

УДК 548/549,549.057

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ МИНЕРАЛОГИИ, ПЕТРОЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

Ю.Н. Пальянов^{1,2}, А.И. Непомнящих³

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

²Новосибирский государственный университет, 630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1, Россия

³Институт геохимии им. А.П. Виноградова СО РАН, 664033, Иркутск, ул. Фаворского, 1А, Россия

Настоящий спецвыпуск посвящен актуальным проблемам экспериментальной минералогии, петрологии, геохимии и включает результаты исследований, представленных на XVIII Российском совещании по экспериментальной минералогии, прошедшем с 5 по 10 сентября 2022 г. в Институте геохимии СО РАН (г. Иркутск). Тематика статей связана с широким кругом вопросов экспериментального моделирования минералообразующих процессов в различных геологических обстановках, а также с задачами технической минералогии. Диапазон контролируемых условий, реализованных в экспериментах, очень значительный — от коровых до мантийных.

Экспериментальное моделирование, минералогия, петрология, геохимия

MODERN PROBLEMS OF EXPERIMENTAL MINERALOGY, PETROLOGY, AND GEOCHEMISTRY

Yu.N. Palyanov, A.I. Nepomnyashchikh

This Special issue of *Russian Geology and Geophysics* is a collection of papers on current problems of experimental mineralogy, petrology, and geochemistry discussed at the XVIII Russian Conference on Experimental Mineralogy (5–10 September 2022, Vinogradov Institute of Geochemistry, Irkutsk). The scope of considered issues ranges from laboratory modeling of mineral formation processes in different tectonic settings to technical mineralogy. The reported experiments are run at pressures and temperatures corresponding to crustal and mantle conditions.

Experimental modeling, mineralogy, petrology, geochemistry

В науках о Земле на протяжении многих десятилетий успешно развивается направление экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, которое имеет славные традиции. Первое совещание по экспериментальной и технической минералогии и петрографии состоялось 26—29 апреля 1934 г. в Академии наук СССР под председательством академика Ф.Ю. Левинсона-Лессинга. На этом совещании был представлен пленарный доклад академика Д.С. Белянкина «О физико-химическом эксперименте в петрографии». Второе совещание прошло 10 мая 1936 г. в Москве с участием специалистов из 14 учреждений. Пленарный доклад академика В.И. Вернадского назывался «О задачах синтеза в области алюмосиликатов». В последующие годы совещания проходили в Москве, Ленинграде, Львове, Новосибирске, Иркутске, Киеве, Черногоровке, Миассе и Сыктывкаре. Легендарными участниками совещаний стали академики Ф.Ю. Левинсон-Лессинг, Д.С. Белянкин, В.И. Вернадский, Д.С. Коржинский, А.П. Карпинский, В.С. Соболев, В.А. Жариков и Н.В. Соболев.

Настоящий специальный выпуск журнала «Геология и геофизика» посвящен актуальным проблемам экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, рассмотренным на XVIII Российском совещании по экспериментальной минералогии с 5 по 10 сентября 2022 г. в Иркутске. В работе совещания приняли участие более 90 ученых, представляющих 28 организаций из 14 городов (Москва, Санкт-Петербург, Новосибирск, Иркутск, Черногоровка, Сыктывкар, Улан-Удэ, Екатеринбург, Чита, Красноярск, Казань, Миасс, Владивосток и Петропавловск-Камчатский), которые сделали 105 докладов.

В последние годы мировые тенденции свидетельствуют, что подавляющее большинство экспериментальных исследований в области минералогии, петрологии и геохимии связаны с высокими давлениями. Как известно, минералообразование в глубинных зонах Земли в значительной степени зависит от процессов субдукции. Учитывая, что с увеличением глубины породы становятся более восстановленными, а при достижении 250 км и более в породах верхней мантии появляется металлическое железо,

нет сомнений в том, что взаимодействие окисленных субдущированных пород земной коры и восстановленных пород мантии является триггером различных минералообразующих процессов, включая кристаллизацию алмаза. В работе Ю.Н. Пальянова с соавторами [2023] приведены результаты экспериментальных исследований, моделирующих резко контрастное по f_{O_2} мантийно-коровое взаимодействие на примере системы (Fe,Ni)—(Mg, Ca)CO₃ при 6.3 ГПа в интервале температур от 800 до 1500 °С, соответствующих условиям «холодной», и «горячей» субдукции. Эксперименты проведены на многопуансонной аппаратуре высокого давления «разрезная сфера» (БАРС), максимально адаптированной для решения задач подобного уровня, требующих большого реакционного объема, герметичности и поддержания *PT*-параметров в течение десятков часов. Методика, позволяющая создавать в кристаллизационной ампуле существенный градиент фугитивности кислорода и, соответственно, обеспечивать возникновение и продвижение редокс-фронта, представлена в работе [Palyanov et al., 2013]. В результате проведенных исследований установлено закономерное изменение состава фаз реакционных зон на границе металл (Fe,Ni)—карбонат (Mg,Ca)CO₃ и определены скорости продвижения редокс-фронта от 1.3 (800 °С) до 118 мкм/ч (1550 °С). Очевидно, что с учетом геологического времени процессы взаимодействия в системе металл—карбонат возможны и при существенно меньших температурах. Установлено, что в результате такого взаимодействия металлическая фаза значительно обогащается никелем, более того, присутствие последнего в восстановительной части образца исключает образование карбидов. При температурах 1400—1550 °С за счет углерода исходного карбоната наблюдалась кристаллизация алмаза как в восстановленном металл-углеродном, так и в окисленном карбонатном расплаве. В работе не только определены условия кристаллизации алмазов из разных зон, но и выявлены их индикаторные характеристики, связанные с составом включений, микроморфологией и особенностями роста, а также спецификой дефектно-примесного состава алмазов, полученных в одном минералообразующем процессе, но в различных зонах. Детальное изучение метастабильного графита, образующегося при металл-карбонатном взаимодействии, показало, что степень его структурного совершенства является индикатором температуры в интервале 800—1550 °С.

Для данной серии экспериментов в работе В.Н. Реутского с соавторами [2023] представлены результаты экспериментального исследования распределения стабильных изотопов углерода между углеродными и углеродсодержащими фазами, образованными в результате взаимодействия FeNi сплава и (Mg,Ca)CO₃. Показано, что эффективность изотопного обмена зависит от степени плавления реагирующих веществ. Величина изотопного фракционирования максимальна и достигает 20 ‰ при реакции твердых металла и карбоната. Процессы плавления значительно уменьшают масштаб изотопных эффектов, и, несмотря на отсутствие кристаллических карбидов, разделение изотопов углерода между металл-углеродным расплавом и карбонатом аппроксимируется равновесной температурной зависимостью CaCO₃—Fe₃C [Horita, Polyakov, 2015]. В *PT*-области устойчивости алмаза его кристаллизация из металл-углеродного расплава обуславливает значительное обеднение металла тяжелым изотопом углерода, и наблюдаемое изотопное фракционирование перестает соответствовать равновесному. С помощью современной техники локального *in situ* анализа изотопного состава установлен постепенный рост содержания легкого изотопа углерода в направлении роста алмазов, образованных в металл-углеродном расплаве, что наглядно демонстрирует его изотопное исчерпание в процессе кристаллизации алмаза. Чрезвычайно медленная диффузия изотопов углерода в алмазе делает описанный процесс фракционирования необратимым и наблюдаемые изотопные эффекты не меняются за счет посткристаллизационного диффузионного переуравновешивания в течение геологического времени. Рассмотренное в работе редокс-взаимодействие карбонатов с металлами является одним из возможных механизмов формирования изотопно-легкого углерода мантии за счет карбонатного вещества морских осадков. Погружение морских карбонатов в зонах субдукции и их взаимодействие с металлами может обеспечивать высвобождение элементарного углерода и образование алмаза. Работа В.Н. Реутского с соавторами экспериментально демонстрирует, что процесс субдукции обеспечивает формирование значительных изотопных неоднородностей углерода, охватывающих изотопно-легкую область «органического» углерода и позволяющих формировать аномальные изотопно-тяжелые карбонаты, обнаруженные ранее в кимберлитах Сибирской платформы [Галимов, Уханов, 1989].

Продолжает цикл статей по экспериментальному моделированию минералообразующих процессов и флюидного режима в зонах субдукции работа А.Г. Сокола с соавторами [2023], в которой с использованием метода алмазной ловушки реконструирован состав флюида в карбонат- и хлорсодержащем пелите. В ней детально представлен алгоритм реконструкции состава флюида на базе данных ИСП-АЭС и расчетов баланса масс. Показано, что в пелитовой системе при 3.0 ГПа и 900 °С образуется силикатный расплав, а при 750 °С — флюид, близкий по составу к сверхкритическому. Такой флюид содержит 30—50 мас. % H₂O + CO₂, до 1 мас. % Cl и по концентрации петрогенных компонентов занимает промежуточное положение между силикатным расплавом и флюидом. В работе сделан вывод, что близкий по составу к сверхкритическому низкотемпературный флюид может выступать эффектив-

ным транспортером большого количества летучих (H_2O , CO_2 , Cl , P , Sr и B), а также значительного количества петрогенных компонентов из зон субдукции в область генерации островодужных магм.

Исследования *А.Ф. Шацкого с соавторами* [2023], выполненные на многопуансонном прессе, продолжают цикл работ по мантийной тематике и посвящены реконструкции фазовых взаимоотношений в системе $\text{NaCl}-\text{CaCO}_3-\text{MgCO}_3$ при давлении 3 ГПа в интервале температур 800—1300 °С, а также построению на основе экспериментов фазовых диаграмм и изотермических $T-X$ сечений. Авторы определили температуры эвтектик и границы фазовых полей в бинарных системах $\text{NaCl}-\text{CaCO}_3$ и $\text{NaCl}-\text{MgCO}_3$, а также в тройной системе $\text{NaCl}-\text{CaCO}_3-\text{MgCO}_3$. Тематика статьи связана с проблемой образования и эволюции хлоридно-карбонатных жидкостей, включения которых обнаружены в минералах кимберлитов и мантийных ксенолитов, вынесенных с разных уровней глубинности верхней мантии. В работе экспериментально обоснован важный петрологический вывод, что при 3 ГПа в доломитсодержащем перидотите появление NaCl должно снижать температуру солидуса на 180—230 °С относительно солидуса $\text{CMAS}-\text{CO}_2$. Таким образом, авторы установили особенности топологии петрологически значимых карбонатно-хлоридных систем и их эволюции, а также продемонстрировали отличия систем, содержащих NaCl и KCl .

В статье *Л.А. Гореловой* [2023] представлен обзор результатов изучения минералов семейства полевого шпата с топологией парацельзиана при высоких PT -параметрах и новые данные по исследованию термических деформаций парацельзиана. В работе приведен сравнительный анализ поведения минералов данного семейства (три боросиликата, два алюмосиликата и два бериллофосфата) в условиях изменения температуры и давления. Показано, что такие минералы, как данбурит, малеевит, пековит, парацельзиан, слаусонит и херлбатит при повышении давления испытывают фазовые переходы с увеличением координационного числа каркасообразующих катионов от четырех до пяти-шести. Рассмотрены механизмы образования полиэдров TO_3 при высоких давлениях и показано, что возможность формирования необычных структурных единиц следует учитывать при интерпретации процессов трансформации вещества земной коры в зонах субдукции.

В статье *Э.С. Перскова с соавторами* [2023] представлены оригинальные данные по изучению процессов взаимодействия водорода с расплавами базальтового и андезитового составов в интервале температур 1100—1250 °С, при давлениях 1—100 МПа. Эксперименты проведены на уникальной установке высокого газового давления, созданной авторами. В работе продемонстрированы проявления гетерогенности первичного однородного магматического расплава при его взаимодействии с водородом и образование ликвационных металлических обособлений. В результате окислительно-восстановительных процессов с участием водорода установлено образование металлической (Fe , Ni , Co) фазы и воды, которая растворяется как в расплаве, так и в газовой фазе. Изучена кинетика данного процесса, ее влияние на состав кристаллизующихся минеральных фаз, а также определено влияние температуры на особенности образования металла. Полученные результаты сопоставлены авторами с природными образцами магматических пород, содержащими самородное железо и сплавы на его основе, что позволило сделать вывод о том, что металл-силикатная ликвация может реализоваться в природных магмах при их взаимодействии с водородом.

Статья *В.Л. Таусона с соавторами* [2023] связана с проблемой концентрирования и перераспределения элементов в процессах гидротермального минералообразования. В работе представлены результаты изучения распределения ряда элементов в гидротермальных системах с магнетитом, гематитом и сфалеритом при температуре 450 °С и давлении 100 МПа. На основе экспериментальных и аналитических результатов определены коэффициенты распределения и сокристаллизации. Полученные данные позволяют уточнить специфику поведения химических элементов в гидротермальных минералообразующих процессах в зависимости от физико-химических параметров. Авторы приводят обоснование преимущества использования коэффициентов сокристаллизации относительно традиционных коэффициентов распределения, представляемых в виде отношения содержания примеси в кристалле и в растворе.

Статья *Б.Б. Дамдинова с соавторами* [2023] связана с тематикой ремобилизации рудного вещества в эндогенных условиях и посвящена экспериментальному моделированию транспорта рудных компонентов щелочными водно-солевыми флюидами при температурах 500—680 °С в интервале давлений 1.5—5.0 кбар. При использовании в качестве исходных материалов океанического базальта, модельных гранитных смесей, сульфидов, оксидов, а также золота и платины установлено, что при 650—680 °С происходит интенсивный транспорт как петрологически значимых, так и рудных компонентов, а также кристаллизация сульфидных минералов совместно с полевыми шпатами, слюдами и кварцем. Полученные экспериментальные результаты применены для реконструкции генезиса Зун-Холбинского золото-кварц-сульфидного месторождения и процессов эпигенетических преобразований руд полиметаллического месторождения Озерное.

Работа *А.И. Непомнящих с соавторами* [2023] посвящена исследованиям высокочистых кварцитов Гарганского кварценосного района Восточного Саяна и в значительной степени относится к разделу

технической минералогии, объединяющей геолого-минералогические исследования и методы переработки минерального сырья с целью получения конечного продукта. Авторы изучили кварциты Ока-Урикского, Урда-Гарганского и Уренгенурского блоков Гарганского кварценосного района, а также проявления жильного кварца Анахчи-Чипикетского жильного поля Патомского нагорья. В работе представлены результаты детальных исследований кварцитов, включая оценку их структурно-текстурных характеристик, изучение минеральных и флюидных включений, а также определение химического состава. Авторами обоснована взаимосвязь изученных характеристик с возможностью обогащения кварцитов различного типа с целью получения кварцевых концентратов высокой и ультравысокой чистоты. Практическим результатом этих исследований стала разработка схем процессов получения и обогащения кварцевых концентратов.

Представленные в настоящем выпуске статьи естественно не охватывают все направления исследований, которые обсуждались на XVIII Российском совещании по экспериментальной минералогии в Иркутске. Тем не менее специальный выпуск демонстрирует совершенно новые результаты международного уровня в области экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии, а также определяет перспективы дальнейших исследований. Следует отметить, что в данном направлении на протяжении многих лет успешно функционирует Всероссийский ежегодный семинар по экспериментальной минералогии, петрологии и геохимии в Институте геохимии и аналитической химии им. В.И. Вернадского РАН, труды которого публикуются в журнале *Experiment in Geosciences* на сайте Института экспериментальной минералогии РАН.

Работа выполнена по государственному заданию ИГМ СО РАН (№ 122041400159-3) и ИГХ СО РАН (№ 0284-2021-0004).

ЛИТЕРАТУРА

Галимов Э.М., Уханов А.В. Природа карбонатного компонента кимберлитов // *Геохимия*, 1989, № 3, с. 337—348.

Горелова Л.А. Фазовые переходы в полевошпатовых минералах с топологией парацельзиана при высоких температурах и давлениях // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, doi: 10.15372/GiG2023108.

Дамдинов Б.Б., Котельников А.Р., Сук Н.И., Дамдинова Л.Б., Ахмеджанова Г.М. Экспериментальное моделирование транспорта рудных компонентов водно-солевыми флюидами при повышенных *P-T* параметрах // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, с. 1187—1204.

Непомнящих А.И., Федоров А.М., Жабоедов А.П., Волкова М.Г. Высокочистые кварциты Восточного Саяна // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, с. 1205—1215.

Пальянов Ю.Н., Баталева Ю.В., Борздов Ю.М., Куприянов И.Н., Нечаев Д.В. Экспериментальное моделирование мантийно-корового взаимодействия в системе металл—карбонат, условия кристаллизации и индикаторные характеристики алмаза // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, с. 1073—1094.

Персиков Э.С., Бухтияров П.Г., Аранович Л.Я., Шапошникова О.Ю., Некрасов А.Н. Экспериментальное исследование процесса взаимодействия водорода с магматическими расплавами в условиях земной коры // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, с. 1156—1170.

Реутский В.Н., Борздов Ю.М., Баталева Ю.В., Пальянов Ю.Н. Распределение изотопов углерода в результате металл-карбонатного взаимодействия при мантийных *P-T* параметрах // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, с. 1095—1105.

Сокол А.Г., Козьменко О.А., Крук А.Н., Нечепуренко С.Ф. Состав флюида в карбонат- и хлорсодержащем пелите вблизи второй критической точки: результаты экспериментов с применением методики алмазной ловушки // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, с. 1106—1120, doi: 10.15372/GiG2023105.

Таусон В.Л., Липко С.В., Смагунов Н.В., Бабкин Д.Н., Белозерова О.Ю. Коэффициенты распределения и сокристаллизации широкого круга типоморфных элементов в магнетите, гематите и сфалерите в гидротермальных системах // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, с. 1171—1186.

Шацкий А.Ф., Подбородников И.В., Арефьев А.И., Литасов К.Д. Система $\text{NaCl—CaCO}_3\text{—MgCO}_3$ при 3 ГПа: применение к мантийным солидусам // *Геология и геофизика*, 2023, т. 64, с. 1121—1140.

Horita J., Polyakov V.B. Carbon-bearing iron phases and the carbon isotope composition of the deep Earth // *PNAS*, 2015, v. 112 (1), p. 31—36.

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 // *PNAS*, 2013, v. 110 (51), p. 20408—20413.