with reduced C-O-H fluid at 3—16 GPa // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2014, v. 391, p. 87—99.
- Mitchell R.H.** Experimental studies at 5—12 GPa of the Ondermatjie hypabyssal kimberlite // *Lithos*, 2004, v. 76, p. 551—564.
- Navon O.** Diamond formation in the Earth's mantle / Eds. J.J. Gurney, J.L. Gurney, M.D. Pascoe, S.H. Richardson // VII International Kimberlite conference 2, Cape Town: Red Roof Design, 1999, p. 584—604.
- Ohtani E., Shibazaki Y., Sakai Y., Mibe K., Fukui H., Kamada S., Sakamaki T., Seto Y., Tsutsui S., Baron A.Q.R.** Sound velocity of hexagonal close-packed iron up to core pressures // *Geophys. Res. Lett.*, 2013, v. 40, p. 5089—5094, doi:10.1002/grl.50992.
- Pal'yanov Yu.N., Sokol A.G., Borzdov Yu.M., Khokhryakov A.F., Sobolev N.V.** Diamond formation through carbonate-silicate interaction // *Amer. Miner.*, 2002, v. 87, № 7, p. 1009—1013.
- Pal'yanov Yu.N., Sokol A.G., Tomilenko A.A., Sobolev N.V.** Conditions of diamond formation through carbonate-silicate interaction // *Eur. J. Miner.*, 2005, v. 17, p. 207—214.
- Palyanov Yu.N., Borzdov Yu.M., Bataleva Yu.V., Sokol A.G., Palyanova G.A., Kupriyanov I.N.** Reducing role of sulfides and diamond formation in the Earth's mantle // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2007, v. 260, № 1—2, p. 242—256.
- Palyanov Yu.N., Bataleva Yu.V., Sokol A.G., Borzdov Yu.M., Kupriyanov I.N., Reutsky V.N., Sobolev N.V.** Mantle—slab interaction and redox mechanism of diamond formation // *Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA*, 2013, v. 110, № 51, p. 20408—20413.
- Palyanov Yu.N., Kupriyanov I.N., Khokhryakov A.F., Ralchenko V.G.** Crystal growth of diamond // *Handbook of crystal growth*, 2014, Amsterdam, Elsevier.
- Poli S., Schmidt M.W.** Petrology and subducted slabs // *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2002, v. 30, p. 207—235.
- 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.
- Schertl H.-P., Neuser R.D., Sobolev N.V., Shatskiy V.S.** UHP-metamorphic rocks from Dora Maira/Western Alps and Kokchetav/Kazakhstan: new insights using cathodoluminescence petrography // *Europ. J. Miner.*, 2004, v. 16 (1), p. 49—57.
- Sharygin I.S., Litasov K.D., Shatskiy A.F., Golovin A.V., Ohtani E., Pokhilenko N.P.** Melting phase relations of the Udachnaya-East Group-I kimberlite at 3.0—6.5 GPa: experimental evidence for alkali-carbonatite composition of primary kimberlite melt and implication to mantle plumes // *Gondw. Res.*, 2015.
- Shatskiy V.S., Jagoutz E., Sobolev N.V., Kozmenko O.A., Parkhomenko V.S., Troesch M.** Geochemistry and age of ultrahigh pressure metamorphic rocks from the Kokchetav massif (Northern Kazakhstan) // *Contr. Miner. Petrol.*, 1999, v. 137, p. 185—205.
- Shatskiy A., Sharygin I.S., Gavryushkin P.N., Litasov K.D., Borzdov Y.M., Shcherbakova A.V., Higo Y., Funakoshi K., Palyanov Y.N., Ohtani E.** The system K_2CO_3 — $MgCO_3$ at 6 GPa and 900—1450 °C // *Amer. Miner.*, 2013a, v. 98, p. 1593—1603.
- Shatskiy A., Litasov K.D., Borzdov Y.M., Katsura T., Yamazaki D., Ohtani E.** Silicate diffusion in alkali-carbonatite and hydrous melts at 16.5 and 24 GPa: implication for the melt transport by dissolution-precipitation in the transition zone and uppermost lower mantle // *Phys. Earth Planet. Inter.*, 2013b, v. 225, p. 1—11.
- Shatskiy A., Borzdov Y.M., Litasov K.D., Kupriyanov I.N., Ohtani E., Palyanov Y.N.** Phase relations in the system $FeCO_3$ — $CaCO_3$ at 6 GPa and 900—1700 °C and its relation to the system $CaCO_3$ — $FeCO_3$ — $MgCO_3$ // *Amer. Miner.*, 2014, v. 99, p. 773—785.
- Shimizu N., Sobolev N.V.** Young peridotitic diamonds from the Mir kimberlite pipe // *Nature*, 1995, v. 375, p. 394—397.
- 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. Geochim.*, 2013, v. 75, p. 355—421.
- Simoneit B.R.T.** Petroleum generation, an easy and widespread process in hydrothermal systems: an overview // *App. Geochem.*, 1990, v. 5 (1—2), p. 3—15.
- Sobolev N.V.** Deep seated inclusions in kimberlites and the problem of the composition of the upper mantle. AGU, Washington, D.C., 1977, p. 279.
- 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.*, 2011, v. 162 (5), p. 1079—1092.

Sokol A.G., Kupriyanov I.N., Palyanov Y.N., Kruk A.N., Sobolev N.V. Melting experiments on the Udachnaya kimberlite at 6.3—7.5 GPa: implications for the role of H₂O in magma generation and formation of hydrous olivine // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2013a, v. 101, p. 133—155.

Sokol A.G., Kupriyanov I.N., Palyanov Yu.N. Partitioning of H₂O between olivine and carbonate-silicate melts at 6.3 GPa and 1400 °C: implications for kimberlite formation // *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2013b, v. 383, p. 58—67.

Sokol A.G., Kruk A.N., Palyanov Yu.N. The role of water in generation of group II kimberlite magmas: constraints from multiple saturation experiments // *Amer. Miner.*, 2014, doi: 10.2138/am-2014-4893.

Stepanov A.S., Hermann J., Rubatto D., Rapp R.P. Experimental study of monazite/melt partitioning with implications for the REE, Th and U geochemistry of crustal rocks // *Chem. Geol.*, 2012, v. 300, p. 200—220.

Stepanov A.S., Hermann J., Korsakov A.V., Rubatto D. Geochemistry of UHP- anatexis: fractionation of elements in the Kokchetav gneisses during melting at diamond-facies conditions // *Contr. Miner. Petrol.*, 2014, v. 167, p. 1002.

Stixrude L., Lithgow-Bertelloni C. Thermodynamics of mantle minerals II. Phase equilibria // *Geophys. J. Intern.*, 2011, v. 184, p. 1180—1213.

Taylor L.A., Anand M., Promprated P., Floss C., Sobolev N.V. The significance of mineral inclusions in large diamonds from Yakutia, Russia // *Amer. Miner.*, 2003, v. 88 (5—6), p. 912—920.

Theunissen K., Dobretsov N.L., Korsakov A., Travin A., Shatsky V.S., Smirnova L., Boven A. Two contrasting petrotectonic domains in the Kokchetav megamélange (north Kazakhstan): Difference in exhumation mechanisms of ultrahigh-pressure crustal rocks, or a result of subsequent deformation? // *Island Arc*, 2000, v. 9, p. 284—303.

Ulmer P., Sweeney R.J. Generation and differentiation of group II kimberlites: constraints from a high-pressure experimental study to 10 GPa // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2002, v. 66, p. 2139—2153.

Weiss Y., Kiflawi I., Davies N., Navon O. High-density fluids and the growth of monocrystalline diamonds // *Geochim. Cosmochim. Acta*, 2014, v. 141, p. 145—159.

Zedgenizov D.A., Ragozin A.L., Shatsky V.S., Araujo D., Griffin W.L., Kagi H. Mg and Fe-rich carbonate-silicate high-density fluids in cuboid diamonds from the Internationalnaya kimberlite pipe (Yakutia) // *Lithos*, 2009, v. 112, p. 638—647.

*Поступила в редакцию
8 октября 2014 г.*