МГУ имени М.В. Ломоносова

Кафедра петрологии и вулканологии

№ госрегистрации
АААА-А16-116033010117-0

УТВЕРЖДАЮ
Директор/декан
геологический факультет
_____ Ерофеев Н.Н.
«11» января 2023 г.

УДК

ОТЧЕТ
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

по теме:
Режимы петрогенеза внутренних геосфер Земли
(промежуточный)

Зам. директора/декана
по научной работе
_____
«10» января 2023 г.

Руководитель темы
Зиновьева Н.Г.
_____
«9» января 2023 г.

Москва 2022

СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:
заведующий лабораторией, доктор геолого-минералогических наук _____ (Зиновьева Н.Г.)

Исполнители темы:
старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук _____ (Алферьева Я.О.)
старший научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук _____ (Глазовская Л.И.)
старший научный сотрудник _____ (Кошлякова Н.Н.)
инженер 1-ой категории _____ (Пересецкая Е.В.)
ведущий научный сотрудник, доктор геолого-минералогических наук _____ (Сывороткин В.Л.)
ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, доцент/с.н.с. по специальности _____ (Щекина Т.И.)
ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук _____ (Щербаков В.Д.)
ведущий научный сотрудник, кандидат геолого-минералогических наук, доцент по кафедре _____ (Япаскурт В.О.)

РЕФЕРАТ

Ключевые слова:
дифференциация, флюиды, дегазация, ассимиляция, перидотиты, докембрий, петрология, гранитоиды, континентальная кора, гранулиты, минералы высоких давлений, метаморфизм, термодинамическое моделирование, магматизм, p-t тренды, термобарометрия
Ключевые слова по-английски:
metamorphism, petrology, peridotites, eclogites, assimilation processes, subduction

Научные исследования сотрудников кафедры петрологии и вулканологии посвящены комплексному изучению магматических, метаморфических и гидротермальных процессов, происходящих в разных геодинамических обстановках. Для решения этих задач проводилось детальное петрологическое изучение природного материала и экспериментальное и физико-химическое моделирование природных процессов, направленное на выявление условий формирования геологических систем. В 2022 году фундаментальные научные исследования в рамках госбюджетной темы проводились по следующим направлениям: 1). Изучение процессов генерации и эволюции силикатных расплавов в верхней мантии и коре; 2). Выявление особенностей химизма для оксосолей фумарольного происхождения (и их аналогов), образовавшихся в продуктах фумарольной активности действующих вулканов; 3). Изучение условий образования криолитсодержащих гранитов в Земной коре и процесса концентрирования в них редких и редкоземельных элементов (по экспериментальным данным); 4). Изучение контактово-реакционного взаимодействия между фторсодержащим гранитным расплавом и карбонатными породами; 5). Изучение простых и двойных молибдатов щелочных и редкоземельных элементов и их твердых растворов; 6). Изучение преобразования акцессорных минералов при ударном метаморфизме; 7). Комплексное изучение магматических, метаморфических и метасоматических пород для реконструкции условий их образования; 8). Оценка степени опасности действующих вулканов Южной Камчатки.

В ходе работ в рамках госбюджетной темы в 2022 году были получены следующие результаты: 1) изучение процессов генерации и эволюции силикатных расплавов в верхней мантии и коре, проведенные на основе петролого-геохимических данных, позволили выявить особенности происхождения и эволюции синколлизионных кислых магм, показать их возможную связь с исходным мантийным источником, ранее предполагавшуюся на основе численных геодинамических моделей; 2) исследования особенностей химизма оксосолей фумарольного происхождения (и их аналогов), образовавшихся в продуктах фумарольной активности действующих вулканов позволили получить новые данные о твердых растворах между минералами удинаит-арсеноудинаит и вагнерит-арсеновагнерит, открыть и детально охарактеризовать новые минеральные виды: арсенаты параберцелиит и хреновит, сульфат кальциолангбейнит-O, ванадаты плиниусит и резницкиит и новый минерал группы пироксена – рябчиковит. Был получен большой объем новой минералогической и кристаллохимической информации для оксосолей фумарольного происхождения; 3) итогом экспериментальных иссле-

дований системы Si-Al-Na-K-Li-F-O-H, проведенных в интервале температур от 400 до 1250°C и давлении 1-2 кбар., стало выявление в гранитной системе с литием и предельными содержаниями фтора области жидкостной несмесимости алюмосиликатного и солевого расплава и доказательство высокой степени концентрации редкоземельных элементов в пользу солевого расплава в интервале температур 800-500°C и давлении 1-2 кбар.; 4) изучение контактово-реакционного взаимодействия между фторсодержащим гранитным расплавом и карбонатными породами показало, что на границе кальцита и фторсодержащего гранитного расплава при 700 и 750˚C, 1 кбар и содержании воды в системе 10 мас.% происходит интенсивное взаимодействие, сопровождаемое перераспределением вещества и образованием новых фаз. Кроме кристаллических фаз в апокарбонатной части формируется Ca-Si-C-F фаза LCF, которая при параметрах эксперимента могла быть жидкостью. В этом случае, изученное контактово-реакционное взаимодействие приобретает черты процесса магматического замещения; 5) проведенные электронно-микроскопические исследования и электронно-зондовый микроанализ простых и двойных молибдатов щелочных и редкоземельных элементов и их твердых растворов, дали новую информацию для создания твердотельных лазеров и люминофоров для светодиодов белого свечения; 6) получены новые данные по петрологическим критериям наиболее высокотемпературных импактных расплавов для импактитов Логойской астроблемы. Фации расплава зювитов с зёрнами полностью гранулированного циркона соответствуют температуре расплава выше 2000ºС. Для кратера Жаманшин наиболее высокотемпературные расплавы формируют фацию тектитов (иргизитов), температура расплава которых выше 2500ºС. В Логойском кратере такие расплавы не сохранились, так как кратер был частично эродирован; 7) выявлены принципиальные критерии корреляции структурно-петрологических и композиционно-минералогических данных для корректного использования существующих методов минералогической термобарометрии и их сопряжения с данными структурно-парагенетического анализа и петроструктурных реконструкций для решения эволюционных геодинамических задач для полиметаморфических гранулитовых комплексов; 8) был исследован вопрос о степени опасности современных активных вулканов Южной Камчатки: Камбального и Ильинского, продолжающих к югу цепь вулканов Курильской островной дуги (КОД). Влк. Камбальный, извергавшийся 24 марта 2017 г., после 200-летнего «молчания», относится к К-типу и способен к наиболее опасным взрывным извержениям. В настоящее время эволюционный тренд на уровне андезитов, характер извержений - пепловые выбросы, т.е. есть еще значимый временной интервал до возможных в будущем опасных извержений плинианского или пелейского типов. Вулкан Ильинский пережил фазу взрывного извержения в 1901 г. с выбросом пемз дацитового состава с большим количеством алливалитовых включений. Проведенные исследования позволили заключить, что отнесение Паужетской вулкано-тектонической структуры к «супервулканам», аналогичным Йелоустонском «супервулкану», угрожающему взрывным извержением колоссальной силы, является досадным недоразумением.

ВВЕДЕНИЕ

Научные исследования сотрудников кафедры петрологии и вулканологии посвящены комплексному изучению магматических, метаморфических и гидротермальных процессов, происходящих в разных геодинамических обстановках. Для решения этих задач проводилось детальное петрологическое изучение природного материала и экспериментальное и физико-химическое моделирование природных процессов, направленное на выявление условий формирования геологических систем. В 2022 году фундаментальные научные исследования в рамках госбюджетной темы проводились по следующим направлениям: 1). Изучение процессов генерации и эволюции силикатных расплавов в верхней мантии и коре; 2). Выявление особенностей химизма для оксосолей фумарольного происхождения (и их аналогов), образовавшихся в продуктах фумарольной активности действующих вулканов; 3). Изучение условий образования криолитсодержащих гранитов в Земной коре и процесса концентрирования в них редких и редкоземельных элементов (по экспериментальным данным); 4). Изучение контактово-реакционного взаимодействия между фторсодержащим гранитным расплавом и карбонатными породами; 5). Изучение простых и двойных молибдатов щелочных и редкоземельных элементов и их твердых растворов; 6). Изучение преобразования акцессорных минералов при ударном метаморфизме; 7). Комплексное изучение магматических, метаморфических и метасоматических пород для реконструкции условий их образования; 8). Оценка степени опасности действующих вулканов Южной Камчатки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В ходе работ в рамках госбюджетной темы в 2022 году были получены следующие результаты:

1) Изучение процессов генерации и эволюции силикатных расплавов в верхней мантии и коре. Для коллизионных обстановок характерно широкое проявление кислого магматизма, проявленного в виде гранитных интрузий и их вулканических аналогов. Источником кислых магм может служить материал коры, подвергающийся анатексису, производные выплавляющихся в мантии магм основного состава или комбинация этих двух источников. Источник, возраст, геохимическая специфика и эволюция кислого магматизма коллизионных зон являются важными с точки зрения геодинамических реконструкций и потенциальной рудоносности. Вулканические процессы тесно связаны с развитием Земли, формированием Земной коры и образованием месторождений полезных ископаемых. Количественная оценка параметров системы обеспечивается решением аналитических задач для характеристики фазовых отношений, геохимического поведения элементов в совокупности с термодинамическим моделированием.

Коллектив ведет исследования в области изучения процессов генерации и эволюции силикатных расплавов в верхней мантии и коре уже длительное время. За это время накоплен значительный опыт во всестороннем петролого-геохимическом изучении вулканических горных – индикаторов процессов эволюции магм, включающий в себя методические наработки в области получения и обработки аналитических данных, работе с расплавными включениями и др. Фактическим материалом для исследований служит обширная коллекция вулканических пород от основного до кислого составов и мантийных и коровых ксенолитов Курило-Камчатской островной дуги и некоторых других регионов надсубдукционных и коллизионных обстановок.

В складчатом сооружении Большого Кавказа обнажены значительные объемы игнимбритов, лав и молодых гранитов плиоцен-плейстоценового возраста. Вулканическая история региона включает игнимбриты, связанные с Чегемской кальдерой (2.92 млн лет) и районами Тырныауза (1.98 млн лет) и Эльбруса (1.98 и 0.7 млн лет) и многочисленными молодыми лавовыми потоками Эльбруса. На основе петролого-геохимических данных и изотопного состава Hf и O, полученных для риолитовых игнимбритов Чегемской кальдеры, игнимбритов, риолитов, гранитов и лав районов Эльбруса и Тырныауза, мы исследовали происхождение и эволюцию молодого кислого магматизма Большого Кавказа. Игнимбриты Чегемской кальдеры (2.92 млн лет) и ранние игнимбриты района Эльбруса, с источником в районе Тырныауза (1.98 млн лет) представляют собой гомогенные биотитовые риолиты и характеризуются сходным валовым и минеральным составом, а также близкими соотношениями несовместимых элементов, что свидетельствует об их родственном происхождении. В то же время 0.7 млн лет игнимбриты Эльбруса в сравнении с ингимбритами Чегема имеют повышенные концентрации одновременно совместимых (Cr, Sr, Ca, Ni и др.) и несовместимых элементов (Cs, Rb, U), более высокие значения $\delta^{18}O$ (+9 и +7.8‰) и более низкое значение εHf (+0.5 и +3.5), что указывает на фракционирование магмы и ассимиляцию корового материала долгоживущим риолитовым магматическим резервуаром. Эльджуртинские граниты Тырныауза и ран-

ние игнимбриты района Эльбруса (1.98 млн лет) имеют идентичный состав породообразующих минералов, макро- и микрокомпонентный состав и один возраст, что свидетельствует о том, игнимбриты Эльбруса, вероятно, извергались из района современного Тырныауза, а Эльджуртинские граниты являются застывшим магматическим резервуаром, питавшим это извержение. Молодые игнимбриты Эльбруса (0.7 млн лет) и лавы представлены Bt-Amp-Opx дацитами, и минеральная ассоциация последующих дацитовых лав Эльбруса становится более мафической в сравнении с риолитами; состав и текстуры вкрапленников, поведение макро- и микроэлементов указывают гибридное происхождение лав в результате смешения риолитов с магмами более основного состава. Состав этих основных магм близок к трахиандезибазальтам, потоки которых обнажаются по периферии вулкана Эльбрус. Все изученные молодые вулканические породы характеризуется обеднением HSFE и обогащением LILE, Li, Pb, что подчеркивает тесную связь молодого кремнекислого магматизма с магмами надсубдукционной геохимической специфики. Важной геохимической особенностью является обогащение U до 8 ppm и Th до 35 ppm. Микроэлементный состав пород указывает на то, что исходная риолитовая магма игнимбритов Чегемской кальдеры сформировалась при ~ 80-90% фракционировании базальтов островодужной специфики. Изотопный состав O-Hf-Sr показывает, что коровые изотопные метки кислых вулканитов возникают за счет фертилизации перидотитов, продуцирующих родоначальные базальтовые магмы, субдуцированным осадочным материалом.

Таким образом, проведенные исследования на основе петролого-геохимических данных позволили выявить особенности происхождения и эволюции синколлизионных кислых магм, показать их возможную связь с исходным мантийным источником, ранее предполагавшуюся на основе численных геодинамических моделей

2) Выявление особенностей химизма для оксосолей фумарольного происхождения (и их аналогов), образовавшихся в продуктах фумарольной активности действующих вулканов. Толбачинские фумаролы являются наиболее продуктивной минералообразующей эксгаляционной системой в мире - здесь выявлено около 350 видов минералов, в том числе более 130 минералов, обнаруженных впервые. Цель настоящих исследований - подробная комплексная характеристика оксосолей, образующихся в результате природных газотранспортных процессов, связанных с фумарольными системами, а также аналогичных им техногенных систем. Исследование оксосолей эксгаляционного происхождения может ощутимо расширить геохимическое, кристаллохимическое и минералогическое знание. Предполагаемые исследования имеют практическую значимость с точки зрения природопользования и экологии. Фумарольные системы окислительного типа во многом являются аналогами типичных загрязнителей атмосферы в промышленных районах ТЭЦ на угле, горящих отвалов угледобывающих и металлургических предприятий. Эти системы близки по набору токсичных компонентов, способу их переноса, температурам и давлению, что позволяет применять полученные данные в экологическом аспекте.

Богатая эксгаляционная минерализация была открыта в отложениях фумарол вулкана Толбачик в 2012 году, в течение десяти лет исследований было открыто более 60 новых минералов, в том числе относящихся к широко распространенным структурным типам, например, пироксена, шпинели

или апатита. Были опубликованы обзоры впервые обнаруженной богатой и чрезвычайно специфической силикатной и арсенатной фумарольной минерализации. В рамках выполнения проекта на 2022 год было запланировано получение новой минералогической и кристаллохимической информации для оксосолей фумарольного происхождения и публикация полученных результатов.

Были обнаружены два новых изоструктурных минерала удинаит и арсенудинаит с общими формулами NaMg4(VO4)3 и NaMg4(AsO4)3. Оба минерала изоструктурны джеффбениту, пространственная группа, I-42d, Z = 4, a = 6,8011(2)/6,8022(1), c = 19,1839(12)/19,1843(6) Å и V = 887,35(7)/887,66(4) Å3, R1 = 0,0287/0,0119 (удинаит/арсенудинаит). Удинаит и арсенудинаит образуют изоморфный ряд, в котором содержания тетраэдрически координированных компонентов изменяются в пределах (в атомах на формулу): V 1,6–0,1; As 2,8–1,0; P 0,4–0,0. Впервые было установлено существование твердого раствора между изоструктурными магнезиальными арсенатом и фосфатом группы вагнерита. Наши данные показывают, что состав тетраэдрически координированных компонентов меняется в пределах (As0.98P0.01) – (P0.54As0.42V0.01). Изоморфизм в тетраэдрических позициях (P, As5+) у минералов группы вагнерита и родственных им соединений установлен впервые. Были описаны два новых минерала группы аллюодита: параберцелиит NaCaCaMg2(AsO4)3 и хреновит Na3Fe3+2(AsO4)3. Оба минерала моноклинные, пространственная группа C2/c, параберцелиит обладает параметрами ячейки a = 12,3143(7), b = 13,0679(5), c = 6,7717(4) Å, β = 113,657(7)°, V = 998,14(10) Å3, Z = 4, R = 0,0349, а хреновит a = 12,2394(7), b = 12,7967(5), c = 6,6589(4) Å, β = 112,953(7)°, V = 960,37(10) Å3, Z = 4. Название параберцелиит отражает диморфизм этого минерала с арсенатом надгруппы граната берцелитом. Хреновит назван в честь российского вулканолога и геолога Анатолия Петровича Хренова (1946–2016). Впервые описана ромбическая модификация кальциолангбейнита K2Ca2(SO4)3. Кальциолангбейнит-O является первым природным ромбическим лангбейнитоподобным сульфатом. Параметры элементарной ячейки кальциолангбейнита-O: a = 10,3330(2), b = 10,5027(2), c = 10,1763(2) Å, V = 1104,37(4) Å3, Z = 4; пространственная группа P212121. Был описан новый минерал группы апатита, плиниусит Ca5(VO4)3F. Плиниусит вместе с фторапатитом и свабитом образует новую тройную систему твердых растворов, характеризующуюся широкими вариациями T5+ = P, As и V. Плиниусит кристаллизуется в пространственной группе P63/m, a = 9,5777(7), c = 6,9659(5) Å, V = 553,39(7) Å3 и Z = 2, R = 0,0254. Минерал был назван в честь известного римского натуралиста Плиния Старшего, урожденного Гая Плиния Секунда (23–79 гг. н. э.). Предполагается, что сочетание высокой температуры, низкого давления и высокой летучести кислорода способствует включению V5+ в соединения типа апатита. Впервые описан резницкиит CaMg(VO4)F, первый ванадат со структурой типа титанита. Резницкиит моноклинный, пространственная группа C2/c, a = 6,6912(7), b = 8,9395(7), c = 7,0587(8) Å, β = 113,078(13)°, V = 388,43(8) Å3 и Z = 4. Минерал назван в честь выдающегося русского минералога Леонида Зиновьевича Резницкого (1938 г.р.), внесшего значительный вклад в минералогию ванадия. Рябчиковит CuMg(Si2O6), новый минерал группы пироксена также обнаружен в фумарольных отложениях. Рябчиковит является Cu,Mg-упорядоченным аналогом клиноэнстатита, он кристаллизуется в пространственной группе P21/c и имеет следующие па-

раметры элементарной ячейки: a = 9,731(9), b = 8,929(8), c = 5,221(4) Å, β = 110,00(6)°, V = 426.3(7) Å3, Z = 4. Рябчиковит назван в честь выдающегося российского геохимика и петролога Игоря Дмитриевича Рябчикова (1937–2017). Наши исследования показывают, что медные аналоги породообразующих минералов могут образовываться в фумарольных системах. Причем для их кристаллизации не требуются высокие температуры или / и давления (ниже 500 ºС / Па).

Таким образом, все поставленные на 2022 год задачи были успешно выполнены. В рамках выполнения проекта получен большой объем новой минералогической и кристаллохимической информации для оксосолей фумарольного происхождения, а именно арсенатов, фосфатов, ванадатов, сульфатов и силикатов. Все полученные данные опубликованы.

3) Изучение условий образования криолитсодержащих гранитов в Земной коре и процесса концентрирования в них редких и редкоземельных элементов (по экспериментальным данным. Проблеме происхождения редкометальных гранитов посвящена обширная литература. Однако нельзя считать ее окончательно решенной, поскольку в ней существует ряд вопросов, требующих особого подхода и экспериментального подтверждения. Большинство типов редкометальных гранитов и связанных с ними пегматитов характеризуется повышенной концентрацией фтора и лития по сравнению с другими типами гранитов. Фтор является одним из важнейших (после воды) компонентов газовой фазы природных гранитных расплавов, а литий, наряду с натрием и калием, – одним из главных представителей щелочных компонентов этих расплавов. Оба элемента (F и Li) образуют собственные минералы или изоморфно входят в состав силикатов, оксидов, фосфатов, карбонатов или фторидов в гранитах, пегматитах. Общепризнанным фактом считается, что литий-фтористые и щелочные редкометальные граниты образуются в результате глубокой дифференциации гранитной магмы крупных гранитных массивов, составляя лишь небольшую часть их объема. Именно эти породы являются источниками рудного вещества. Актуальность проблемы заключена в необходимости поиска пород, содержащих рудные концентрации редких элементов, их места и времени образования в пределах крупных гранитных массивов. В частности, это касается проблемы концентрирования редкоземельных элементов в тех или иных фазах гранитов. Как правило, они являются их самыми поздними дифференциатами, из которых формируются более мелкие тела редкометальных, в том числе, криолитсодержащих гранитов. Экспериментальные исследования фазового состава флюидно-магматических систем гранитного состава, предпринятые в настоящей работе, должны помочь в решении вопросов о времени и месте формирования фаз, образующихся на поздних этапах дифференциации гранитов, выявлении условий их образования и способности концентрировать редкие элементы. При проведении экспериментальных работ планировалось выявить фазу, способную концентрировать редкоземельные элементы, выяснить условия ее существования в рамках гранитной системы и определить поведение химических элементов по отношению к фазам системы.

Итогом экспериментальных работ стало выявление в гранитной системе с литием и предельными содержаниями фтора области жидкостной несмесимости алюмосиликатного и солевого расплава и доказательство высокой степени концентрации редкоземельных элементов в пользу солевого рас-

плава в интервале температур 800-500°С и давлении 1-2 кбар. В качестве научного задела нужно считать опубликованный по данной теме материал авторами; образцы экспериментальных образцов, полученные и требующие изучения; экспериментальная и аналитическая база кафедры петрологии и вулканологии и геологического факультета МГУ и ИЭМ РАН (г.Черноголовка); каменный материал, собранный автором отчета и предоставленный музеем ВИМСа. Авторами отчета осуществлялось научное и научно-техническое сотрудничество с кафедрой геохимии геологического факультета МГУ, Институтом геохимии и аналитической химии РАН им. В.И.Вернадского, Институтом экспериментальной минералогии РАН им. Д.С.Коржинского, Институтом проблем технологии микроэлектроники и особочистых материалов РАН.

Работа основана на результатах экспериментов, полученных при изучении гранитной силикатно-солевой системы системы Si-Al-Na-K-Li-F-H-O, насыщенной водой, с предельными содержаниями фтора и концентрациями лития 1-1,5 мас.% при температурах 500-1250°С и давлении 1 кбар. Часть экспериментов была проведена при давлениях 2, 3 и 5 кбар. Система является модельной для наиболее дифференцированных гранитных расплавов, из которых в природе образуются щелочные граниты, онгониты, эльваны, криолит-содержащие и Li-F- граниты, их пегматиты и связанные со всеми этими породами редкометальные месторождения. Эксперименты проводились с подходом к равновесию с двух сторон - высоких и низких температур. Показано, что при 800°С в системе возникает несмесимость алюмосиликатного и алюмофторидного расплавов, и каждый из расплавов проходит свой путь кристаллизации при понижении температуры. Из алюмосиликатного расплава кристаллизуются кварц, щелочной полевой шпат, полилитионит, и два состава криолита – существенно натриевый и натриево-калиевый. Часть алюмосиликатного стекла остается в жидком метастабильном состоянии вплоть до температуры 400° С. Из солевого расплава выделяется натриевый криолит и вплоть до температуры 400° С сохраняется остаточный солевой расплав, обогащенный F, Li и редкоземельными элементами. Показано, что F и Li обуславливают обогащение гранитного расплава редкими элементами и играют важную роль в формировании их концентраций в Земной коре.

Таким образом, в результате проведенных исследований было экспериментально доказано, что в гранитных расплавах с предельными содержаниями фтора более 3 масс. % и лития более 1 масс.% при 800^{o}С возникают явления жидкостной несмесимости, в результате которых происходит отделение солевого расплава от алюмосиликатного. При охлаждении из алюмосиликатных расплавов кристаллизуются кварц, полевые шпаты, лепидолит и полилитионит, из сосуществующих солевых расплавов - алюмофториды Na, K - криолит, эльпасолит и фториды Li -криолитионит, симмонсит, грайсит. Повышение давления от 1 до 5 кбар приводит к понижению коэффициентов разделения лития между солевым и алюмосиликатным расплавами в 2-4 раза. При насыщении гранитной системы водой проявляется та же тенденция. При дифференциации гранитных расплавов в природе возможно накопление F и Li, которое приведет к образованию и отделению солевых расплавов от алюмосиликатных. Из таких магм возможна кристаллизация криолит-содержащих гранитов и пегматитов. Магмы могут иметь как агпаитовый, так и плюмазитовый состав. Была экспериментально доказана способность

фторидных литийсодержащих солевых расплавов концентрировать редкие редкоземельные элементы, что позволяет предположить важную роль этих расплавов при формировании редкометально-редкоземельных месторождений.

4) Изучение контактово-реакционного взаимодействия между фторсодержащим гранитным расплавом и карбонатными породами. В процессе кристаллизационной дифференциации магматических систем в остаточном силикатном расплаве растет концентрация компонентов, которые не входят в структуры породообразующих минералов. В кварцнормативных системах к числу таких несовместимых компонентов относятся многие редкие металлы, редкоземельные элементы и некоторые летучие. Хорошо известным продуктом кристаллизации таких остаточных расплавов являются топазсодержащие альбит-амазонитовые граниты. В природе возможны условия, при которых богатые несовместимыми компонентами остаточные силикатные расплавы контактируют с вмещающими карбонатными породами. Данная работа направлена на экспериментальное моделирование диффузионного контактово-реакционного взаимодействия глубоко дифференцированного богатого фтором кварцнормативного силикатного расплава и кальцита. Параметры экспериментов соответствуют субликвидусным условиям фторсодержащего гранитного расплава. Актуальность проблемы определяется необходимостью изучения параметров образования скарновых редкометальных месторождений.

При параметрах субликвидуса гранитной системы проводилось экспериментальное моделирование взаимодействия фторсодержащих гранитных расплавов и кальцита как одного из главных минералов осадочных карбонатных пород. Был получен состав зон колонки взаимодействия модельной фторсодержащей гранитной системы и кальцита при 700-750 град.С и 1 кбар и разном содержании фтора в исходном расплаве. Показана существенная зависимость фазового состава от исходного количества фтора в силикатном расплаве и возможность переноса W и Mo из силикатного расплава в карбонатную породу. В результате экспериментов с исходным содержанием фтора 1 и 6 масс. % и карбонатная, и силикатная части образцов претерпевают значительные изменения. В апокарбонатной части образуется зональность. Границы между зонами резкие. При низком исходном содержании фтора наиболее измененная приконтактовая область сложена кальцитом и гранатом гроссулярового состава. При удалении от контакта гранат исчезает, появляется кварц, потом волластонит и куспидин. Затем кварц исчезает. Вместо него появляется новая фаза (LCF), для которой характерно примерно одинаковое массовое количество кальция, кремния, кислорода и фтора. Приконтактовая область силикатной части состоит из стекла (около 30%), кварца (5%) и кристаллов полевых шпатов (65%). Силикатная часть образца, не подверженная взаимодействию с кальцитом, при таких параметрах состоит только из расплава. При увеличении количества фтора в общих чертах зональность сохраняется. Существенной отличительной особенностью является появление на фронте замещения флюорита. Силикатная часть образца плохо сцементирова. Вероятно, в ней почти отсутствует стекло. По предварительным данным кристаллические фазы представлены плагиоклазом, щелочным полевым шпатом и пироксеном. В исходные составы силикатной части образцов в виде оксидов вволились W и Mo. В приконтактовой области апокарбонатной части полученных обрацов обнаружены

многочисленные зерна молибдошеелита.

Таким образом, на границе кальцита и фторсодержащего гранитного расплава при заданных параметрах эксперимента происходит интенсивное взаимодействие, сопровождаемое перераспределением вещества и образованием новых фаз. Кроме кристаллических фаз в апокарбонатной части формируется Ca-Si-C-F фаза LCF, которая при параметрах эксперимента могла быть жидкостью. В этом случае, изученное контактово-реакционное взаимодействие приобретает черты процесса магматического замещения.

Эксперименты проводились на установках высокого давления в институте экспериментальной минералогии РАН в г. Черноголовка Московской области.

5) Изучение простых и двойных молибдатов щелочных и редкоземельных элементов и их твердых растворов. Совместно кафедрой кристаллографии и кристаллохимии геологического факультета МГУ и Институтом общей физики им. А.М. Прохорова РАН были исследованы твердые растворы NaGd(MoO4)2 – Gd2(MoO4)3. В серии монокристаллов натрий-гадолиниевых молибдатов, выращенных из расплава методом Чохральского, рентгеноспектральным электронно-зондовым микроанализом было определено содержание всех матричных элементов, включая кислород. Состав исходной шихты менялся от Na0,600Gd0,467MoO4 до Na0,2Gd0,6MoO4. Все кристаллы натрий-гадолиниевых молибдатов, включая кристаллы, выращенные из стехиометрической шихты, нестехиометричны и содержат дефицит молибдена в среднем около 3%. Определен конгруэнтно плавящийся состав натрий-гадолиниевых молибдатов. Для кристаллов, выращенных из расплава стехиометрического состава, содержание катионных вакансий в подрешетке (Gd + Na) близко к нулю, а состав кристалла отличается от исходного расплава. С увеличением избытка Gd содержание катионных вакансий в подрешетке (Gd + Na) увеличивается до 10%. Было обнаружено, что катионодефицитные кристаллы натрий-гадолиниевых молибдатов также являются анионодефицитными. Концентрация кислородных вакансий в кристаллах, выращенных даже в условиях низкого парциального давления кислорода из шихты стехиометрического состава, не превышает 0,5 % кислородных позиций. В то время, как при значительном возрастании доли гадолиния в твердом растворе концентрация кислородных вакансий увеличивается до 5 %. Проведенные исследования восполнили существенных пробел в изучении свойств этих систем и дали возможность обсуждать механизмы образования катионных и анионных вакансий в кристаллах натрий-гадолиниевых молибдатов. Электронно-зондовой микроанализ простых и двойных молибдатов щелочных и редкоземельных элементов и их твердых растворов дал новую информацию для создания твердотельных лазеров и люминофоров для светодиодов белого свечения.

6) Изучение преобразования акцессорных минералов при ударном метаморфизме. Проведено изучение петрологических признаков наиболее высокотемпературных преобразований импактитов (на примере Логойской астроблемы и кратера Жаманшин), а также преобразований акцессорных минералов при ударном метаморфизме. Образование импактитов происходит при высоких давлениях до 90 GPa и температурах до 2500oC (установленной при изучении процессов испарения в импактитах Логойского кратера). Изучение преобразования пород при ударном метаморфизме позволяет реконструировать условия их формирования и оценить особенности пре-

образования минералов при изменении PT условий ударного метаморфизма. К настоящему времени в импактитах Логойской астроблемы нами была установлена высоплотная модификация циркона-рейдит, имеющая структуру шеелита. А также были выявлены разные типы гранулярных структур циркона в импактитах Логойской астроблемы.

Изучение петрологических критериев наиболее высокотемпературных преобразований импактитов и преобразований высокобарных фаз в импактитах дает возможность реконструировать условий образования ударно метаморфизованных пород. Изучение фазовых превращений (плавления, парообразования, переход минералов в высокоплотные модификации), текстурные изменения пород, образование планарных дислокаций в минералах, дает возможность уточнить критерии выделения импактитов, важных и в связи с открытием новых структур на Земле и с развитием космической петрологии. Петрологические признаки преобразования минералов и их высокобарных модификаций в условиях высоких давлений и температур при ударном метаморфизме могут быть использованы и при изучении земных пород, сформировавшихся в условиях высокого давления

Импактное преобразование циркона в зювитах Логойской структуры сводится к его переходу в высокоплотную модификацию - рейдит (микрорамановская спектроскопия и EBSD data), образованию планарных элементов и диаплектового стекла (EBSD data), термическому разложению циркона на бадделеит и SiO2 и образованию в них гранулярных текстур. Методы EBSD картирования позволили не только установить морфологию рейдита в сростках с цирконом, но и выявить «бывший» рейдит, то есть рейдит, перешедший обратно в циркон (переход происходит при температуре 1200ºC). Электронно-микроскопическое и микрозондовое изучение позволило выявить полностью гранулированные цирконы. Сравнение с экспериментальными данными дало возможность установить, что температура таких преобразований была выше 2000ºC. Образование гранулярных текстур в цирконе со скелетным ростом зёрен аналогично преобразованию циркона в высокотемпературных (выше 2500ºC) порциях импактного расплава, образовавшего тектиты. Было продолжено изучение зерен циркона, в которых найдены каймы пористого вещества цирконового состава, изучены образцы аллогенных, аутигенных брекчий и гранито- гнейсов мишени, что подтвердило. образование такой каймы, как результат гидротермальных изменений в до импактный период. С использованием полученных результатов была представлена статья в «Meteoritics&Planetary Science», которая находится в стадии исправления замечаний рецензентов. Сделан доклад на международной конференции.

Таким образом, были получены новые данные по петрологическим критериям наиболее высокотемпературных импактных расплавов для импактитов Логойской астроблемы. Фации расплава зювитов с зёрнами полностью гранулированного циркона соответствуют температуре расплава выше 2000ºC. Для кратера Жаманшин наиболее высокотемпературные расплавы формируют фацию тектитов (иргизитов), температура расплава которых выше 2500ºC. В Логойском кратере такие расплавы не сохранились, так как кратер был частично эродирован.

7) Комплексное изучение магматических, метаморфических и метасоматических пород для реконструкции условий их образования. Для проведения данных исследований была разработана методика структурно-

петрологического изучения алюмосиликатных пород полиметаморфических гранулитовых комплексов с целью выявления корреляции физико-химических режимов метаморфизма с этапами тектонических деформаций и магмогенерацией. В петрологических исследования метаморфических комплексов особое место занимают реконструкции физико-химических условий и их эволюции методами минералогической термобарометрии. Наиболее информативными для их приложения являются алюмосиликатные породы метапелитовой и метабазитовой петрохимических групп. Причём особый интерес для выявления эволюционной направленности физико-химических параметров представляют полифациальные породы, содержащие два или более последовательно сменявших друг друга минеральных парагенезисов. Их текстурные особенности позволяют коррелировать термодинамические реконструкции с тектоническими событиями, а структурные взаимоотношения дают возможность определить направленность эволюционного тренда. Целью проведенных исследований было выявление критериев корреляции структурно-петрологических и композиционно-минералогических данных для корректного сопряжения методов структурно-парагенетического анализа, минералогической термобарометрии и петроструктурных реконструкций для решения эволюционных геодинамических задач для полиметаморфических гранулитовых комплексов.

В основе разработки темы лежит четвертьвековой опыт автора по практическому приложению методов минералогической термобарометрии к исследованию эклогитовых и гранулитовых метаморфических комплексов земной коры (под руководством Л.Л.Перчука и в соавторстве с А.Л.Перчуком, О.Г.Сафоновым и др.) Непосредственным заделом являются результаты НИР автора, полученные в 2021 году и изложенные в соответствующем годовом отчёте НИР.

К настоящему времени оформились два принципиальных подхода к термодинамическому анализу минеральных равновесий в метаморфических горных породах: метод фазового соответствия на основе анализа локальных минеральных равновесий, основанный на фундаментальных трудах академика Д.С.Коржинского и активно развивавшийся профессором Л.Л.Перчуком и его учениками; и метод «псевдосекций», предполагающий моделирование минеральных равновесий для конкретного валового состава системы. Метод анализа локальных минеральных равновесий предполагает выбор для термодинамических расчётов сосуществующих составов минеральных фаз. Обычно предполагается, что составы непосредственно контактирующих участков минеральных зёрен априори достигали равновесия. Исключением из этого правила могут быть случаи наиболее низкотемпературных преобразований регрессивной стадии метаморфизма, когда наложенные минеральные агрегаты замещают индивиды предшествующих парагенезисов по прожилкам, либо выполняют трещины хрупкой деформации в них. Для полифациальных пород и парагенетических ассоциаций с химической неоднородностью минералов построение эволюционных трендов по методу анализа локальных минеральных равновесий требует объективных критериев выбора сингенетичных составов минеральных фаз. Великолепный пример корректного решения задачи фазового соответствия представляют работы В.Герасимова, посвящённые экспериментальным и петрологическим исследованиям обменных равновесий между минералами переменного состава (гранатом и биотитом, гранатом и кордиеритом) посредством

анализа формирующейся на их границах диффузионной зональности.

Анализ фазового соответствия для реакционных структур и агрегатов с ростовой химической зональностью минеральных индивидов представляется наиболее сложным, особенно в тех случаях, когда сосуществующие минералы образуют контрастные структурные элементы (например, сочетающие порфирокластические формы с лепидо-гранобластовыми или пойкилобластовыми элементами). Для таких случаев нами были сформулированы 4 критерия, выполнение которых гарантирует корректное приложение метода фазового соответствия к составам внутренних зон (ядер) сосуществующих кристаллических зёрен: 1) минералы-реагенты изначально были химически гомогенными, а их химическая зональность возникла в процессе протекания твердофазовой реакции по мере роста продуктов реакции; 2) минералы-продукты реакции кристаллизовались в участках, не затронутых изменениями за счёт промежуточных или конкурирующих реакций; 3) процесс роста нового минерала был результатом перманентной эволюции системы по отношению к образованию предшествующего парагенезиса; 4) влияние кинетических эффектов переступания через равновесие на составы реагентов и продуктов реакции пренебрежимо малы.

Альтернативный метод построения псевдосекций получил наибольшую популярность в последние десятилетия. Неоспоримым достоинством этого метода, основанного на системе взаимосогласованных баз термодинамических данных, является его универсальность. Однако использование валового состава породы для расчёта возможных минеральных равновесий в широком диапазоне вариации интенсивных параметров накладывает ряд ограничений на возможности практического приложения такого способа реконструкции условий метаморфизма полифациальных пород. Собственно говоря, корректное использование этого метода возможно только в двух случаях: 1) термодинамическое равновесие, сформировавшее данный минеральный парагенезис, достигалось во всём объёме породы; 2) валовые составы участков породы, в которых достигались локальные равновесия, отвечают валовому составу всей породы. Первый вариант отвечает случаю, когда порода сложена одним единственным минеральным парагенезисом. Такие породы идеальны для применения метода псведосекций, однако малоинформативны для изучения эволюции параметров метаморфизма. Второй вариант часто реализуется на регрессивной стадии метаморфизма, когда минеральные преобразования на фоне снижения температуры локализуются в местах миграции флюидных компонентов, но преобладающий инфильтрационный механизм транспортировки химических компонентов обеспечивает участие в минеральных реакциях всех фаз ранних парагенезисов.

Однако в большинстве полифациальных метаморфитов химические составы реакционных зон могут заметно отличаться от валового химического состава пород. В качестве иллюстрации этого эффекта приведём типичные примеры, ранее описанные в публикациях автора. Начнём с тектонитов в которых лепидо-гранобластовая матрица подвергается интенсивной перекристаллизации, сопровождаемой тотальным развитием минеральных парагенезисов, отвечающих условиям кристалл-пластических деформаций, тогда как кристаллокласты граната почти не вовлекаются в эти процессы, сохраняя реликтовые составы. Примером таких пород могут служить бластомилониты зон сдвиговых пластических деформаций гранулитового пояса Лимпопо, описанные нами в публикация с О.Г.Сафоновым и соавтора-

ми. Похожие случаи «изъятия» одного из минералов из состава термодинамической системы минералообразования можно наблюдать и на порогрессивной стадии метаморфических преобразований. Например, в породах метабазитового состава при эволюционных изменениях от зеленосланцевой до эклогитовой фаций метаморфизма, продуктом последовательно сменяющих друг друга твердофазовых реакций является гранат. Последовательное исчезновение из минеральных парагенезисов хлорита, клиноцоизита, роговой обманки неизменно сопровождается выделениями новых порций этого минерала. Исключительная склонность граната к образованию порфиробластический зёрен приводит к тому, что каждый раз при переходе от одной минеральной фации к другой новообразованные составы граната используют ранее сформированные кристаллы этого минерала в качестве затравки. При этом очередная зона, нарастающая на поверхность порфиробласта, блокирует их ядра от реакционного взаимодействия с матрицей породы, а минимальные (в сравнении с другими силикатам) коэффициенты внутрикристаллической диффузии изоморфных элементов препятствуют диффузионному переуравновешиванию составов ростовых зон. В итоге формируются полифациальные порфирообласты с резкой химической гетерогенностью. Составы каждой следующей ростовой зоны такого порфирообласта будут парагенны с сосуществующими минералами матрикса, однако более древние ядра будут исключены из этой физико-химической системы. Понятно, что её валовый состав будет заметно отличаться от валового состава породы. Причём это отличие будет возрастать при переходе к каждой следующей фации. Такая картина типична для метаморфогенных эклогитов умеренных температур (до 700 – 750 градусов С) и неоднократно описывалась нами в работах с Л.Л.Перчуком, А.Л.Перчуком и другими коллегами на примере эклогитов горы Сулу-Тюбе Кокчетавского комплекса в Северном Казахстане и пород комплекса Юкон-Тана в Канаде. Аналогичные примеры отклонения химизма физико-химической системы твердофазового минералообразования от валового состава породы можно наблюдать и у метапелитах с полифациальными орфирообластами граната, например, как в описанных нами в соавторстве с Т.А.Кулюкиной и П.Л.Тихомировым двуслюдяных сланцах Чукотки.

В отличие от фаций низко- и среднетемпературного метаморфизма, в условиях гранулитовой фации экспоненциальный рост скорости внутрикристаллической диффузии компонентов обычно приводит к гомогенизации составов полифациальных порфирообластов. Благодаря этому применение метода псевдосекций для расчёта pT-условий возникновения гранулитовых парагенезисов с использованием валового состава пород обычно не вызывает вопросов.

Итак, мы можем сформулировать важнейшие петроструктурные критерии, ограничивающие корректное использование метода построения псевдосекций. На несоответствие химического состава системы минералообразования валовому составу породы будут указывать: 1) в продуктах метаморфизма низких и умеренных температур - наличие полифациальных порфирообластов граната, сохранивших ростовую химическую гетерогенность; 2) в бластомилонитах - наличие порфирокластов граната; 3) в продуктах низкоградных регрессивных преобразований – локализация минеральных реакций в объёмах, сопоставимых с размерами минеральных зёрен и/или порфирообластов.

Анализ структурного контроля минеральных равновесий позволил сформулировать основные принципы применения методов минералогической термобарометрии для исследования полифациальных метаморфических комплексов. Так, моделирование псевдосекций на основе валового состава пород целесообразно для гранулитовых парагенезисов. Наличие в породах кристаллокластов или полифациальных порфиробластов граната, а также структурных признаков локализации минеральных реакций в объёмах, сопоставимых с размерами минеральных зёрен и порфиробластов предшествующих парагенезисов, является показанием к применению методов фазового соответствия, основанных на анализе локальных равновесий в минеральных системах. Сформулированные критерии выявления сингенетичных составов химически гетерогенных и структурно неравнозначных минеральных индивидов позволят максимально корректно реконструировать эволюционные тренды метаморфизма в этих случаях. В дальнейшем разработанные принципы планируется применить для комплексного петрологического анализа полифациального и полиметаморфического гранулитового комплекса Лимпопо, являющегося, по меткому выражению профессора Л.Л.Перчука, уникальной природной лабораторией.

8) Оценка степени опасности действующих вулканов Южной Камчатки. Актуальность проблемы определяется резким усилением вулканической активности камчатских вулканов в начале XX1 века и, соответственно, необходимостью выявить наиболее опасные для Человека действующие вулканы Южной Камчатки. Предлагалось продолжить исследование опасности вулканических извержений Курило-Камчатской дуги начатое в 2021 г., затронувшее только вулканы Курильской гряды. В 2022 г. предполагалось изучить вулканоопасность Южной Камчатки, где активными в настоящее время являются 10-12 вулканов, вытянувшиеся в цепь с юга (влк. Камбальный) на север (влк. Вилючик) на 200 км, продолжая, таким образом, цепь вулканов Курильской островной дуги (КОД). Предполагалось для оценки вулканоопасности камчатских вулканов применить критерии, разработанные нами ранее для вулканов КОД и использованные в 2021 г. А именно: близость к населенным пунктам; тектоническое положение, определяющее степень проницаемости и окисленности глубинных флюидов и, в конечном итоге, способность к взрывным (плинианский тип) извержениям или извержениям пелейского типа («палящие тучи»), против которых Человек бессилен. Главное, - ступень петрохимической эволюции вулканической серии, определяющей временные параметры финальных взрывов постройки. Взрывы происходят при опустошении периферического очага, когда кремнекислотность магмы достигает 61-62%. Это сигнал об опасности. Предполагалось назвать самые опасные для Человека вулканы Южной Камчатки с обоснованием этого вывода.

В планы работ по заданной теме пришлось внести некоторые изменения. В последние годы появились работы, относящие Паужетскую вулкано-тектоническую структуру к «супервулканам» (по аналогии с Йелоустонской структурой) якобы способным к взрывным извержениям колоссальной силы. Таким образом, в самом начале исследования мы столкнулись с точкой зрения на исключительную опасность не просто современных вулканов Камбального и Ильинского, а всей Паужетской структуры. Пришлось исследовать и этот вопрос. Основой для этого исследования послужили результаты собственных полевых работ на Паужетской вулкано-тектонической

структуре 1987 – 1991 гг. Действительно, Паужетская структура является ареной длительной и очень активной эндогенной деятельности, в первую очередь, вулканической. Но вулканизм этот был длителен во времени, принадлежал к различным типам по характеру извержений и по составу вулканических продуктов: площадные излияния платобазальтов, площадные излияния риолитовых пемз с небольшими приповерхностными аппаратами, взрывные извержения дацитовых пемз на вулкане Ильинском. Активный вынос большого количества вулканического материала привел к проседанию Паужетской структуры. К потенциальному взрыву структуры такого масштаб не способны принципиально. Вулкан Ильинский в 1901 г. пережил фазу финального взрыва на дацитовом уровне эволюции магмы. Впереди извержения базальтового состава, т.е. начало новой фазы эволюции вулкана. Взрывом и палящими тучами он угрожать не должен. Да и значимых поселений в его окрестностях нет, за исключением научной базы ТИНРО на противоположном берегу Курильского острова.

Вулканическая серия вулкана Камбальный, судя по составу пепловых извержений 24 марта 2017 года, эволюционировала до уровня 58% по SiO2, хотя в составе пробы, взятой в 9-и километрах от вулкана, возможно присутствие чужеродного материала? Тем не менее, о скором взрыве постройки пока говорить не приходится. Эволюционный тренд должен «созреть» до 61-62% SiO2.

Таким образом, был исследован вопрос о степени опасности современных активных вулканов Южной Камчатки: Камбального и Ильинского, продолжающих к югу цепь вулканов Курильской островной дуги (КОД). Влк. Камбальный, извергался 24 марта 2017 г., после 200-летнего «молчания». Он относится к К-типу, способен к наиболее опасным взрывным извержениям. В настоящее время эволюционный тренд на уровне андезитов, характер извержений - пепловые выбросы, т.е. есть еще значимый временной интервал до возможных в будущем опасных извержений плинианского или пелейского типов. Вулкан Ильинский пережил фазу взрывного извержения в 1901 г. с выбросом пемз дацитового состава с большим количеством аллювалитовых включений. Проведенные исследования позволили заключить, что отнесение Паужетской вулкано-тектонической структуры к «супервулканам», аналогичным Йелоустонском «супервулкану», угрожающему взрывным извержением колоссальной силы, является досадным недоразумением.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Отчет научных сотрудников кафедры петрологии и вулканологии полностью соответствует ТЕХНИЧЕСКОМУ ЗАДАНИЮ по теме НИР «Режимы петрогенеза внутренних геосфер Земли» на 2022 г. В ходе работ в рамках госбюджетной темы в 2022 году были получены следующие результаты: 1) изучение процессов генерации и эволюции силикатных расплавов в верхней мантии и коре, проведенные на основе петролого-геохимических данных, позволили выявить особенности происхождения и эволюции синколлизионных кислых магм, показать их возможную связь с исходным мантийным источником, ранее предполагавшуюся на основе численных геодинамических моделей; 2) исследования особенностей химизма оксосолей фумарольного происхождения (и их аналогов), образовавшихся в продуктах фумарольной активности действующих вулканов позволили получить новые данные о твердых растворах между минералами удинаит-арсеноудинаит и вагнерит-арсеновагнерит, открыть и детально охарактеризовать новые минеральные виды: арсенаты параберцелиит и хреновит, сульфат кальциолангбейнит-O, ванадаты плиниусит и резницкиит и новый минерал группы пироксена – рябчиковит. Был получен большой объем новой минералогической и кристаллохимической информации для оксосолей фумарольного происхождения; 3) итогом экспериментальных исследований системы Si-Al-Na-K-Li-F-O-H, проведенных в интервале температур от 400 до 1250°C и давлении 1-2 кбар., стало выявление в гранитной системе с литием и предельными содержаниями фтора области жидкостной несмесимости алюмосиликатного и солевого расплава и доказательство высокой степени концентрации редкоземельных элементов в пользу солевого расплава в интервале температур 800-500°C и давлении 1-2 кбар.; 4) изучение контактово-реакционного взаимодействия между фторсодержащим гранитным расплавом и карбонатными породами показало, что на границе кальцита и фторсодержащего гранитного расплава при 700 и 750˚C, 1 кбар и содержании воды в системе 10 мас.% происходит интенсивное взаимодействие, сопровождаемое перераспределением вещества и образованием новых фаз. Кроме кристаллических фаз в апокарбонатной части формируется Ca-Si-C-F фаза LCF, которая при параметрах эксперимента могла быть жидкостью. В этом случае, изученное контактово-реакционное взаимодействие приобретает черты процесса магматического замещения; 5) проведенные электронно-микроскопические исследования и электронно-зондовый микроанализ простых и двойных молибдатов щелочных и редкоземельных элементов и их твердых растворов, дали новую информацию для создания твердотельных лазеров и люминофоров для светодиодов белого свечения; 6) получены новые данные по петрологическим критериям наиболее высокотемпературных импактных расплавов для импактитов Логойской астроблемы. Фации расплава зювитов с зёрнами полностью гранулированного циркона соответствуют температуре расплава выше 2000ºC. Для кратера Жаманшин наиболее высокотемпературные расплавы формируют фацию тектитов (иргизитов), температура расплава которых выше 2500ºC. В Логойском кратере такие расплавы не сохранились, так как кратер был частично эродирован; 7) выявлены принципиальные критерии корреляции структурно-петрологических и композиционно-минералогических данных для корректного использования существующих методов минералогической термобаро-

метрии и их сопряжения с данными структурно-парагенетического анализа и петроструктурных реконструкций для решения эволюционных геодинамических задач для полиметаморфических гранулитовых комплексов; 8) был исследован вопрос о степени опасности современных активных вулканов Южной Камчатки: Камбального и Ильинского, продолжающих к югу цепь вулканов Курильской островной дуги (КОД). Влк. Камбальный, извергавшийся 24 марта 2017 г., после 200-летнего «молчания», относится к К-типу и способен к наиболее опасным взрывным извержениям. В настоящее время эволюционный тренд на уровне андезитов, характер извержений - пепловые выбросы, т.е. есть еще значимый временной интервал до возможных в будущем опасных извержений плинианского или пелейского типов. Вулкан Ильинский пережил фазу взрывного извержения в 1901 г. с выбросом пемз дацитового состава с большим количеством алливалитовых включений. Проведенные исследования позволили заключить, что отнесение Паужетской вулкано-тектонической структуры к «супервулканам», аналогичным Йелоустонском «супервулкану», угрожающему взрывным извержением колоссальной силы, является досадным недоразумением.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Объем финансирования темы в 2022 году
Таблица А.1

Источник финансирования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами
Денежные средства в виде субсидии на выполнение фундаментальных научных исследований в соответствии с госзаданием МГУ, часть 2 (р. 01 10)	16 265 000,0	16 265 000,0