

5.3. РАЗВИТИЕ ТЕРМОБАРОГЕОХИМИЧЕСКИХ МЕТОДОВ ИССЛЕДОВАНИЯ МИНЕРАЛООБРАЗУЮЩИХ РАСПЛАВОВ И РАСТВОРОВ В МИНЕРАЛАХ ЗЕМНОЙ КОРЫ И ВЕРХНЕЙ МАНТИИ

А.А. Томиленко, Л.И. Панина, С.З. Смирнов, Н.А. Гибшер, В.П. Чупин

В связи с организацией в новосибирском Академгородке Института геологии и геофизики СО АН СССР академик В.С. Соболев пригласил из Львовского государственного университета профессора Ю.А. Долгова, предложив создать первую в системе Сибирского отделения лабораторию минералообразующих растворов. В.С. Соболев блестяще предвидел, что исследование включений минералообразующих сред в будущем станет одним из главных объективных методов познания процессов эндогенного и экзогенного петро- и рудогенеза, имевших место в геологической истории Земли, и одним из главных приоритетов в Институте геологии и геофизики.

С 1959 г. начался период научных исследований Ю.А. Долгова в Сибири. Надо сказать, что еще со времени работы во Львовском университете Юрий Александрович искал возможности для получения новых данных о происхождении минералов. Такую возможность давало изучение капелек материнских минералообразующих сред, захваченных растущими минералами, — так называемых флюидных включений.



Профессор Ю.А. Долгов

Расшифровка уникальной информации о генезисе минералов, содержащейся во флюидных включениях, стала стержнем всей творческой научной жизни Ю.А. Долгова и сотрудников организованной им лаборатории минералообразующих растворов, впоследствии переименованной в лабораторию термобарогеохимии.

Название «термобарогеохимия» для области науки, занимающейся изучением включений минералообразующих сред, было предложено Н.П. Ермаковым в 1968 г. на I Международном симпозиуме по включениям растворов и расплавов и утверж-

дено в 1970 г. в Японии на II Международном совещании Комиссии по рудообразующим флюидам во включениях (COFFI) (Ермаков, Долгов, 1979).

Анализ генетической информации, которую хранят такие включения, позволяет определить физико-химические условия образования магматических, метаморфических и осадочных горных пород, выявить причины возникновения месторождений полезных ископаемых и сформулировать поисково-оценочные термобарогеохимические критерии рудоносности тех или иных геологических образований.

Методы термобарогеохимии с успехом используются для развития самых различных областей геологических знаний и охватывают широкий круг природных объектов, начиная от космических образцов до пород из глубинных слоев Земли.

Под руководством Ю.А. Долгова проводились работы по исследованию происхождения пегматитов (Долгов, 1963, 1965, 1968). Им был предложен ряд гипотез, расширяющих представления о сложном процессе пегматитообразования. Одной из таких идей является концепция адиабатического расширения и сжатия пегматитовых систем в процессе их становления. В те годы, когда было организовано направление по исследованию включений минералообразующих сред в ИГиГ СО АН СССР, среди ученых шли споры о происхождении гранитных пегматитов, а сами пегматиты являлись важнейшим источником редких металлов и пьезооптического сырья. Главный вопрос — магматический или метасоматический генезис имеют пегматиты — мог быть решен только путем непосредственного наблюдения минералообразующих сред. Работы новосибирских термобарогеохимиков сыграли ключевую роль в разрешении этой проблемы. Находки и исследования первичных расплавных включений в минералах ранних зон пегматитов, выполненные И.Т. Бакуменко, О.Н. Косухиным, В.П. Чупиным и рядом других сотрудников лаборатории, однозначно подтвердили магматическое происхождение хрусталеносных гранитных пегматитов и миароловых пегматитов с редкометалльной минерализацией (Бакуменко, Косухин, 1976, 1981; Косухин, 1977, 1978; Бакуменко и др., 1979; Чупин, Косухин, 1982; Косухин и др., 1984; Бакуменко, Смирнов, 1992). Еще более удивительными оказались находки первичных расплавных включений в корневых частях кристаллов кварца из миароловых пустот. Это позволило сделать вывод о том, что силикатные магматические



Посещение лаборатории минералообразующих растворов ИГиГ СО АН СССР известными учеными из Франции для обсуждения совместных работ по изучению флюидных и расплавных включений в метаморфических и магматических породах. Ю.А. Долгов (в центре), проф. Ж. Туре и Р. Клокьятти. Академгородок, 1978 г.

расплавы присутствовали в пегматитовых системах на стадии миаролообразования при относительно низких температурах, до 500 °С включительно. В 90-х годах, используя гомогенизацию расплавных включений в минералах под внешним давлением, а также результаты электронно-микроскопического и ионно-микроскопического анализов, удалось показать, что наиболее поздние порции пегматитовых расплавов миароловых пегматитов имеют не только низкие температуры кристаллизации, но и крайне необычный состав. Они резко обогащены F, В и редкими элементами по сравнению с типичными гранитами, а молекулярное соотношение $\text{SiO}_2/\text{H}_2\text{O}$ в них близко к единице. Совместные работы С.З. Смирнова и иркутских исследователей по изучению флюидных включений в минералах турмалиноносных пегматитов привели к открытию принципиально новых флюидных систем (Перетяжко и др., 2000; Смирнов и др., 2003; Peretyazhko et al., 2004). Среди дочерних кристаллов флюидных включений был обнаружен сассолин — кристаллическая ортоборная кислота, на основе чего С.З. Смирновым доказано, что минералообразование в некоторых типах пегматитов протекает не из хлоридных, а из борнокислых флюидов (Смирнов и др., 2000; Smirnov et al., 2005). Эта находка послужила толчком для многочисленных исследований борнокислых флюидных систем в пегматитах и редкометалльных гранитах в России и за рубежом.

Современные исследования пегматитообразующих процессов проводятся с применением новейших методов микроанализа, позволяющих проследить эволюцию и характер перераспределения важных для минерало- и рудообразования элементов. Многие вопросы эволюции пегматитообразующих систем решаются комплексно, с использованием методов экспериментальной минералогии и петрологии.

Под пристальным вниманием В.С. Соболева начали проводиться исследования, которые охватывают термобарогеохимический аспект магматичес-



кой и метаморфической петрологии и являются основой для реконструкции условий генерации и кристаллизационной эволюции самых различных магм, таких как ультрабазит-базитовые, щелочные, карбонатитовые и гранитоидные.

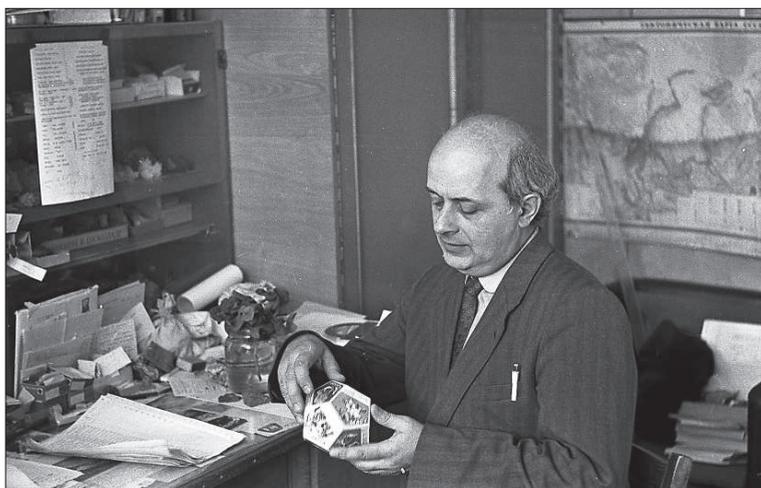
Развитие исследований расплавных включений в минералах магматических пород было невозможно без микроанализа их составов. В 1967–1968 гг. Н.Л. Добрецов и Ю.Г. Лаврентьев начали разрабатывать методику определения химического состава силикатных минералов с использованием рентгеноспектрального анализа с электронным зондом. Методика электронно-зондового микроанализа нашла широкое применение и в изучении расплавных включений в самых разных магматических породах. Впервые в институте такие работы провели для определения состава стекол расплавных включений А.И. Чепуров, Т.Ю. Базарова и И.Т. Бакуменко. Полученные результаты опубликованы в коллективной монографии «Магматогенная кристаллизация» (1975), которая стала первым в СССР систематизированным изложением данных о магматических расплавах разного состава, полученных по включениям в минералах. Большой цикл методических работ для подбора аналитических параметров и учета влияния возможных физических явлений на правильность данных по включениям водосодержащих расплавов был проведен В.П. Чупиным и А.В. Титовым. В дальнейшем новосибирские исследователи включений стали привлекать ионно-зондовый микроанализ и метод ICP-MS с лазерной абляцией для получения информации о содержании редких, рассеянных элементов и даже для определения концентраций воды в расплавах включений. Для этого использовались аналитические возможности Института микроэлектроники и информатики РАН (Ярославль) и исследовательских центров Института химии общества Макса Планка (Майнц, Германия) и Университета Тасмании (Хобарт, Австралия).



Сотрудники лаборатории минералообразующих растворов ИГиГ, начало 80-х годов. Верхний ряд (слева направо): В.А. Симонов, С.В. Ковязин, Ю.А. Долгов, А.А. Томиленко, С.В. Вишневский, С.Н. Гришина, Ф.Н. Шешегов; нижний ряд: Л.А. Фомина, Л.А. Егорова, Л.А. Шохорова, Г.М. Иванова, Н.А. Шугурова (сидит)

К заслугам ученых ИГиГ СО АН относится разработка методических основ исследований расплавных включений в минералах гранитоидов. Они были заложены И.Т. Бакуменко, В.П. Чупиным и О.Н. Косухиным (Чупин, 1972, 1974, 1975; Чупин и др., 1975, 1979; Бакуменко и др., 1978, 1979, 1981; Косухин, 1980; Соболев и др., 1980; Чупин, Косухин, 1982; Томиленко, Чупин, 1983; Косухин и др., 1984; Владимиров и др., 1991, 1993; Титов и др., 1992; Добрецов, Чупин, 1993). Накопленный опыт в дальнейшем был перенят и развит в других академических центрах СССР, а впоследствии в России. Благодаря этим работам определен температурный и флюидный режим становления различных гранитоидных комплексов и созданы модели эволюции корового магматизма и связанного с ним оруденения. В частности, именно изучение включений магматических расплавов и флюидов позволило на новом уровне рассмотреть вопросы эволюции редкометалльных рудно-магматических систем, которые представлены в публикациях В.П. Чупина и А.В. Титова. Немалую роль в развитии термобарогеохимических исследований гранитоидов сыграло сотрудничество с Геологическим институтом БФ СО РАН (Улан-Удэ). Новосибирские специалисты проводили совместные исследования пегматовых систем с Ф.Г. Рейфом и Ю.М. Ишковым и бимодальных габбро-гранитных серий Восточного Прибайкалья — с Б.А. Литвиновским и А.Н. Занвилевич (Литвиновский и др., 1996, 2001; Занвилевич и др., 1999; Кузьмин и др., 1999; Litvinovsky et al., 2002).

Во всем мире изучение расплавных включений начиналось с вкрапленников в базальтах. Институт геологии и геофизики не являлся исключением. Первые работы в этом направлении были связаны с современными и древними базальтами (Бакуменко, 1965, 1970; Соболев, Бакуменко, 1970; Базарова и др., 1975; Бакуменко и др., 1986). На примере этих включений разрабатывались методика высокотемпературной термометрии и изучения составов микроаналитическими методами. За истекший период И.Т. Бакуменко, Н.Ф. Красову, Н.М. Поповой, Е.Н. Булгаковой, С.В. Ковязину, Л.И. Паниной, Т.Ю. Базаровой, А.А. Томиленко, В.А. Симонову, В.В. Шарыгину, Д.В. Кузьмину и Т.Ю. Тиминой удалось выяснить физико-химические параметры



Кристаллография — это на всю жизнь. И.Т. Бакуменко. 1988 г.



Т.Ю. Базарова. Первая высокотемпературная термокамера для гомогенизации расплавных включений в минералах из магматических пород. 1969 г.

кристаллизации базальтоидных пород Большого Толбачинского извержения, Авачинского вулкана, Западно-Забайкальской вулканической области, Кельбаджарской наложенной мульды на Малом Кавказе, бассейна Колымы (Большой Анюй), Северо-Минусинской впадины, а также трапшов Сибирской платформы и др. (Бакуменко, 1965, 1970; Соболев, Бакуменко, 1970; Базарова и др., 1975; Бакуменко и др., 1976, 1999; Костюк и др., 1986; Панина и др., 1987, 1997; Шарыгин и др., 1992; Золотухин и др., 1994; Simonov et al., 1996; Симонов и др., 1996, 1997, 2004; Сурин, Шарыгин, 1997; Golovin et al., 1997; Kuzmin, Chupin, 1997; Леснов и др., 1998; Симонов, Ковязин, 1998; Sharygin et al., 1998, 1999, 2003; Vakumenko et al., 1999; Головин и др., 2000; Ярмолук и др., 2001; Kuzmin, Chupin, 2001; Smirnov et al., 2001; Sharapov et al., 2003; Timina et al., 2003, 2010; Конников и др., 2005; Kóthay et al., 2005; Timina, Sharygin, 2005; Томиленко, 2006; Тимина, Шарыгин, 2007; Мазуров и др., 2009; Соболев и др., 2009; Kuzmin et al., 2009; Изох и др., 2010; Tomilenko et al., 2010). Получена уникальная информация о составе родоначальных магм, их эволюции, процессах дифференциации и фракционирования, о геохимических особенностях мантийных источников базальтоидных магм и их взаимодействия с материалом континентальной коры.

В 1962–1963 гг. под руководством профессора В.П. Костюка, первоклассного петрографа и физикохимика, начались масштабные исследования минералообразующих сред, участвующих в становлении щелочных магматических пород. Им была создана отдельная лаборатория (впоследствии влившаяся в состав лаборатории термобарогеохимии), которая занималась вопросами щелочно-магматического петрогенезиса.

Щелочные породы являются довольно редкими, но очень сложными образованиями. Они отмечаются во всех породных группах, образуют многочисленные семейства, входят в состав различных формаций, отмечаются на платформах, в складчатых областях и на океанических островах. Со щелочными породами связаны разные полезные ископаемые — от платины и алмазов до фосфора, глинозема, калийных удобрений. В 60-х годах щелочными

породами занимались многие исследователи. Самыми сильными были давно сложившиеся коллективы в Москве и Ленинграде, возглавляемые такими маститыми учеными, как О.А. Воробьева, В.И. Герасимовский, А.А. Кухаренко, Л.С. Бородин и др. Наиболее сложным вопросом в изучении щелочных пород являлся их генезис. На смену ранним представлениям о магматической природе появились гипотезы о генетической связи щелочных пород с метасоматозом, коровым анатексисом, а также десиликацией любой нормальной магмы в результате ассимиляции ею карбонатных пород.

Идея получения прямых генетических данных по включениям в минералах щелочных пород с самого начала увлекла молодых исследователей. Начались целенаправленные поиски газово-жидких и флюидных включений в минералах щелочных пород. Однако быстро выяснилось, что наряду с жидкостью и газом включения здесь содержат большое количество твердых фаз или даже представляют собой застеклованные или раскристаллизованные фракции.

Первые же результаты гомогенизации включений, полученные Л.И. Паниной и Т.Ю. Базаровой, показали, что минералы щелочных пород кристаллизовались при высоких (выше 800–1000 °С) температурах из расплавов и расплавов-растворов (Панина, 1966; Базарова, 1969; Костюк, Панина, 1970; Базарова, Костюк, 1975). Полученные данные сразу же обсуждались с академиком В.С. Соболевым, который постоянно курировал это направление. Владимир Степанович всегда был доступен и мог деликатно проконсультировать по любому вопросу. Например, когда молодые сотрудники в смущении обращались к нему с просьбой определить непонятный минерал, он тактично успокаивал: «А кто же знает все минералы щелочных пород?». После чего садился за микроскоп и определял минерал. Обо всех результатах изучения включений в щелочных породах Владимир Степанович требовал незамедлительно сообщать ему и следил, чтобы вовремя были написаны статьи, которые он представлял в «Доклады АН СССР». О результатах работ он упоминал в своих докладах на конференциях и совещаниях, рассказывал студентам на лекциях. Постепенно сторонников магматического происхождения щелочных пород становилось все больше и больше.

Со временем внимание сотрудников лаборатории начали привлекать ультраосновные и основные породы, а также карбонатиты, пространственно совмещенные с щелочными комплексами. Выяснилось, что ультрабазиты и базиты также кристаллизуются из магматических расплавов, но при более высоких температурах. Например, изучение расплавных включений, выполненное Л.И. Паниной и А.И. Чепуровым, показало, что кристаллизация оливина в меймечитах происходила при температурах выше 1450 °С (Соболев и др., 1972). Очень интересным оказалось изучение включений в карбонатитах. Как известно, на территории бывшего СССР карбонатиты присутствуют в основном в глубинных комплексных щелочных массивах, как, например, в Гулинском массиве в Маймеча-Котуйской зоне на Севере Сибири,



Л.И. Панина



Т.Ю. Базарова

и представлены кальцит-доломит-анкеритовыми разновидностями. Образование таких карбонатитов обычно связывали с метасоматическим замещением силикатных пород. Однако в 1970 г. обнаружилось, что в кальците и доломите гулинских карбонатитов содержатся солевые включения, гомогенизирующиеся при 750–690 °С (Костюк, Панина, 1970; Панина, Костюк, 1971). Это свидетельствовало о том, что карбонаты, вероятнее всего, кристаллизовались из карбонатно-солевых расплавов. Примечательной оказалась позиция В.С. Соболева, который считал существование кальциевых карбонатитовых расплавов весьма сомнительным из-за отсутствия в них летучих и как следствия этого невозможности их перемещения в пространстве. Тем не менее он решил немедленно опубликовать эти ре-

зультаты в «Докладах АН СССР», так как посчитал, что они представляют большой интерес и допускают принципиальную возможность существования подобного карбонатитового расплава. Позднее действительно было установлено, что доломитовые и кальцитовые расплавы являются конечным продуктом эволюции карбонатитовых магм, исходно обогащенных щелочными элементами, способствующих их миграции.

Благодаря тесной увязке петрологических данных с P – T -параметрами кристаллизации щелочных пород, полученных с помощью изучения включений, исследования Л.И. Паниной и Т.Ю. Базаровой уже через несколько лет вышли на передовые рубежи мировой науки.

С применением микроаналитических методов для анализа вещества включений щелочных расплавов впервые в мировой практике была получена информация о составе родоначальных магм, их эволюции, процессах дифференциации и фракционирования, о геохимических особенностях мантий-



Л.И. Панина и В.П. Костюк.
Полевые работы на Гулинском плутоне, 1967 г.



Сотрудники двух родственных коллективов ИГиГ СО АН СССР – лаборатории минералообразующих растворов и лаборатории минералогии. Слева направо: В.С. Шацкий, И.Т. Бакуменко, И.В. Моторина, Н.М. Подгорных, Л.И. Панина, Н.П. Похиленко. 1973 г.

ных источников щелочных магм и процессах взаимодействия с коровым материалом.

За истекший почти пятидесятилетний период Л.И. Паниной, Т.Ю. Базаровой, А.И. Чепурову, В.С. Шацкому, Н.М. Подгорных и В.В. Шарыгину удалось изучить и выяснить физико-химические параметры кристаллизации щелочных пород в Бурятии, Туве, Приморье, Полярной Сибири, Северном Прибайкалье, на Кольском полуострове, Камчатке, Центральном Алдане, Чукотке, Урале, в Азербайджане, Армении, Восточном Памире, а также в ряде объектов за рубежом (Италии, Испании, США, Австралии, Африке, Бразилии) (Панина, Шацкий, 1973; Панина, Подгорных, 1974, 1975; Базарова и др., 1975, 1981; Панина, Васильев, 1975; Панина, 1977, 1978, 1983, 1985, 1993, 1997; Панина, Костюк, 1979; Бакуменко и др., 1984; Панина и др., 1984, 1987, 1989, 1990–1992, 1994, 1996, 1997, 2000, 2001, 2003; Панина, Моторина, 1985; Костюк и др., 1990; Прошенкин и др., 1991; Шарыгин, Базарова, 1991; Шарыгин и др., 1992, 1996, 1998; Шарыгин, 1993; Шарыгин, Панина, 1993; Панина, Владыкин, 1994; Panina, 1994, 2005; Панина, Конев, 1995; Panina et al., 1995; Sharygin et al., 1996, 2009; Stoppa et al., 1997; Панина, Усольцева, 1999, 2007; Panina, Usol'tseva, 2008; Panina, Stoppa, 2009; Stoppa, Sharygin, 2009).

Наряду с фундаментальными исследованиями в лаборатории с самого начала ее образования рассматривались и прикладные аспекты. Широкое использование методов изучения включений в минералах щелочных пород позволило разработать генетические критерии выделения лампроитов из группы сходных щелочных пород. Благодаря этому стало возможным резко сократить масштабы поисков лампроитов на территории развития щелочного магматизма.

Развитие интереса к процессам мантийного минералообразования, петрогенезиса и, в частности, к проблеме происхождения алмаза заставило ученых заняться поиском включений в минералах щелочных базальтоидов, кимберлитов, лампроитов и выносимых ими мантийных ксенолитов. Исследования включений в минералах этих пород показали, насколько сложными и



На международном совещании, посвященном 100-летию со дня рождения академика В.С. Соболева, Новосибирск, 2008 г. Слева направо: С.З. Смирнов, проф. Ж. Туре (Франция), В.П. Чупин

многообразными являются среды минералообразования в мантии. Были обнаружены включения высокоплотных магматогенных флюидов, подтверждающие существование на определенных стадиях флюидной фазы в верхнемантийных минералообразующих системах. В то же время проблему самостоятельного нахождения и миграции такой фазы в верхнемантийных условиях (т. е. мантийного метасоматоза) нельзя считать окончательно решенной. Крайне интересными являются исследования включений минералообразующих сред в минералах кимберлитов, выполненные сотрудниками лаборатории в последние годы (Томиленко, Ковязин, 2008; Kamenetsky et al., 2008; Sharygin et al., 2008, 2009; Tomilenko et al., 2008, 2009; Соболев и др., 2010). А.А. Томиленко и С.В. Ковязиным было установлено, что кристаллизация фенокристаллов оливина и регенерация мегакристаллов оливина из кимберлитов тр. Удачная-Восточная происходили при температуре выше 1100 °С и давлении около 5 кбар из силикатно-карбонатно-солевых расплавов. Вместе с тем кристаллизация кальцитов основной массы кимберлитов тр. Удачная-Восточная происходила при температуре 880–900 °С из карбонатно-хлоридных расплавов, которые на заключительной (позднемагматической) стадии формирования кимберлитовой трубки в значительной степени были контаминированы материалом коры.

Уникальными являются исследования включений минералообразующих сред в природных алмазах и ксенолитах мантийных пород (Бакуменко и др., 1992; Похиленко и др., 1994; Чепуров и др., 1994; Tomilenko et al., 1995, 2001, 2005, 2008; Томиленко и др., 2001, 2006, 2009; Шацкий и др., 2001; Томиленко, 2006; Korsakov et al., 2009). Алмаз хранит немало загадок своего происхождения и одна из них — это фазовый и химический состав сред алмазообразования. Находка А.А. Томиленко включений сжиженных газов (H_2O , CO_2 , N_2 , CH_4) в природных алмазах показала, что флюид, состоящий из этих компонентов, является одной из составляющих сред алмазообразования в при-



А.А. Томиленко. 1973 г.

роде. Очень важными для решения проблем генезиса алмазов стали исследования включений в синтетических алмазах, выращенных в различных средах (А.А. Томиленко совместно с Ю.Н. Пальяновым, А.И. Чепуровым, В.С. Шацким и В.М. Сониным). В природных и синтетических алмазах были выявлены специфические высокоплотные флюидные и расплавные включения (Pal'yanov et al., 1994, 2005; Томиленко и др., 1997; Tomilenko et al., 1997–1999; Chepurov et al., 1999; Сонин и др., 2001, 2003, 2004; Сокол и др., 2004; Томиленко, 2006; Sokol et al., 2008; Жимулев и др., 2009).

Эти работы позволили реконструировать фазовый и химический состав минералообразующих сред и условия возникновения алмазоносных парагенезисов в верхней мантии. А.А. Томиленко и Л.Н. Похиленко совместно с И.И. Фёдоровым были получены принципиально новые данные об окислительно-восстановительном и флюидном режимах минералообразования в условиях высоких давлений, которые свидетельствуют о непостоянстве состава флюида и вариации потенциала кислорода в верхней мантии Земли, что предполагает присутствие в последней как областей с низкими значениями потенциала кислорода, которые соответствуют высоким концентрациям CH_4 в составе глубинных флюидов, так и областей с достаточно высокими значениями потенциала кислорода, что соответствует преобладанию CO_2 и H_2O в составе флюидов (Томиленко и др., 1997, 2010; Федоров и др., 1998; Похиленко, Томиленко, 2001, 2005; Pokhilenko, Tomilenko, 2002; Pokhilenko et al., 2003, 2008; Жимулев и др., 2004; Томиленко, 2006; Tomilenko et al., 2008; Леснов и др., 2009; Шараров и др., 2009, 2010; Sharapov et al., 2009; Sokol et al., 2009).

Долгое время теории метаморфогенного минералообразования строились на базе экспериментальных и минералого-петрографических исследований. Наблюдение и характеристика минералообразующих сред метаморфизма имели большое значение для дальнейшего развития теоретических основ метаморфогенного петрогенезиса. Ю.А. Долговым, А.А. Томиленко и В.П. Чупиным проведены пионерные исследования метаморфических пород, в которых обнаружены метаморфогенные включения высокоплотных сжиженных газов (воды, азота, метана и углекислоты) (Долгов и др., 1967, 1970, 1976; Долгов, 1970; Долгов, Томиленко, 1978; Томиленко, 1979; Томиленко,



Международный геологический конгресс в Осло (Норвегия), 2008 г.
У своего стенда В.П. Чупин

Чупин, 1983). Установлено, что при метаморфизме пород гранулитовой и амфиболитовой фаций основными компонентами флюида были углекислота и вода. Доля углекислоты в составе метаморфизирующих флюидов возрастала с увеличением степени метаморфизма. В отдельных регионах при метаморфизме пород амфиболитовой фации и пород фации дистеновых гнейсов и сланцев, а также некоторых эклогитов существенную роль в составе флюида играли метан и азот.

За прошедший период сотрудникам лаборатории удалось изучить и выяснить физико-химические параметры метаморфизма пород гранулитовой и амфиболитовой фаций чогарского комплекса Станового хребта, Канского выступа Енисейского кряжа, Беломорского пояса Балтийского щита, Анабарского, Алданского и Канадского щитов, Южно-Чуйского хребта (Алтай), Северного Прибайкалья (Холоднинское полиметаллическое месторождение), Баян-Хонгорской зоны, района Цэл-Сомона и Восточного Прихубсугуля (Монголия), эклогитоносных комплексов Северо-Муйской глыбы Западного Забайкалья, Кокчетавского массива (Северный Казахстан), Западной Норвегии, Богемского и Мюхбергского массивов (Германия), а также в областях альпийской складчатости в районах Коральпе и Зауальпе (Австрия) (Dolgov et al., 1976; Томиленко и др., 1977; Кепежинскас и др., 1981, 1985; Бердников, Томиленко, 1982; Кепежинскас, Томиленко, 1982, 1984, 1985; Долгов и др., 1984; Кепежинскас, Томиленко, 1985; Бердников и др., 1985, 1990; Соболев и др., 1985; Shatsky et al., 1985; Попов, Томиленко, 1987; Шацкий и др., 1988; Ножкин, Томиленко, 1991; Ножкин и др., 1991; Томиленко, Попов, 1991; Chupin et al., 1992; Макрыгина и др., 1993; Чупин и др., 1993; Tsygankov et al., 1994; Томиленко et al., 1997; Томиленко, Shatsky, 1997; Томиленко, Shebanin, 1997; Бакуменко, Томиленко, 1998; Томиленко, 2006). Это позволило на надежной и хорошо аргументированной количественной основе реконструировать процессы образования и структурно-вещественной эволюции континентальной

земной коры. С этой же целью проводились активные работы по изучению процессов анатексиса при метаморфизме архейских (Нимнырский блок Алданского щита) и других древнейших пород земной коры (Мынчукурский блок в Джунгарском Алатау, горно-алтайская серия Южно-Чуйского хребта и др.), где впервые были обнаружены расплавные включения и доказана кристаллизация мигматитов из силикатного анатектического расплава (Томиленко, Чупин, 1972; Бакуменко и др., 1974, 1976; Чупин, 1975; Чупин и др., 1975; Томиленко, 1979; Долгов и др., 1984).

Несомненно уникальные результаты были получены В.П. Чупиным и Д.В. Кузьминым при изучении высокобарических расплавных включений в минералах ксенолитов гранулитов и эклогитоподобных пород из диатрем Памира (Chupin et al., 1997, 2001, 2003, 2010; Чупин и др., 2006). Породообразующие и акцессорные минералы (в том числе ранние гранат и клино- и ортопироксены) этих основных по составу пород содержат первичные включения кислых расплавов. Появление кислых расплавов наиболее непротиворечиво можно объяснить инконгруэнтным плавлением базитовых субстратов в нижнекоровых условиях (давление более 12 кбар, температура около 1000 °С). В этом процессе образуются минералы гранулитового или эклогитового парагенезиса с захватом микрокапелек выплавляющегося кислого расплава в виде включений (т.е. реакции минералообразования идут при участии расплава).

В.П. Чупиным был предложен новый подход для выяснения генезиса, состава, возраста и длительности кристаллизации магм протолитов архейских пород, основанный на результатах изучения состава и возраста расплавных включений в акцессорном цирконе из этих пород (Чупин и др., 1992, 1994, 1996, 1997, 2006; Chupin et al., 1997, 1998, 2001; Чупин, Ветрин, 2005). Установлены составы первично-коровых магм и генезис протолитов древнейших «серых гнейсов» тоналит-грондъемитового состава из различных регионов Мира (Анабарский, Алданский, Балтийский и Канадский докембрийские щиты). На основе данных о составе и возрасте расплавных включений SHRIMP-датированием вмещающего циркона впервые установлено, что интервал времени образования кислых вулканитов архейской части разреза Кольской сверхглубокой скважины (Балтийский щит) составляет более 30 млн лет.

Впервые А.А. Томиленко и С.В. Ковязиным были получены прямые доказательства магматического происхождения анортозитов, кристаллизация которых осуществлялась из маловодных высокоглиноземистых магматических расплавов при температурах выше 1100 °С и давлении более 5 кбар (Томиленко и др., 2002; Tomilenko et al., 2003; Томиленко, Ковязин, 2005, 2008; Tomilenko, Kovyazin, 2005; Томиленко, 2006). Высокие температуры кристаллизации, изотопные и геохимические данные указывают на то, что анортозиты не могли образоваться при плавлении пород земной коры в условиях фации гранулитового метаморфизма, а, скорее всего, кристаллизовались из мантийных расплавов. В связи с этим интересна гипотеза С. Маруяма, что высокотемпературные анортозиты – реликты кумулятов из первично-магматического океана, возникшего после аккреции (4,3–4,1 млрд лет). Установлено, что преобразования докембрийских анортозитовых массивов автономного типа Анабарского щита (Центрального), Алданского щита (Каларского массива – Имангакитского и Куронаахского), Украинского щита (Коростеньского плутона), Джугджуро-Становой зоны (Джугджурского массива – Лантарского и Геранского) связаны с наложенным метаморфизмом, который



А.А. Томиленко и председатель рабочей группы по включениям в минералах Международной минералогической ассоциации проф. Жао Линь Ли и проф. Зунжоу Боу (г. Гуанчжоу, Китай). Новосибирск, 2002 г.

испытали рассматриваемые анортозиты в процессе остывания и выведения их по коллизионным зонам в верхние горизонты литосферы.

Исследования минералообразующих растворов и газов занимают главное место при изучении процессов гидротермального минералообразования. Это обусловлено прежде всего важностью выяснения условий и механизмов возникновения рудных месторождений. Исторически включения жидких и газовых растворов в минералах стали первым объектом исследования термобарогеохимиков, и им были посвящены многочисленные работы в ИГиГ СО АН СССР. Активно используются эти включения для реконструкции процессов рудообразования и в настоящее время — в ИГМ СО РАН.

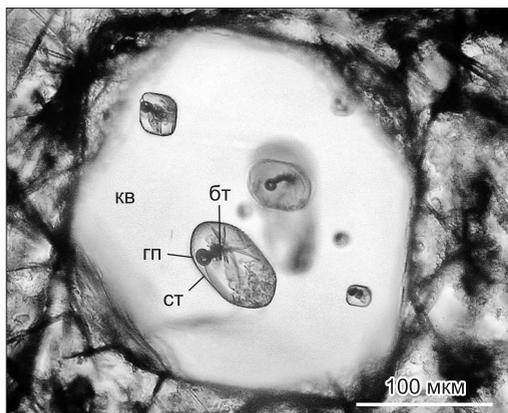
Жидкие фазы включений гидротермальных растворов и газов с большим трудом поддаются изучению. Это связано с быстрыми процессами их изменения при помещении в воздушную атмосферу. Именно поэтому с самых первых дней развития термобарогеохимии большое внимание уделялось неразрушающим методам исследования флюидных включений. Поначалу это был метод замораживания содержимого включений — метод криометрии, который позволил получить обширный материал для сравнительного анализа включений из разных гидротермальных парагенезисов на основе температур полного замерзания (температур эвтектики) и плавления последней кристаллической фазы. Большое значение для развития методов термобарогеохимии имели работы И.Л. Добрецово́й, Л.Ш. Базарова, И.В. Моториной, Н.М. Поповой и А.С. Борисенко (Долгов, Попова, 1968; Добрецова, 1968; Базаров, Моторина, 1969; Борисенко, 1977). В этих работах для интерпретации данных криометрических исследований флюидных включений были привлечены фазовые диаграммы двух- и трехкомпонентных водно-солевых систем — модификация метода анализа фазовых диаграмм в петрологии, предложенного В.С. Соболевым. Такой подход позволял в те годы делать оценки химического состава и концентрации водных растворов во включениях. Если криометрия, являясь методом анализа индивидуальных включе-

ний, не позволяла получать прямые данные о составе водных растворов, то метод водных вытяжек давал такую возможность, но по валу включений (Базаров и др., 1975). Анализ водных вытяжек также сыграл важную роль в развитии подходов к прогнозам рудоносности различных гидротермальных месторождений. В настоящее время методы криометрии и химического анализа водных вытяжек имеют вспомогательное значение, уступив место валовому анализу и микроанализу индивидуальных включений методом масс-спектрометрии с индуктивно связанной плазмой (LA ICP-MS).

Еще до появления в России аппаратуры для исследования индивидуальных флюидных включений с применением лазерной абляции новосибирские ученые начали использовать для этой цели методику спектрального анализа растворов индивидуальных флюидных включений с лазерным вскрытием, разработанную в БГИ СО РАН (Улан-Удэ) Ф.Г. Рейфом с коллегами. В результате совместных работ с И.Т. Бакуменко, А.С. Борисенко и С.З. Смирновым были оценены концентрации рудных элементов во флюидных включениях самых разных геологических объектов — от гранитных пегматитов до рудоносных жил различных формаций (Рейф и др., 1992). Следует особо отметить, что метод вскрытия флюидных включений лазером, разработанный учеными из Улан-Удэ в конце 80-х годов, был очень близок появившейся позже методике лазерной абляции. Таким образом, в то время когда ни в Советском Союзе, ни за рубежом еще и не помышляли об использовании ныне популярных масс-спектрометрических методов анализа содержимого включений с помощью лазерной абляции, у исследователей, благодаря Ф.Г. Рейфу и его коллегам, появилась уникальная возможность оценивать рудоносность флюидов по составам индивидуальных включений.

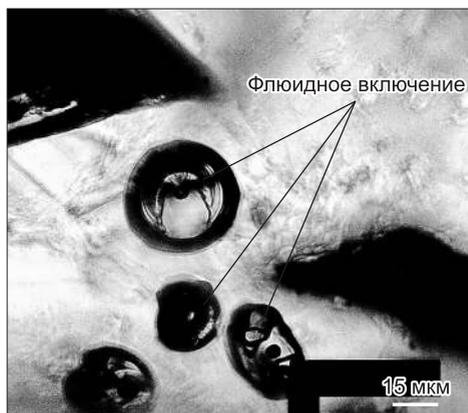


Сотрудники лаборатории термобарогеохимии ИМП ОИГТМ СО РАН. 1-й ряд (нижний): Н.А. Шугурова; 2-й ряд (справа налево): С.Н. Гришина, Н.А. Гибшер, Л.М. Усольцева, Л.А. Егорова; 3-й ряд: А.А. Милоснов, В.П. Чупин, Л.А. Шохорова; 4-й ряд: Н.Ю. Осоргин, Д.В. Кузьмин, С.В. Ковязин, С. Мазурова, В.В. Шарьгин, Л.Н. Фомина. 1993 г.

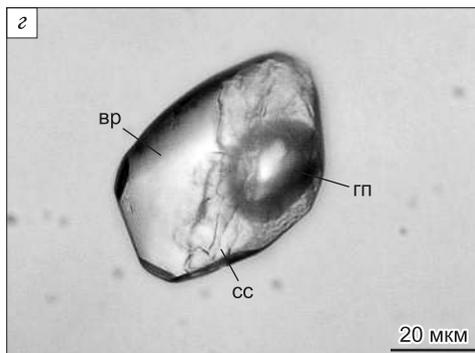
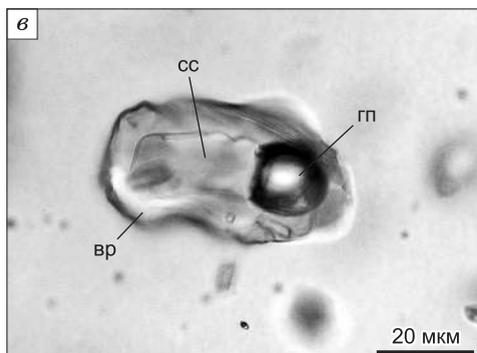
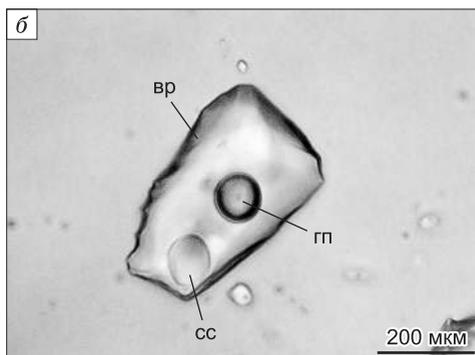
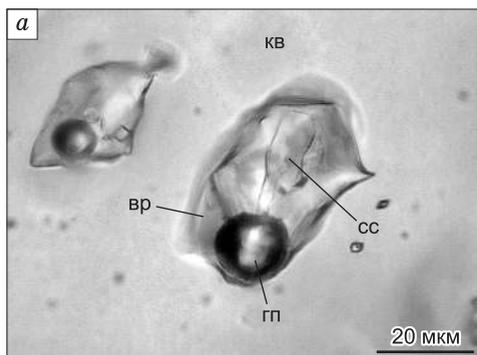


Первичные частично раскристаллизованные расплавные включения в кварце риолитов, Северная Монголия.

Кв — кварц; гп — газовый пузырек; ст — стекло; бт — биотит.

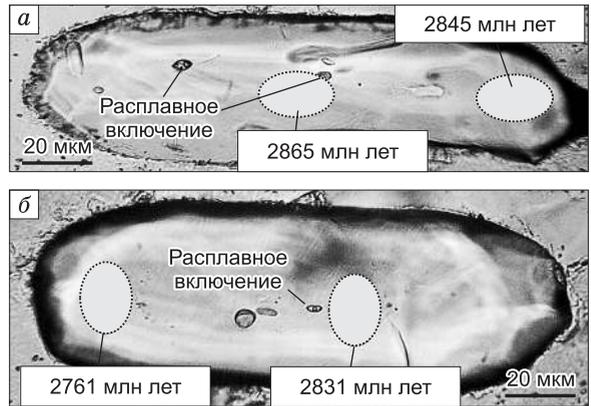
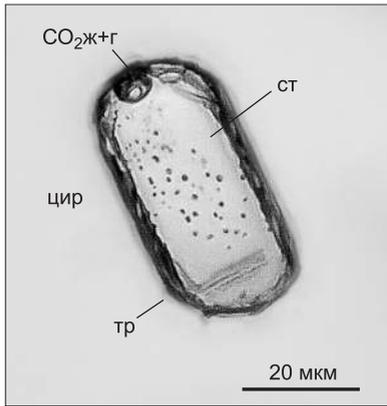


Первичные флюидные включения в синтетическом алмазе, полученном в металл-углеродной системе на многопуансонном аппарате типа «разрезная сфера» БАРС.



Первичные включения концентрированных борнокислых водных растворов в миоэриловом кварце гранитных пегматитов: а, б — Малханское пегматитовое поле, Центральное Забайкалье (а — жила Октябрьская, б — жила Моховая); в, г — жила Лесхозовская, Юго-Западный Памир, Таджикистан.

Кв — кварц; гп — газовый пузырек; вр — водный раствор; сс — дочерний кристалл сассолина (H_3BO_3).

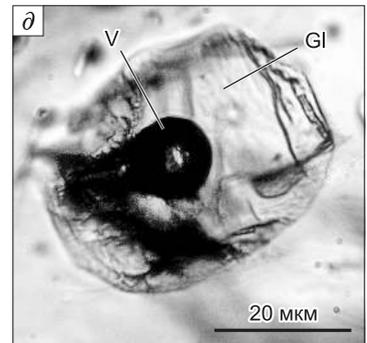
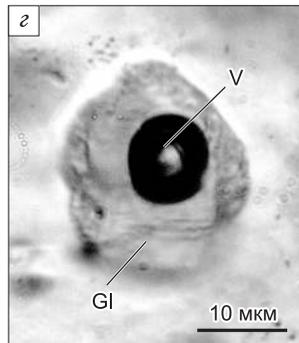
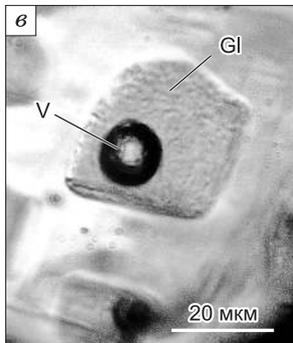
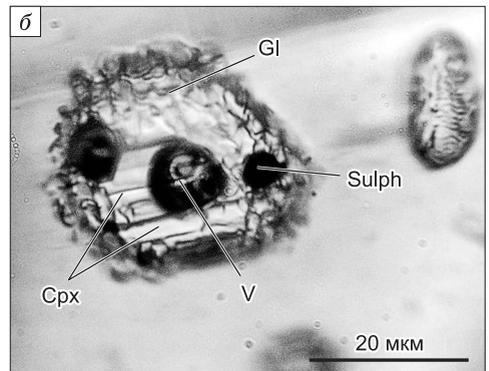
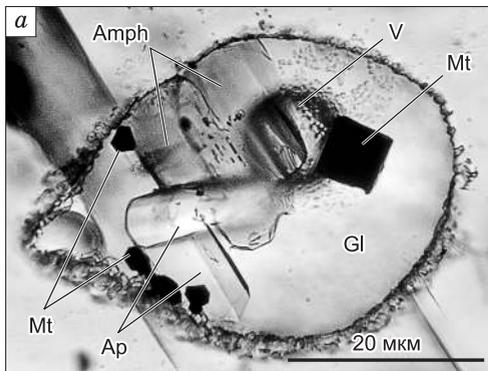


Первичное стекловатое расплавленное включение в ксенокристалле циркона из щелочных базальтов Центрального Вьетнама.

Включение содержит пузырьки высокоплотной CO_2 и окружено ореолом трещинок, что свидетельствует о высоких давлениях в момент захвата. Цир – циркон; $\text{CO}_2\text{ж}+\text{г}$ – флюидное обособление, содержащее жидкую и газообразную углекислоту; ст – стекло; тр – ореол трещинок.

Кристаллы циркона из архейских серых гнейсов трондъемитового состава из Кольской сверхглубокой скважины с глубины 10 780 м.

а – циркон с включением трондъемитового расплава (возраст $2865 \pm 8,8$ млн лет); б – циркон с включением гранитного расплава в ядре (возраст $2831 \pm 3,9$ млн лет) и метаморфической оболочкой (возраст $2761 \pm 8,8$ млн лет). Светлый овал – область SHRIMP-датирования циркона.



Первичное расплавленное включение в клинопироксене (а, г, д), оливине (б) и плагиоклазе (в) из вулканических пород Камчатки.

V – газовая фаза; Gl – стекловатая фаза; Mt – кристаллы магнетита; Amph, Crx – дочерние кристаллы амфибола и клинопироксена; Ap – апатит; Sulph – сульфид.



В конце 1990-х – начале 2000-х годов в лаборатории термобарогеохимии была разработана оригинальная методика по использованию метода ICP-MS для определения концентраций редких, редкоземельных и петрогенных элементов в составе минерало- и рудообразующих флюидов в водных вытяжках. Тогда же в институте появилось оборудование, и начались работы по использованию метода ICP-MS с лазерной абляцией для анализа составов флюидных и расплавных включений.

Еще большую проблему представлял анализ газовой фазы включений в гидротермальных минералах. Н.А. Шугуровой был разработан метод волюмометрического анализа газов, содержащихся в индивидуальных включениях, с помощью селективных поглотителей. Этот уникальный метод позволял оценивать состав газовой фазы включений (Долгов, Шугурова, 1966, 1996; Шугурова, 1968; Захаров и др., 1992; Долгов, 1993; Шугурова и др., 1996; Dublyansky et al., 1996). Из-за сложности и неоднозначности интерпретации его результатов волюмометрический анализ не получил дальнейшего развития, но тем не менее был первым значительным шагом в определении состава газовой составляющей гидротермальных минералообразующих растворов. С появлением в институте приборов для спектроскопии комбинационного рассеяния света (КР-спектроскопии) стало возможным рутинное определение газового состава мельчайших флюидных и расплавных включений в минералах. Сейчас применение этого метода является обязательным в практике термобарогеохимических исследований в ИГМ СО РАН. Используется КР-спектроскопия не только для определения газового состава включений, но и для диагностики дочерних кристаллических фаз и для определения наличия комплексных ионов в растворах. Она сыграла важную роль при изучении включений борнокислых флюидов и включений с высокими содержаниями хлоридов Fe.

Для валового анализа газовой фазы включений в лаборатории термобарогеохимии разрабатывался и совершенствовался метод газовой хроматографии. Н.Ю. Осоргиным был собран усовершенствованный газовый хромато-



Н.А. Шугурова и Л.А. Шохонова на установке для анализа газовой фазы из микровключений в минералах. 1978 г.

граф, оснащенный специальными приспособлениями для термического и механического вскрытия включений (Осоргин, 1990; А. с. 1719967 СССР. 1991 / Осоргин). Газовая хроматография требует особенно тщательного подхода для определения газов, выделяющихся именно из включений, а не с поверхности образца (окклюдированных или сорбированных газов). Проводились специальные исследования для идентификации газовой выделения из включений различных генераций (Осоргин, 1990; Осоргин, Томиленко, 1994; Томиленко и др., 1994). Сначала для этого применялся метод вакуумной декриптометрии, разработанный коллегами из университета в Ростове-на-Дону. Затем он уступил место детальным предварительным исследованиям с применением КР-спектроскопии. В настоящее время метод хроматографического анализа, разработанный Н.Ю. Осоргиным, активно используется для решения самых разнообразных задач термобарогеохимии и экспериментальной минералогии (Лепезин и др., 1983, 1984, 1995; Лепезин, Осоргин, 1992, 1994; Фёдоров и др., 1992; Осоргин, Белицкий, 1995; Осоргин и др., 1995; Шведенков и др., 1995; Сонин и др., 1997; Chernov et al., 1999).

Исследование флюидных включений в минералах золоторудных месторождений (Советское, Эльдorado, Благодатное, Герфедское, Богунаевское и Кузеевское – Енисейский кряж; Жолымбет и Васильковское – Казахстан; Бадран и Алах-Юньский золоторудный узел – Якутия; Сарала и Центральное – Кузнецкий Алатау; Мурунтау – Узбекистан и др.), проводившееся Ю.А. Долговым, А.А. Томиленко и Н.А. Гибшер, позволило сформулировать термобарогеохимические критерии оценки золотоносности кварцевых жил (Долгов и др., 1990, 1991; Dolgov et al., 1991, 1992; Томиленко, Гибшер, 1991, 1992, 1999–2001; Верниковская, Томиленко, 1992; Томиленко и др., 1992, 2004, 2005; Kolonin et al., 1992; Tomilenko, Gibsher, 1993, 1994; Гибшер, Томиленко, 1994, 2003; Gibsher et al., 1999; Гибшер и др., 2001, 2005; Tomilenko et al., 2005, 2010).



Теплая встреча, 1999 г. Слева направо: Л.М. Усольцева, Л.А. Шохонова, Л.И. Панина, И.Т. Бакуменко и С.В. Ковязин



На золоторудных месторождениях, расположенных в метаморфических толщах, кварцевые жилы с промышленными концентрациями Au перемежаются с незолотоносными или слабо золотоносными. Результаты комплексного исследования флюидных включений показали, что кварцевые жилы с низкими и высокими (промышленными) содержаниями золота были образованы в различных условиях. Оказалось, что начальный этап формирования слабо золотоносных кварцевых жил связан с региональным метаморфизмом. Формирование собственно золотоносных кварцевых жил в значительной степени обусловлено масштабной наложенной гидротермальной деятельностью, активную роль в которой играли коровые флюиды, активизированные в глубоких зонах углеродисто-терригенной толщи под воздействием тектоно-магматической активизации и внедрения гранитоидов.

Установленные различия в термобарогеохимических и изотопных характеристиках золотоносных и незолотоносных флюидных систем имеют большое значение для выявления кварцевых жил с промышленным содержанием золота при поисково-разведочных и оценочных работах в метаморфических толщах.

Включения позволяют расшифровывать условия и механизмы не только эндогенных процессов минералообразования, но и процессов, которые протекают вблизи земной поверхности. Изучение включений в минералах карстовых пещер, выполненное Ю.В. Дублянским, позволило определить физико-химические параметры близповерхностных гидротермальных процессов (Hill et al., 1995, 1998; Дублянский, Шамански, 1996; Pashenko et al., 1996; Dublyansky et al., 1997, 2000, 2004, 2005; Пащенко, Дублянский, 1998; Dublyansky, Dublyansky, 1998; Dublyansky, 1999, 2005; Dublyansky, Smirnov, 1999, 2005; Smirnov, Dublyansky, 2001; Dublyansky, Pashenko, 2004; Borsato et al., 2005; Dublyansky, Atudorei, 2005; Dublyansky, Polyansky, 2007; Immenhauser et al., 2007). Полученный им опыт был впоследствии применен при оценке опасности внедрения термальных вод в область предполагаемого хранилища высокоактивных ядерных отходов в горе Яка (Юго-Западная Невада, США).

Результаты исследования включений в галите из карбонатно-соленосных отложений Лено-Тунгусской нефтегазоносной провинции Сибирской платформы позволили С.Н. Гришиной выяснить степень сохранности и преобразования органического вещества при внедрении трапповых интрузий и определить параметры палеогидросистемы, обуславливающей миграцию нефтей (Grishina, 1987; Вожов и др., 1990; Grishina et al., 1992, 1997, 1998, 2007; Гришина и др., 1992; Мазуров и др., 2007; Гришина, Полозов, 2009). Изучение эволюции флюидов при взаимодействии долеритов с солями в карбонатно-соленосных отложениях Сибирской платформы и бассейна Вера (ФРГ) использовалось при построении модели захоронения в солях радиоактивных отходов с тепловыделением (Международный проект «Базальты в эвапоритах», EU project N 148, 1995–1996 гг.) (ФРГ, Испания).



Ю.В. Дублянский

Особое место в истории развития методов термобарогеохимии в ИГиГ СО АН СССР, а затем в ИГМ СО РАН занимает исследование включений в минералах взнезменных горных пород и ударно-метаморфизованных пород метеоритных кратеров.

Ю.А. Долгов вместе с Н.А. Шугуровой впервые в мировой практике исследовали включения в лунном материале, доставленном автоматической станцией «Луна-20» из Моря Изобилия, а также в различных тектитах и молдавитах (Долгов и др., 1969, 1971; Долгов, Шугурова, 1974). С.А. Вишневым были выполнены комплексные геолого-минералогические и геохимические исследования импактитов, благодаря чему в этих породах выявлены парадоксальные ассоциации необычных флюидных включений, которые раскрывают специфику флюидного режима импактитов, и впервые обнаружен целый ряд высокобарических минералов в Попигайской, Карской, Жаманшинской астроблемах, а также в кратерах Рис (ФРГ) и Лонар (Индия) (Вишневский и др., 1974, 1975, 1999, 2010; Пост и др., 1978; Вишневский, Пальчик, 1994; Fiodorova et al., 1994; Vishnevsky, Montanari, 1994, 1999; Vishnevsky, 1996, 2009; Vishnevsky, Raitala, 2000; Vishnevsky et al., 2005, 2009; Вишневский, 2007, 2009; Вишневский, Гибшер, 2009).

Важным направлением современной термобарогеохимии во всем мире является исследование включений в искусственных кристаллах. Знание условий их захвата позволяет разработать наиболее корректные подходы к интерпретации данных, получаемых при изучении включений в минералах. Одна из первых работ в этом направлении проведена еще в 1967 г. И.Т. Бакуменко и опубликована в соавторстве с В.С. Соболевым и С.С. Коляго. Главной задачей этой работы было получение стекловатых расплавных включений в искусственно выращенном диопсиде и изучение их свойств. В начале 90-х годов И.Т. Бакуменко, А.А. Томиленко и С.З. Смирновым выполнены исследования включений расплавов в искусственных кристаллах изумруда, рубина, сапфира и александрита, выращенных из расплава и раствора в расплаве, в результате чего установлены механизмы образования включений при росте кристаллов, особенности распределения вещества в минералообразующей среде, реконструированы процессы изменения включений после их герметизации внутри кристалла (Смирнов и др., 1995, 1997; Smirnov et al., 1996, 1999; Thomas et al., 1997). Позднее, в 1995–1997 гг. аналогичные работы были проведены с использованием искусственных кристаллов берилла и сапфира, выращенных гидротермальным методом.

Оригинальные результаты получены А.А. Томиленко и С.В. Ковязиным на примере расплавных включений в искусственном периклазе, выращенном из собственного расплава. Проведенные ими эксперименты позволили установить факт и параметры диффузионного обмена компонентами между включением и минералом-хозяином (Томиленко и др., 1990, 1992; Tomilenko, Krylova, 1994; Tomilenko, Kovayzin, 1995; Томиленко, Ковязин, 1995; Tomilenko, Kovayzin, 1997).

Используя флюидные включения в искусственном кварце, выращенном в гидротермальных условиях, С.З. Смирнову с соавторами удалось установить особенности химического транспорта бора в щелочных гидротермальных растворах.

Многочисленные работы проводятся в настоящее время совместно с сотрудниками лабораторий, занимающихся экспериментальной минералогией и ростом кристаллов (Tsvetkov et al., 1999; Цветков и др., 1999, 2000; Исаенко



Участники последнего Всесоюзного семинара по термобарогеохимии. Слева направо: В.Б. Наумов (ГЕОХИ АН СССР, Москва), В.А. Симонов, И.Т. Бакуменко, А.А. Томиленко, Д.К. Возняк (Институт геохимии и физики минералов АН УССР, Киев) и ученые из Института геологии и геохимии горючих ископаемых АН УССР (г. Львов). Киев, 1990 г.

и др., 2001; Isaenko et al., 2001, 2005; Smirnov et al., 2005). А.А. Томиленко и С.В. Ковязин совместно с Ю.Н. Пальяновым, А.И. Чепуровым, А.Г. Соколом и В.С. Шацким всесторонне изучили расплавные и флюидные включения минералообразующих сред в гранате, клино- и ортопироксенах, оливине и коэсите, полученных в карбонатных, карбонатно-силикатных и силикатных системах с летучими компонентами (водой и углекислотой) при давлениях от 20 до 70 кбар и температурах от 1300 до 1750 °С на многопуансонном аппарате «Барс» (Cherupov et al., 1998; Сокол и др., 1999; Sokol et al., 2000, 2009; Пальянов и др., 2001; Shatsky et al., 2001, 2005; Чепуров и др., 2010). Экспериментально установлено, что в процессе роста при высоких давлениях и температурах гранат, клино- и ортопироксены, оливин и коэсит захватывают расплавные и флюидные включения, представляющие собой реальные образцы кристаллизационной среды, в которой происходили процессы нуклеации и роста этих кристаллов.

Таким образом, включения минералообразующих сред являются идеальными пробоотборниками вещества, надежно герметизированного внутри минерала-хозяина.

С целью повышения достоверности и полноты информации, которую хранят в себе флюидные и расплавные включения, в лаборатории термобарогеохимии продолжают совершенствоваться старые методы и предлагают новые исследовательские подходы (Томиленко, Фурсенко, 1992; Томиленко, 1992, 2006; Томиленко, Осоргин, 1994; Чупин и др., 1994; Томиленко и др., 1994, 2008; Chupin, Tomilenko, 1995; Tomilenko, Kovyazin, 1995; Свердловка и др., 1999; Dublyansky, 2009).

Микротермометрическое оборудование является ключевым для изучения флюидных и расплавных включений. На заре развития термобарогеохимического направления немалый вклад в создание аппаратурной базы

криометрических исследований внесли Ю.А. Долгов и Л.Ш. Базаров (Долгов, Базаров, 1965; Базаров, 1966, 1968; Долгов, Серебренников, 1968). Микротермокамера для высокотемпературных (до 1500 °С) исследований включений, сконструированная М.Ю. Михайловым и В.С. Шацким, долгое время была главным инструментом для работы с включениями в магматических минералах (Михайлов, Шацкий, 1974). Позже Н.Ю. Осоргин и А.А. Томиленко разработали усовершенствованные модели криокамеры и высокотемпературной термокамеры с возможностью прогрева в инертных средах (А.с. 1562816 СССР. 1990 / Осоргин, Томиленко; А.с. 1592678 СССР. 1990 / Осоргин, Томиленко). В начале 2000-х годов на основе этой камеры А.А. Томиленко, С.З. Смирновым, В.Г. Томасом, Д.А. Фурсенко и А.А. Лешко был разработан автоматизированный микротермометрический комплекс ТК-1500. Он позволяет производить контролируемый нагрев препаратов с включениями в диапазоне температур от комнатных до 1400–1500 °С с возможностью фотодокументации процесса. Совместно с лабораторией экспериментальной минералогии и петрологии создана методика прогрева и гомогенизации расплавных включений под давлением воды с последующим контролем их герметичности методом ИК-спектроскопии. В сотрудничестве с исследовательскими группами Национального центра исследований (CNR, Пиза, Италия), Университета Инсбрука (Австрия) и Университета Нью-Мексика (Альбукерка, США) разработана технология извлечения CO₂ из флюидных включений для изучения изотопного состава углерода и кислорода в минералообразующих растворах.

Одновременно с фундаментальными исследованиями процессов минерало- и петрогенеза, которые протекают в недрах земной коры и верхней мантии, в лаборатории термобарогеохимии ИГМ СО РАН успешно разрабатываются и прикладные аспекты использования флюидных включений. Полученные критерии применяются при поисках и разведке флюоритоносных и хрусталеносных пегматитов, а также различных рудных месторождений. Исследования флюидных и расплавных включений широко используются в экспериментальной минералогии и петрологии, а также при выращивании кристаллов для нужд современной техники.

Новосибирские ученые являются активными участниками ведущих международных форумов, где обсуждаются вопросы, связанные с исследованием включений в минералах: на секциях Международных геологических конгрессов, Конгрессов Международной минералогической ассоциации, Международной конференции им. В.М. Гольдшмидта, Конгрессов EGU, Кимберлитовых конференций, Европейской конференции по современным исследованиям флюидных включений (ECROFI), Панамериканской конференции по современным исследованиям флюидных включений (PACROFI) и Азиатской конференции по современным исследованиям флюидных включений (ACROFI), на различных конференциях IAGOD и Всесоюзных совещаниях по термобарогеохимии. Во многих из перечисленных конференций сотрудники ИГМ СО РАН выступали в качестве организаторов (III Всесоюзное совещание по термобарогеохимии, Новосибирск, 1965; Азиатская конференция по современным исследованиям флюидных включений (ACROFI), Новосибирск, 2010), членов оргкомитетов и приглашенных докладчиков. Сотрудники ИГМ СО РАН являются постоянными участниками Конференции по термобарогеохимии, которая стала преемницей Всесоюзного совещания по термобарогеохимии — крупнейшего на территории Советского Союза форума исследователей флюидных и расплавных включений в минералах.