5.1. ПЕТРОЛОГИЯ МЕТАМОРФИЧЕСКИХ ПОРОД

Н.Л. Добрецов, О.П. Полянский, В.В. Ревердатто

Лаборатория метаморфизма и метасоматоза была создана академиком Владимиром Степановичем Соболевым в первый год организации Института геологии и геофизики СО АН СССР. В ней начинали научную деятельность Николай Леонтьевич Добрецов из Ленинграда, Владимир Викторович Ревердатто из Томска, Елена Николаевна Ушакова, Евгения Александровна Костюк и Владимир Васильевич Хлестов (все из Львова). Основным направлени-

ем исследований лаборатории стал региональный и контактовый метаморфизм, определение *P—T*-условий процессов метаморфизма и изучение фаций метаморфизма.

Первым сотрудникам лаборатории В.С. Соболев поручил разработку ключевых вопросов метаморфической петрологии. Е.Н. Ушакова завершила начатую еще во Львове работу, посвященную петрологии пород гранулитовой фации Побужья — одного из важнейших районов Украинского щита. В.В. Хлестов занялся изучением высокометаморфизованных пород амфиболитовой и гранулитовой фаций Восточного Саяна. Эти исследования он проводил совместно с Л.М. Парфёновым — сотрудником лаборатории геотектоники, который изучал тектоническое положение и деформации высокометаморфизованных комплексов Восточного Саяна. Н.Л. Добрецов получил задание «исследовать проблему жадеита», одного из индикаторных минералов метаморфических пород, образовавшихся при высоком давлении. За короткое время (1960–1962 гг.) ему удалось найти и исследовать жадеитовые породы в ультрабазитах (преимущественно в серпентинитовом меланже) Западного Саяна, Полярного Урала и Прибалхашья. Сам В.С. Соболев совместно с сыном Н.В. Соболевым изучал другие породы высоких давлений — эклогиты, сначала в ксенолитах из кимберлитовых трубок, затем — из метаморфических пород Кокчетавского массива (совместно с Н.Л. Добрецовым и И.А. Ефимовым из КазИМСа). И те, и другие работы в дальнейшем переросли в комплексные исследования пород высоких давлений в земной коре — одну из приоритетных тем лаборатории метаморфизма и метасоматоза. В.В. Ревердатто изучал самые высокотемпературные породы контактового

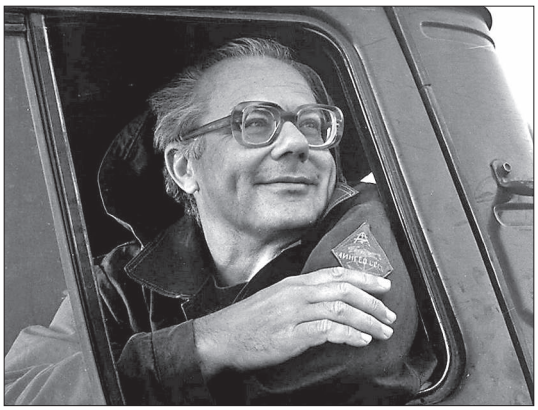
Координация научных направлений в действии. Слева направо: чл.-кор. АН СССР В.А. Кузнецов, академик А.Л. Яншин, чл.-кор. АН СССР Н.Н. Пузырёв, академик В.С. Соболев, чл.-кор. АН СССР И.В. Лучицкий, чл.-кор. АН СССР Э.Э. Фотиади, академик А.А. Трофимук, чл.-кор. АН СССР В.Н. Сакс

метаморфизма — так называемую спуррит-мервинитовую фацию в контакте с траппами. Исходной точкой послужили спуррит-мервинитовые мраморы, найденные и описанные В.С. Соболевым (Соболев, 1935). По результатам вышеупомянутых исследований первые сотрудники лаборатории в 1961–1964 гг. защитили кандидатские диссертации.

Обстановка первых лет работы в лаборатории, как и в целом в Институте геологии и геофизики и новосибирском Академгородке, в 60-е годы была очень дружная, полная энтузиазма, неожиданных открытий, хотя и изобиловала трудностями, о которых ученые рассказывают в своих воспоминаниях.

О своей первой экспедиционной поездке Н.Л. Добрецов написал в 2009 г.: «В мае 1960 г. мне вручили деньги (по записке В.С. Соболева), в отделе снабжения — палатку, два седла и два спальных мешка. Я позвонил в Томск М.И. Юдину, аспиранту Ю.А. Кузнецова, от которого В.С. Соболев узнал о жадеитовых породах в Западном Саяне. От имени В.С. Соболева я предложил М.И. Юдину сотрудничество и совместные полевые работы, но в ответ услышал ядовитое бурчание: "Я не собираюсь ни с кем кооперироваться вокруг одного обнажения". Так я остался один — без сотрудников, партнеров и четкого указания, где работать и что изучать... Единственную зацепку я нашел в книге Г.В. Пинуса и др. "Гипербазиты Алтае-Саянского складчатого пояса" (1958 г.). С Георгием Владимировичем я познакомился на Советской, 20, где размещались первые лаборатории института. Узнав, что я собираюсь ехать на хребет Борус искать где-то в гипербазитах какие-то жадеитовые породы, он подарил мне свою книгу. В ней я нашел ссылки на фондовый отчет В.Д. Томашпольской, описание "пироксеновых скарнов", которые могли оказаться, по моему предположению, жадеитовыми породами. На машине с отрядом тектониста Б.А. Красильникова, внешне похожего на А. Эйнштейна, меня довезли до поселка Майна на берегу Енисея и бросили одного с вьючными седлами и спальными мешками, но я не унывал. Познакомился с местными геологами, а через них — с Петром Белозеровым, охотником и рыбаком, летом работавшим сторожем. Он согласился пойти со мной в тайгу, так как охоты и рыбалки не было, а работать сторожем ему нравилось меньше, чем бродить по тайге. Вдвоем с П. Белозеровым, на двух лошадях (а потом — и без лошадей) мы облазили весь хребет Борус в Западном Саяне и его отроги. Все для меня было новым, необычным. Каждый день поджидали открытия, и я не замечал комаров, клещей, ссадин и тягот таежного быта. К тому же замечательным помощником оказался П. Белозеров. На Енисее, в устье р. Кантемир встретили катер, в котором известный тектонист Ю.А. Косыгин (впоследствии академик) путешествовал вместе с Л.М. Парфёновым... На катере мы вернулись в Майну, и вскоре я снова оказался в Новосибирске. Собранные породы были срочно отданы на анализ, для изготовления шлифов. Лабораторные исследования показали присутствие в породах жадеита и других интересных минералов. И я доложил В.С. Соболеву, что при трудных начальных условиях, но жадеитовые породы были найдены и изучены».

Из воспоминаний В.В. Ревердатто о его первых экспедиционных работах в лаборатории. «По предложению В.С. Соболева летом 1960 г. мне предстояло поехать на р. Нижнюю Тунгуску для изучения проявления контактового метаморфизма вблизи устья речки Анакит, недалеко от Ногинского графитового рудника. Я взял с собой двух парней-десятиклассников в качестве рабочих, ружье, спиннинг, палатку, три спальных мешка, продукты на 2,5 месяца. Резиновую лодку в отделе снабжения института мне не дали по причине дефицита, и это сильно осложнило предстоящую работу. В середи-



Академик В.В. Ревердатто в экспедиции

не июня мы поехали поездом до Красноярска. Денег на экспедицию мне выделили немного, так что воспользоваться авиатранспортом возможности не было. На теплоходе мы доплыли до Туруханска и стали ждать оказии, чтобы плыть по Нижней Тунгуске до Ногинска. Регулярных рейсов судов по реке не было; изредка ходили катера, и только весной по большой воде ходили самоходные баржи. Препятствием являлся Большой порог в низовьях Нижней Тунгуски.

И тут нам повезло: после нескольких дней ожидания, на берегу Енисея мы встретили катер с партией геологов из пос. Ермаково (вблизи Игарки), где тогда находилась Северная нефтеразведочная экспедиция Красноярского геологического управления. Их было человек семь-восемь, возглавлял партию Э.В. Волков, геологом был А.В. Рыльков; они ехали в тот же район, что и мы. Геологи из Ермаково планировали составить карту Анакитского поднятия в месте, которое интересовало и меня; в будущем предполагалось пробурить здесь параметрическую скважину. С ермаковцами я быстро договорился о сотрудничестве, и мы погрузились на катер. 270 км от устья Нижней Тунгуски катер прошел быстро, и на следующий день мы оказались уже на месте. Был конец июня. Интересующий меня район находился на правом берегу Нижней Тунгуски, примерно в 15 км ниже по течению от Ногинского рудника. Свою палатку мы поставили на пологом берегу реки, рядом с обнажением спуррит-мервинитовых мраморов, описанных В.С. Соболевым. Геологи из Ермаково разбили лагерь недалеко от нас. Так как вода в реке стояла довольно высоко, то часть обнажения еще была скрыта. Однако, не теряя времени, я начал работать. Предстояло составить подробную карту обнажения, собрать образцы пород, изучить близлежащие траппы с отбором ориентированных образцов и разобраться с геологическим строением территории. Я детально закартировал Анакитский массив дифференцированных траппов и его контакты с вмещающими известняками и сланцами. В экзоконтактах широко были представлены разнообразные мраморы и роговики, образованные по силурийским и ордовикским породам. По мере падения уровня воды в Нижней Тунгуске, обнажение все более открывалось, и выявлялись новые детали контактового метаморфизма. Чтобы разобраться со строением траппового массива, вскрыть его контакты, пришлось копать шурфы и канавы. Это была тяжелая работа, так как приходилось копать в вечной мерзлоте, и стенки выработок быстро оплывали.

В конце июля я начал ходить в маршруты, чтобы составить карту района. Работа на правом берегу реки не представляла сложности, так как тайга была довольно хорошо проходима, а на возвышенностях леса не было совсем: скалы и курум. На левый берег меня перевозили на дюралевой лодке с мотором геологи из партии Э.В. Волкова, и через несколько дней они же переправляли меня обратно. К концу августа я закончил все работы, согласовал результаты с ермаковскими геологами и поделился с ними своими данными по исследованию траппов. Составленная мною карта поднятия в общих чер-

тах совпадала с картой Э.В. Волкова и А.В. Рылькова. В первых числах сентября вниз по реке мимо нас проходил почтовый катер. Он забрал нас со всем нашим снаряжением и собранными камнями. За проезд до Туруханска капитану катера пришлось заплатить довольно дорого, и на билеты на теплоход до Красноярска нам денег еле-еле хватило. Поэтому в Красноярске пришлось занимать деньги на железнодорожные билеты у знакомых из геолого-съемочной экспедиции. Несмотря на некоторые трудности, в целом состоявшуюся экспедицию можно было считать вполне удачной. Конечно, мне повезло, что я встретил в Туруханске ермаковских геологов. Если бы не их помощь с лодкой, пришлось бы ограничиться работами только на правом берегу реки, перенеся их продолжение на следующий год. Нанимать лодку в Ногинском руднике при моих финансах было бы невозможно. Зимой я детально изучил собранный каменный материал, обнаружив большое разнообразие минералов в мраморах и роговиках; были найдены и новые минералы, не описанные здесь В.С.Соболевым, в их числе тиллиит — первая находка в СССР.

На следующий год я повторил поездку на Нижнюю Тунгуску и собрал дополнительную коллекцию образцов спуррит-мервинитовых пород. Результаты оказались очень интересными: я пришел к выводу, что контактовый метаморфизм на Анакитском поднятии был локализован вблизи подводящего канала базальтовой магмы, что, собственно, и явилось причиной возникновения здесь высоких температур».

Следующая поездка В.В. Ревердатто на Сибирскую платформу оказалась довольно сложной. Вот что он вспоминает. «В 1962 г. В.С. Соболев предложил поискать проявления спуррит-мервинитовых мраморов на р. Подкаменной Тунгуске. Предпосылки для этого состояли в выходах в бассейне этой реки нижнесилурийских карбонатных отложений, подобных тем, что обнажались на Анакитском поднятии, и в обилии трапповых даек и силлов. В качестве первоочередного объекта я выбрал правый приток Подкаменной Тунгуски — речку Кочумдек. Она впадает в Подкаменную Тунгуску примерно в 200 км выше ее устья, недалеко от Кузьмовских порогов. На этот раз у меня было достаточно денег, чтобы оплатить спецрейс Ан-2 (гидровариант) из Туруханска до устья р. Кочумдек. В качестве рабочего со мной поехал сотрудник одного из институтов Сибирского отделения Е. Прокопьев. В Туруханске мы просидели больше недели — ждали, когда нас поставят в план полетов. В начале июля мы вылетели из Туруханска во второй половине дня, но садились еще на дозаправку в Верхне-Имбатском, поэтому долетели до Подкаменной Тунгуски, когда уже сильно смеркалось. Самолет сел на воду в устье какой-то речки, и я в наступивших сумерках не сориентировался, где мы находимся. Я спросил летчиков, где же деревня Кузьмовка, которая должна быть недалеко, выше по течению. Они ответили, что она за поворотом Подкаменной Тунгуски, и улетели. Только утром я понял, что мы сели не в устье Кочумдека, а в устье р. Столбовой, не долетев до места более 50 км.

Через несколько дней ожидания на берегу нас довез до Кочумдека рыбак, проезжавший мимо на моторке. Здесь мы надули свою резиновую лодку — "трехсотку", сложили в нее снаряжение и побрели вверх по берегу Кочумдека. Вода в речке стояла высоко, бечевники были полностью залиты, и нам приходилось тащить лодку по горло в воде, пробрасывая бечеву через прибрежные тальники. Поднимались по реке мы почти четыре дня, изрядно намучившись и промерзнув. Где-то на расстоянии 17–18 км от устья Кочумдек пересекается мощной полого падающей трапповой дайкой. В ее верхнем контакте мы обнаружили мраморизованные известняки со спурритом и мер-

винитом. Бóльшую часть обнажения мы не смогли обследовать, так как она была скрыта водой, но удалось взять образцы контактовых пород и траппов в прибрежных скалах. Можно было бы продолжать наш маршрут дальше вверх по реке, где мы, несомненно, нашли бы другие проявления высокотемпературного метаморфизма в контактах с траппами, но мой напарник-рабочий заболел ангиной. Надо было возвращаться. Мы сели в нашу лодку и поплыли вниз. Высокая вода скрывала пороги и шиверы, и течение быстро донесло нас до устья Кочумдека. Дальше нужно было сплавляться по р. Подкаменной Тунгуске до устья, переправиться через Енисей и добраться до поселка Бор, где находился аэропорт. Течение в Подкаменной было довольно медленное, и до Енисея мы плыли больше недели. По пути мне удалось бегло осмотреть знаменитые «щеки» — мощные обнажения траппов со столбчатой отдельностью вблизи пос. Суломай. Приплыли к устью Подкаменной Тунгуски, где расположен одноименный поселок.

Енисей — река серьезная, ее ширина здесь более полутора километров. Часто дует сильный встречный ветер с низовьев реки, поднимающий крутую волну; движение судов и барж довольно интенсивное. С учетом всего этого я не рискнул самостоятельно переправляться через Енисей на легонькой резиновой лодке. На берегу около поселка Подкаменная Тунгуска мы встретили двух рыбаков с моторной лодкой, которые за пол-литра спирта подрядились переправить нас через Енисей на буксире. До пос. Бор мы доплыли благополучно, сложили свои пожитки во двор к одному из рыбаков и отправились в аэропорт, чтобы узнать о рейсе в Красноярск. Выяснилось, что совсем скоро идет грузовой рейс пролетом из Норильска, и нас могут забрать. Мы купили билеты, оформили багаж и побежали за вещами. Однако пока мы отсутствовали кто-то украл палатку. Оба рыбака дружно отпирались от претензий; нам удалось лишь узнать их фамилии, подробнее разбираться было некогда. Когда мы добрались до дома, я написал письмо о случившемся в Красноярское краевое управление милиции. Осенью я защитил кандидатскую диссертацию по контактовому метаморфизму вблизи траппов на Анакитском поднятии, уложившись в трехлетний срок аспирантуры. В это время пришел ответ из красноярской милиции, где сообщалось о результатах расследования моего дела. Милиционеры "установили" (со слов рыбаков), что палатку у меня не украли, а мы сами ее утопили в реке, переправлявшись пьяными через Енисей. Письмо из Красноярска пришло спецпочтой на первый отдел института. Зам. директора института С.М. Жданов доложил о милицейском письме директору А.А. Трофимуку и приказал взыскать с меня стоимость палатки и казенного спирта, что примерно равнялось моей аспирантской стипендии. Хотя меня шокировала несправедливость и абсурдность ситуации, возражать было бесполезно; деньги в кассу института я внес, но этим история не закончилась.

После защиты диссертации В.С. Соболев предложил мне работать в его лаборатории. Он обратился с просьбой к А.А. Трофимуку включить меня в штат института, как перспективного специалиста, на должность младшего научного сотрудника. Однако Андрей Алексеевич то ли в шутку, то ли всерьез сказал: "Ревердатто? Так он же пьет! И летом в экспедиции он то ли что-то украл, или у него украли?!" Владимир Степанович заступился за меня, и вопрос был решен положительно. Но мне все же нужно было поговорить с директором. Дело в том, что после защиты диссертации меня приглашали работать в Институт вулканологии на Камчатке и в Институт геохимии в Иркутске, и я сомневался, стоит ли мне принимать предложение В.С. Соболева, особен-

но с учетом происшествия с палаткой. При встрече я объяснил Андрею Алексеевичу, как действительно обстояло дело. Он расспросил меня о работе на Нижней и Подкаменной Тунгусках, об Анакитском поднятии (оно особенно заинтересовало его как геолога-нефтяника) и в заключение отметил, что сказанное им В.С. Соболеву не надо воспринимать серьезно. На этом инцидент был исчерпан. С 15 ноября 1962 г. я начал работать в должности младшего научного сотрудника в лаборатории метаморфизма и метасоматоза».

В 1963–1964 гг. В.С. Соболев предложил новую схему фаций метаморфизма, основанную на проводившихся в лаборатории исследованиях и появившихся к тому времени в мировой литературе экспериментальных данных по важнейшим минеральным равновесиям. Она являлась развитием схем метаморфических фаций Эскола, Тернера и Ферхугена. На схеме В.С. Соболева, проградуированной по температуре и давлению, впервые четко выделены фации высокого давления как особая группа. Позже эта схема была уточнена и послужила базой для составления «Карты метаморфических фаций СССР» (1966), первой в мире для большой территории (авторы — Н.Л. Добрецов, В.В. Ревердатто, В.С. Соболев, Н.В. Соболев, Е.Н. Ушакова и В.В. Хлестов, см. статью «От тектоники к геодинамике» в гл. 3). Эти работы были ярким отражением общего физико-химического подхода к петрологии, минералогии и геологии, развивавшегося В.С. Соболевым.

Почти одновременно с исследованиями ключевых типов метаморфических пород сотрудники В.С. Соболева приступили к статистической обработке составов породообразующих минералов. Первыми были работы Н.В. Соболева по гранатам (Соболев, 1962), который защитил кандидатскую диссертацию, выполненную еще во Львове, и в 1964 г. опубликовал монографию «Парагенетические типы гранатов» (Соболев, 1964). Еще раньше вышла статья Н.Л. Добрецова (1959) «О взаимосвязи между главными ионами ромбических пироксенов и их влиянии на оптические свойства минерала», выполненная еще в студенческие годы под руководством профессора А.Б. Вистелиуса.

В продолжение этих работ и во взаимосвязи с проблемами метаморфизма развернулись систематические исследования по парагенетическим типам и составам пироксенов (Добрецов, 1962; Добрецов, Пономарёва, 1964; Dobretsov, 1968), амфиболам (Костюк, 1970; Добрецов, Костюк и др., 1971), биотитам (Ушакова, 1971), чуть позже — по белым слюдам, хлоритам и эпидотам. Для обработки статистических данных были созданы программы для ЭВМ (с участием В.В. Хлестова, Н.Л. Добрецова, М.Л. Шемякина, В.В. Зуенко и др.), которые использовались также для обработки геохимических и петрохимических данных (Добрецов и др., 1964). Результатом стала серия монографий по главным породообразующим минералам — гранатам (Соболев, 1964), амфиболам (Костюк, 1970), пироксенам (Добрецов и др., 1971), биотитам (Ушакова, 1971), хлоритам (Кепежинскас, 1965) и эпидотам (Кепежинскас, Хлестов, 1971).

Статистические методы обработки наблюдений и построение первых вероятностно-стохастических моделей обсуждались на специальном институтском семинаре, организованном в 1965–1970 гг. С.В. Гольдиным и Н.Л. Добрецовым, благодаря чему эти методы и модели стали широко использоваться в институте, да и не только. Особое значение имело их применение для оценки распределения минералов полезных ископаемых и их компонентов с использованием многомерных регрессий и вероятностных моделей. В частности, эти методы использовались для оценки алмазоносности (Добрецов и др., 1966; Добрецов, 1971). Параллельно был подготовлен спецкурс в

Новосибирском университете «Применение вероятностно-статистических методов в геологии» (Добрецов, Маковская, 1967) и практикум «Программы к ЭВМ для статистической обработки геологической информации» (Добрецов, 1972). Эти мероприятия способствовали усилению в институте работ по применению ЭВМ и математических методов, лидерами которых, несомненно, были геофизики. Подробнее об этом сказано академиком М.И. Эповым во введении к гл. 8 «Геофизика».

С учетом составления «Карты метаморфических фаций СССР» (1966) В.С. Соболевым совместно с Н.Л. Добрецовым, В.В. Ревердатто, Н.В. Соболевым и В.В. Хлестовым опубликована серия монографий по фациям метаморфизма: «Фации метаморфизма» (Добрецов и др., 1970), «Фации контактового метаморфизма» (Ревердатто, 1970), «Фации регионального метаморфизма умеренных давлений» (Добрецов и др., 1972), «Фации регионального метаморфизма высоких давлений» (Добрецов и др., 1974). В них обобщены мировые материалы по минеральным ассоциациям и петрохимии метаморфических пород, условиям их образования и распространения, получена принципиально новая информация о составе, строении и развитии земной коры и об эволюции геологических процессов на континентах. Исследованиями обоснована особая роль давления при метаморфизме как независимого фактора образования минералов и пород, даны оценки водного и общего давления для разных условий, показано, что минеральные превращения большей частью осуществляются без изменения валового химического состава пород, т. е. «изохимически». Была разработана оригинальная схема метаморфических фаций, которая характеризовала термодинамические условия образования пород коры и верхней мантии Земли при разных *P—T*-условиях и учитывала требования картирования метаморфических пород на фациальной основе. Прогресс в экспериментальном изучении минеральных равновесий позволил широко использовать эти данные в качестве границ метаморфических фаций. Фация определялась как «*P—T-область метаморфизма, ограниченная линиями нескольких наиболее важных реакций*» (*равновесий*), которые

Работа с керном. Н.Л. Добрецов с коллегами

прослеживаются «*в наиболее распространенных природных составах*», т. е. в метапелитах, метабазитах и карбонатных породах. Дробные подразделения внутри фаций — субфации — делались на основе менее важных минеральных реакций в некоторых составах пород.

Многотомный коллективный труд представлял собой обширную сводку теоретических, геологических и экспериментальных данных по наиболее актуальным проблемам метаморфизма. В монографиях были предприняты шаги в направлении уточнения условий, причин и факторов, определяющих метаморфизм. Большое внимание уделено роли и поведению летучих компонентов, характеру минеральных реакций метаморфизма при разных *P–T*-параметрах. В четырех томах даны описания практически всех значительных проявлений метаморфизма в мире. Помимо этого, в работе содержится статистическое обобщение по составам важнейших метаморфических породообразующих минералов в разных минеральных ассоциациях.

Как сочетание признаков, характеризующих составы протолитов (литологию), условия метаморфизма (на фациальной основе) и тектонику, были выделены метаморфические формации. Они понимались как «*закономерный парагенезис метаморфических пород определенного состава, претерпевших определенный тип метаморфизма*». Формации были специализированы для метаморфизма щитов и срединных массивов, складчатых областей разного возраста и тектонических зон «глубинных разломов». Была прослежена связь метаморфических формаций с теми или иными месторождениями полезных ископаемых. В частности, показано, что при метаморфизме черносланцевых формаций происходит перераспределение рудного вещества, особенно Zn, который входит в состав шпинели и ставролита околорудных метасоматитов. Это продемонстрировано на примере Холоднинского месторождения в Северном Прибайкалье (Добрецов и др., 1979; Волкова, 1981; Тарасова и др., 1981) и черносланцевых формаций Тувы и Западного Саяна (Е.В. Скляров. Автореф. дис. ... канд. геол.-мин. наук. Новосибирск, 1983). Особое значение указанные процессы имеют для образования слюдяных пегматитов, пьезооптического сырья, многих типов золотого оруденения.

В проблеме метаморфизма важную роль занимают вопросы химического изменения пород при привносе вещества — метасоматоза. Это связано не только с необходимостью обосновать границы метаморфических фаций (субфаций) и положение минеральных равновесий в *P–T*-координатах, но и с противоречиями во взглядах на условия реализации метаморфизма, которые существовали в 60–70-х годах между школами Д.С. Коржинского и В.С. Соболева. Ситуация осложнялась тем, что в то время не было достоверных сведений о проницаемости пород, особенностях и масштабах переноса вещества в межзерновом пространстве, кинетике метаморфических реакций и др. Не было ясных представлений и об источниках и составе флюида, вызывающих или участвующих в преобразовании пород. Поэтому процессы метаморфизма и метасоматоза в представлениях геологов подчас смешивались, будучи нечетко разделенными по своим параметрам и следствиям. Особенно наглядно это проявлялось в контактовом метаморфизме и метасоматозе при преобразовании вмещающих пород вблизи магматических интрузивных тел. Сотрудники Д.С. Коржинского, в частности Л.И. Шабынин и Н.Н. Перцев, полагали, что контактовые роговики образуются таким же путем, что и скарны, т. е. путем инфильтрационного метасоматоза с привносом вещества и изменением химического состава пород.

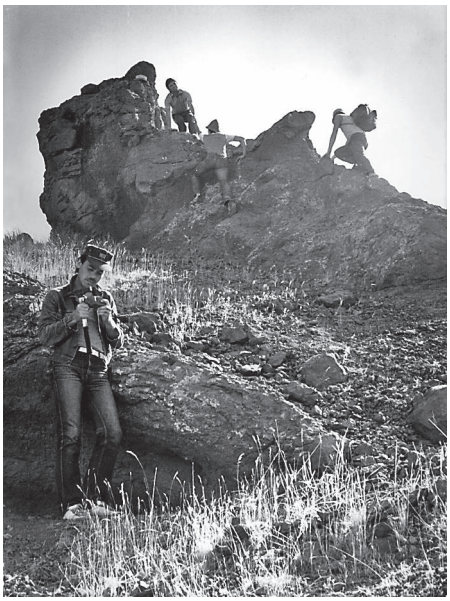
Экспедиция «Кушка-1985». Далеко от «мантии»

Примечательно, что представления В.С. Соболева и его учеников о природе метаморфизма во многом совпадали со взглядами ведущих зарубежных петрологов, таких как Ф. Тернер, У. Файф, Х. Винклер, Х. Цварт, Г. Рамберг, А. Миаширо и др., но с учениками Д.С. Коржинского взаимопонимания не было. Сам Д.С. Коржинский занимал примирительно-нейтральную позицию. В ходе дискуссии с его сотрудниками В.В. Ревердатто в начале 70-х годов предпринял специальные исследования по сравнению химических составов пород ряда контактово-метаморфических ореолов с неметаморфизованным окружением. Эти исследования с использованием статистических методов сравнения выборок показали правомочность гипотезы об отсутствии различия между роговиками и вмещающими породами, что равносильно предположению об изохимическом метаморфизме (Reverdatto et al., 1974). Аналогичную работу по геохимии глаукофанового метаморфизма несколько ранее выполнили Н.Л. Добрецов с соавт. (1967) в рамках дискуссии с А.А. Маракушевым, считавшим, что глаукофановые породы образуются в результате регионального Na-метасоматоза при низких давлениях.

В период работы над томами по фациям и непосредственно перед этим авторы монографий занимались решением проблемы подвижности компонентов при метаморфизме. Эта проблема включала в себя построение многопучковых диаграмм типа Скрейнемакерса с целью анализа вариаций химического потенциала подвижных компонентов: μ_{K_2O}, μ_{Na_2O}, μ_S, μ_{O_2} и др. В частности, вслед за Д.С. Коржинским (1946, 1947) В.С. Соболев в монографии «Введение в минералогию силикатов» (1949) построил диаграммы изменения парагенезисов в зависимости от величин потенциалов щелочей (μ_{Na_2O}–μ_{K_2O}) для магматических пород двух групп — со средней и высокой железистостью. Аналогичные диаграммы (μ_{Na_2O}–μ_{K_2O} и μ_{Na_2O}–μ_{H_2O}) построил Н.Л. Добрецов для метаморфических и метасоматических жадеит-альбитовых пород. Эти диаграммы отражают как вариации валовых составов по-

род, так и соотношение содержаний Na_2O и K_2O в метасоматических (постмагматических) растворах, и они сохранили значение до наших дней.

Иное дело диаграммы μ_{H_2O}–μ_{CO_2}, которые Д.С. Коржинский, а вслед за ним и В.С. Соболев трактовали как отражение влияния температуры и давления. По мнению Д.С. Коржинского, все процессы с поглощением или выделением H_2O совершались в присутствии жидких водных растворов, упругость пара которых зависела только от температуры. До получения экспериментальных результатов это положение казалось правдоподобным. Но по мере накопления экспериментальных данных становилось все более очевидным, что теория и практика применения диаграмм μ_{H_2O}–μ_{CO_2} вступают в противоречие с экспериментом. В.В. Хлестов и Н.Л. Добрецов пришли к выводу, что диаграммы μ_{H_2O}–μ_{CO_2} отражают лишь соотношение содержаний H_2O и CO_2 в составе метаморфических и метасоматических флюидов, и то лишь очень приблизительно, так как в экспериментально исследованных реакциях с участием водных силикатов и карбонатов при переменном соотношении H_2O и CO_2 наблюдаются экстремумы, а при низких температурах (ниже 200–300 °С в зависимости от солености растворов) — распад растворов на водный и водно-углекислый. По этому поводу В.В. Хлестов и Н.Л. Добрецов подготовили большую статью со ссылкой на критику в работе Уэйла и Файфа (Weil, Fyfe, 1964). В.С. Соболев выразил сомнение по поводу справедливости этих выводов и посоветовал отправить статью на отзыв Д.С. Коржинскому. Д.С. Коржинский не стал ничего отвечать, а представил с кратким отзывом статью в «Известия АН СССР», серия геологическая. И статья вышла (Хлестов, Добрецов, 1967), какие бы сомнения ни оставались у двух академиков. Такой объективностью можно только восхищаться!



Экспедиция «Кушка-1985». Наконец дорвались до обнажений

В заключительной части статьи В.В. Хлестов и Н.Л. Добрецов (1967, с. 90) написали: «диаграммы μ_{H_2O}–μ_{CO_2} могут быть построены обычным методом только при допущении $T = \text{const}$ и $P = \text{const}$ и могут отражать только влияние изменения состава раствора в отношении H_2O и CO_2». Однако выводы, получаемые при явно неверном толковании этих диаграмм, в ряде случаев согласуются с наблюдаемыми природными фактами, например, — у А.А. Маракушева... Это связано в основном с двумя обстоятельствами: 1) особенностями построения многопучковых диаграмм с большим числом минералов (с большим числом отрицательных степеней свободы), когда возможно большое число вариантов построения диаграммы, из которых может быть подобран случай, приблизительно отвечающий реальным парагенетическим отношениям; 2) внешним сходством диаграмм в координатах T–P и μ_{H_2O}–P для реакций дегидратации.

Почти одновременно в «Докладах АН СССР» вышли две статьи: «Значение парциального давления H_2O и CO_2 в метаморфических системах» (Добрецов, 1966), в которой была предложена методика расчета минеральных равновесий при переменном соотношении H_2O и CO_2 во флюиде, и «Значение парциального давления H_2O и CO_2 в метаморфических системах» (Соболев и др., 1966), в которой рассматривался опыт применения этой методики для широкого круга реакций, позволяющий оценивать режим H_2O и CO_2 в разных фациях при прогрессивном региональном метаморфизме. Этот опыт и аналогичные расчеты были широко использованы в монографиях по фациям метаморфизма.

Серия монографий по фациям метаморфизма не имела прецедента в мировой геологической литературе. Академик Д.С. Коржинский об этой работе писал: «Коллективный труд авторов не только наметил новые направления в петрологии, но и стимулировал их развитие. Актуальность фундаментального исследования, позволившего выявить ряд закономерностей связи глубинных процессов с образованием полезных ископаемых, трудно переоценить». За четыре тома по «Фациям метаморфизма» (Добрецов и др., 1970, 1972, 1974; Ревердатто, 1970) вместе с «Картой метаморфических фаций СССР» (Добрецов и др., 1966) В.С. Соболев, Н.Л. Добрецов, В.В. Ревердатто, Н.В. Соболев и В.В. Хлестов были удостоены в 1976 г. Ленинской премии.

Монографии явились основой для дальнейшей работы сотрудников лаборатории по выяснению причин приуроченности метаморфических пород соответствующих фаций к определенным тектоническим структурам. Карты метаморфизма дали возможность установить связи между распределением *P—T*-параметров, при которых формировались метаморфические породы, и геологическим строением континентов. Это позволило судить о термодинамических условиях образования метаморфических пород в земной коре. Усилиями геологов был накоплен большой фактический материал по метаморфическим комплексам, однако причины, вызывавшие метаморфизм, за

Лауреаты Ленинской премии СССР. Слева направо: к.г.-м.н. В.В. Хлестов, д.г.-м.н. Н.В. Соболев, академик В.С. Соболев, д.г.-м.н. Н.Л. Добрецов, д.г.-м.н. В.В. Ревердатто. 1976 г.

исключением случаев тесной ассоциации с интрузивными магматическими телами, прогревающими окружающие породы, большей частью оставались неясными. Важный шаг в понимании причин регионального метаморфизма вещества в земной коре сделал 40–50 лет тому назад японский геолог и петролог А. Миаширо, который связал происхождение основных типов метаморфических пород с движениями литосферных плит. Эти представления получили широкое развитие и на основе достижений механики и теории теплопроводности позволили увязать тектонический аспект метаморфизма с динамическими процессами и термическим состоянием литосферы. Геологи пришли к осознанию того, что метаморфизм происходил вследствие геодинамических процессов, состоящих в перераспределении масс и потоков тепла в коре и мантии Земли, которые нарушали сложившееся термодинамическое равновесие. Таким образом, метаморфизм стал рассматриваться как «индикатор» геодинамики, и это позволило сформулировать проблему современной петрологии, состоящую в том, чтобы выявить взаимосвязи метаморфизма с теми или иными геодинамическими процессами.

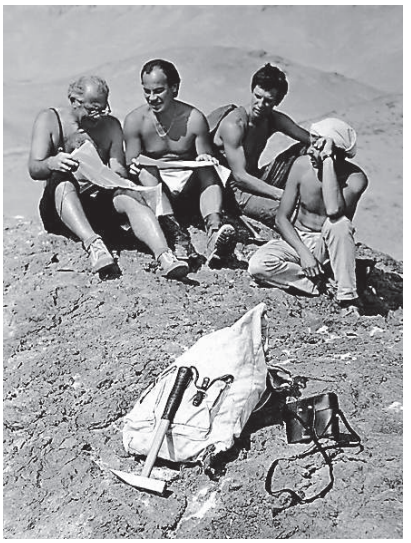
В.В. Ревердатто и В.С. Шеплев (1998) на основе величин геотермических градиентов разработали классификацию геодинамических процессов метаморфизма, в которой выделяются: 1) типы, явившиеся результатом привноса дополнительного тепла интрузиями магмы; 2) типы, вызванные опусканием земной коры, накоплением и нагреванием осадков; 3) типы, связанные со сталкиванием литосферных плит, надвиганием их друг на друга и глубоким погружением (субдукцией). Они различаются по геологическим признакам и длительности процессов, а также *P*—*T*-параметрами и особенностями их эволюции.

Одним из важнейших направлений в течение многих лет были исследования явления метаморфизма, вызванные интрузиями магмы. Этой проблеме посвящены многочисленные работы (Ревердатто, 1970; Reverdatto et al., 1970, 1972, 1974; Reverdatto, Kalinin, 1980, 1982). В.В. Ревердатто с коллегами средствами математического моделирования изучил процессы контактового метаморфизма и зонального метаморфизма умеренных давлений. В моделях анализировался кондуктивный и конвективный теплоперенос (фильтрующимся флюидом) в контактах интрузивных магматических тел, учитывались тепловые эффекты на подвижных границах фазовых переходов при плавлении/затвердевании и метаморфизме пород. В результате исследований получены варианты распределения температуры в охлаждающихся магматических интрузивах и их окружении во времени. Установлено, что температуры метаморфизма и ширина метаморфической зональности определяются составом и температурой интрузивной магмы, размерами интрузивного тела и глубиной его становления (иначе говоря — начальной температурой окружающих пород). Сделан вывод, что формирование зонально-метаморфических пород умеренных давлений происходило главным образом вследствие глубинного магматического тепла, передаваемого кондуктивно; теплоперенос фильтрующимся флюидом играл резко подчиненную роль. Показано, что анатектические расплавы в соседстве с основным интрузивным телом, благодаря более низкой температуре плавления, могут сохранять мобильность даже после затвердевания базальтовой магмы. Кислые расплавы, залегающие под плотными основными породами, гравитационно неустойчивы. В этой ситуации следует ожидать перераспределения вещества в земной коре в связи с погружением тяжелых вышележащих пород, всплыванием гранито-гнейсовых диапиров и интрузиями гранитной магмы. Недавним дости-

жением коллектива метаморфистов института является выяснение природы метаморфической зональности Коннемара в Ирландии и Тонгулакского хребта на юге Алтая, которые, как показано при математическом моделировании, возникли под действием глубинных магматических тепловых источников (Ананьев и др., 2003; Reverdatto, Polyansky, 2004).

Оценено влияние магматического тепла на генерацию и дегенерацию углеводородов вблизи траппов. Тепло неглубинной интрузивной базальтовой магмы может способствовать нефтегазогенерации в осадках, содержащих рассеянное органическое вещество. В то же время термическое действие базальтов на уже сформированные нефтяные залежи не приводит к полному «разрушению» последних, но сопровождается изменением состава нефти (Ревердатто, Меленевский, 1983, 1986). Это имело большое значение при обнаружении нефтяных месторождений на Сибирской платформе. Изучена конвекция воды и нефти с учетом фазовых переходов в слоях пористых пород вблизи пластовых интрузивных тел базальтовой магмы; показана неизбежность дифференциации нефти с обогащением ее легкими фракциями (Polyansky et al., 2002).

В лаборатории выполнен обширный цикл работ по метаморфизму накапливающихся осадков в рифтогенных структурах при расширении/растяжении литосферы. Исследована известная модель Д. МакКензи, предполагающая растяжение, расширение и утонение литосферы, подъем горячей астеносферы, восстановление изостатического равновесия, последующее охлаждение и термическую контракцию. В рамках математического моделирования проанализированы три варианта конечного растяжения литосферы: «мгновенное», ускоренное и с постоянной скоростью. Установлено, что для грубых оценок динамики погружения впадин и эволюции теплового потока с успехом может быть использована модель, допускающая «мгновенное» конечное растяжение литосферы. Реалистичность этой грубой модели подтверждается хорошим совпадением расчетов с реконструируемой по строению осадочного разреза в известных рифтовых бассейнах динамикой тектонического погружения. В рамках моделирования оценены скорости прогибания земной коры и вычислены температуры метаморфизма осадочных пород для рифтовых впадин Северного моря, Датского, Уэльского, Енисей-Хатангского и Кузнецкого бассейнов. Сделан вывод, что обычно (в фанерозое) растяжение (расширение) литосферы при рифтогенезе составляло 30–50 %, глубины впадин — 6–9 км, температуры пород в основании впадин достигали уровня пренит-пумпеллиитовой субфации, редко — уровня фации зеленых сланцев. Однако возможны исключения, связанные главным образом с древними рифтами, где температуры пород могли быть значительно более высокими. Результаты исследований имеют отношение к поискам осадочных месторождений полезных ископаемых, особенно углеводо-

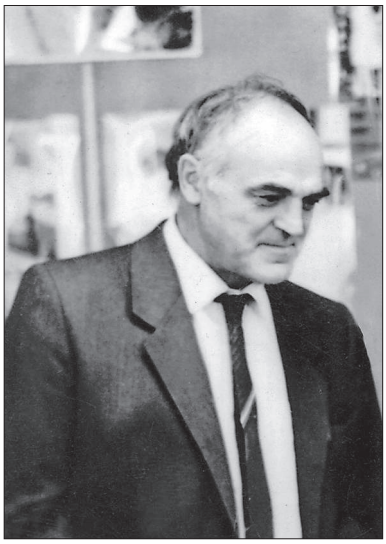


Сверка маршрутов. Кушка, 1985 г. Слева направо: В.В. Ревердатто, И.И. Лиханов, О.П. Полянский, В.Ю. Колобов

родов (Ревердатто и др., 1995; Sheplev, Reverdatto, 1998; Robinson et al., 1999; Polyansky, 2002; Полянский и др., 2004). В этом направлении нужны дальнейшие исследования, особенно для обширных бассейнов, в связи с появлением альтернативных моделей (А.В. Артюшков и др.) и необходимостью переходить к трехмерным построениям на основе сейсмостратиграфии.

Важную часть работ составили исследования в области коллизионного метаморфизма с использованием математического моделирования (Likhanov et al., 2004; Коробейников и др., 2006). В заангарской части Енисейского кряжа выделено несколько участков коллизионного метаморфизма, где при росте давления в протерозойских метапелитах происходило замещение андалузита кианитом, что объяснялось надвиговой тектоникой. Сформулированы общие признаки коллизионного метаморфизма. В их числе: деформация пород и развитие бластомилонитов, низкий геотермический градиент (не более 12 °С/км), постепенное повышение давления вблизи надвига и др. Обоснование этого процесса осуществлено в рамках модели тектонического утолщения земной коры в результате быстрого надвига с последующим быстрым подъемом и эрозией. Надвигание блоков пород осуществлялось со стороны Сибирского кратона в зонах региональных разломов или в результате встречных движений в зоне оперяющих разломов более высокого порядка. Получены первые Ar-Ar-данные изотопного возраста биотитов из метапелитов кординской свиты сухопитской серии. Эти оценки с учетом скорости эксгумации пород указывают на то, что кульминационная стадия метаморфизма кианит-силлиманитового типа происходила не ранее 848–851 млн лет (Лиханов и др., 2007), т. е. повторный наложенный метаморфизм умеренных давлений имеет неопротерозойский возраст. На основе геолого-петрологической информации было выполнено компьютерное моделирование процесса надвига, который по своим параметрам подобен одному из тех, что инициировали зональный коллизионный метаморфизм в заангарской части Енисейского кряжа. В результате расчетов оценены величины перемещения материала и получены картины деформированных конфигураций надвигаемой плиты в разные моменты времени. Получены также картины распределения напряжений в те же моменты времени. При условии отсутствия эрозии и сохранения всех разрушенных элементов сдвигаемой толщи происходило деформирование, «скучивание» и значительное поднятие крайней левой части верхнего слоя плиты, при этом осуществлялась эксгумация пород с глубины не менее 15 км. Модельные расчеты показывают, что за 50 млн лет фронт надвига продвинулся не менее чем на 25–30 км (Лиханов и др., 2008).

В рамках исследований по парагенетическому анализу были выявлены новые типы фазовых равновесий и установлены важные закономерности в изменении набора минеральных парагенезисов в зависимости от вариаций физико-химических условий образования железисто-глиноземистых метапелитов, что позволило выяснить причины появления и особенности развития редких минеральных парагенезисов (Likhanov et al., 2001; Лиханов, 2003). В итоге на основе синтеза петрологических данных, экспериментальных калибровок минеральных реакций и термодинамических расчетов границ и областей устойчивости фазовых равновесий с использованием термодинамических баз данных для минералов переменного состава была построена петрогенетическая решетка нового поколения для железисто-глиноземистых метапелитов, учитывающая влияние железистости и глиноземистости валового состава пород и некоторых компонентов-примесей минералов на характер минеральных реакций (Лиханов, Ревердатто, 2005).



В.С. Шеплев

Одним из приоритетов современной метаморфической петрологии являются исследования по кинетике метаморфизма. Инициативу в этом направлении проявили В.В. Хлестов, В.В. Ревердатто, Г.Г. Лепезин, позже В.С. Шеплев. Они начали изучение зональных минералов и зональных реакционных структур на границах между контрастными по химическому составу минеральными зернами или агрегатами, а также – преобразования мелкозернистой основной ткани (матрикса) пород и др. Было показано, что концентрационные профили компонентов в минералах могут отражать не только их первичное распределение при росте, но и диффузионное перераспределение при наложенных событиях, при полиметаморфизме. Неполнота фазовых превращений, сохранение реликтов, структурно-текстурные особенности метаморфических пород и реакционные соотношения позволили в ряде случаев составить представление о характере массопереноса и эволюции метаморфизма, в том числе о вариациях *P* и *T* во времени. В.С. Шеплевым с коллегами (Шеплев и др., 1991, 1992; Ashworth, Sheplev, 1997; Ashworth et al., 1998; Шеплев, 1998; Sheplev et al., 1998) развита теория Коржинского–Фишера–Джостена, найдено аналитическое решение математической модели диффузионного метасоматоза, произведен анализ образования возможных минералогических типов в составе биметасоматической зональности в системах SiO_2–MgO–CaO, SiO_2–Al_2O_3–MgO–$Na_2Ca_{5/2}O$, SiO_2–Al_2O_3–FeO–MgO–K_2O–Na_2O, SiO_2–Al_2O_3–FeO–MgO–CaO–Na_2O и др.; получены также оценки относительной диффузионной подвижности химических компонентов, выведены формульные выражения для характеристик растущей минеральной зональности и критерий термодинамической устойчивости зональности на основе энтропийного принципа, развит метод термобарометрии и др.

Другие исследования дали возможность определить масштабы перераспределения вещества и подвижность химических компонентов в матриксе на основе расчетов материального баланса с использованием составов и количеств новообразованных и реликтовых минералов. На ряде примеров показано, что массоперенос при метаморфических реакциях происходил при сохранении баланса вещества (за исключением летучих компонентов) в пределах объемов от сотых долей кубических миллиметров до нескольких кубических сантиметров в зависимости от длительности, степени метаморфизма и интенсивности деформации (Ревердатто, Колобов, 1987; Likhanov et al., 1994, 1995, 2001; Лиханов, Ревердатто, 2002).

С использованием оригинальной методики и аппаратуры, разработанной Г.Ю. Шведенковым, выполнены эксперименты с неоднородными породами при повышенных *P* и *T*. Эти эксперименты дали возможность исследовать метаморфические реакции и массоперенос в условиях реальной (низкой) проницаемости. В перспективе они откроют путь к определению длительности метаморфизма на основе оценки масштабов минеральных взаимодействий. Прогресс в этом направлении связан с продолжением экспе-

риментального и теоретического моделирования. В экспериментах для карбонатно-силикатных пород скорость роста зональности была оценена величиной между 10^{-12} и 10^{-11} м/с (Шведенков и др., 2006). Результаты теоретического и экспериментального моделирования согласуются с новейшими экспериментальными оценками коэффициентов диффузии по границам зерен в минеральных агрегатах при соответствующих *P–T*-параметрах.

Г.Ю. Шведенков

Г.Г. Лепезиным и В.В. Хлестовым (2009) показано, что обмен веществом в архейских неоднородных (полосчатых) породах при региональном метаморфизме (температуры пика метаморфизма 780–800 °С, давление — около 7 кбар) происходил на расстоянии 6–15 см вблизи контакта. Длительность метаморфизма, включая прогрессивную и регрессивную стадии, составляет около 11 млн лет. Распределение химических элементов между взаимодействующими блоками разного минерального состава характеризуется типично диффузионными профилями параболического типа, которые возникли при метаморфизме на контакте изначально неравновесных сред. По способу массопереноса такие образования могут считаться продуктом изохимического метаморфизма, поскольку химический состав породы в целом (в пределах образца) не изменялся.

Широким фронтом проводились исследования по выяснению природы протолитов метаморфических пород. Эти работы можно считать развитием исследований по метаморфическим формациям, о которых говорилось выше. С использованием мирового материала определены геохимические различия «мантийных» и «коровых» перидотитов и пироксенитов высоких/сверхвысоких давлений. Показано, что «мантийные» перидотиты и пироксениты сохранили геохимические признаки пород, имеющих мантийное происхождение, и характеризуются относительно повышенными содержаниями MgO, Cr и Ni и пониженными содержаниями FeO, TiO_2, Zr, Nb, Sm, La, Yb и суммарного содержания редкоземельных элементов. Они, по всей вероятности, внедрялись в форме мантийных расплавов в глубоко погруженную литосферу при субдукции. «Коровые» перидотиты характеризуются относительно высоким содержанием FeO, TiO_2, Zr, Nb, Sm, La, Yb и суммы РЗЭ и сравнительно низким содержанием MgO, Cr и Ni. По-видимому, они представляли собой субвулканические базиты, внедренные в верхнюю часть земной коры до субдукции, метасоматизированные и позже метаморфизованные при глубоком погружении в мантию (Ревердатто и др., 2008). Хорошим примером таких «коровых» метаультрабазитов/метабазитов являются гранатовые и шпинелевые перидотиты/пироксениты Кокчетавского массива, образованные, возможно, при метаморфизме хлоритовых сланцев и хлоритизированных базальтов (Ревердатто, Селятицкий, 2005).

Была изучена геохимическая специфика железисто-глиноземистых пород в отношении главных и редких элементов — индикаторных для выяснения особенностей формирования их протолита. Установлено, что железисто-глиноземистые метапелиты Енисейского кряжа и Кузнецкого Алатау

представляют собой переотложенные и метаморфизованные продукты докембрийских кор выветривания каолинитового типа, а петро- и геохимические различия между ними обусловлены главным образом разными условиями формирования. Образование протолита метапелитов тейской и сухопитской серий Енисейского кряжа происходило за счет размыва постархейских комплексов пород преимущественно гранитоидного состава и накопления в окраинно-континентальных мелководных бассейнах в условиях гумидного климата. Геохимические характеристики более глубоководных исходных отложений амарской свиты Кузнецкого Алатау указывают на доминирующую роль в области эрозии вулканогенного материала основного состава. Существенные геохимические отличия между разновозрастными метаморфическими образованиями юго-западного обрамления Сибирского кратона отражают характер эволюции верхней континентальной коры в докембрии, свидетельствующий о вовлечении в область эрозии новообразованной ювенильной мафической коры в среднем рифее и венде. Установленные различия в распределении редкоземельных элементов в метапелитах разных зон обусловлены как химической неоднородностью первичного субстрата, так и прогрессивными по давлению минеральными реакциями коллизионного метаморфизма, с преобладающим влиянием того или другого процесса на различных этапах эволюции пород (Лиханов и др., 2006, 2008; Likhanov, Reverdatto, 2007, 2008).

Геохимическое изучение глаукофановых сланцев Центрально-Азиатского складчатого пояса (Уймонской зоны Горного Алтая, Чарской зоны Восточного Казахстана и Куртушибинского пояса Западного Саяна), ставшее продолжением более ранних работ (Добрецов, 1974; Добрецов и др., 1989), показало, что исходными протолитами для них служили океанические базальты, формировавшиеся из обогащенного мантийного источника и сопоставимые с обогащенными толеитами океанических плато (E-MORB, P-MORB) или со щелочными базальтами океанических островов (OIB). Метаморфические сланцы, образовавшиеся за счет толеитовых базальтов типа N-MORB, встречаются в высокобарических комплексах в подчиненном ко-

Экспедиционный «Урал». Вброд через реку после дождя

личестве. Оценка составов мантийных источников изученных метабазальтов показала наличие деплетированного и рециклированного компонентов, что свидетельствует об активности плюмового магматизма в раннепалеозойской эволюции Палеоазиатского океана. Анализ геологических структур и вещественного состава высокобарических комплексов Центрально-Азиатского складчатого пояса подтвердил, что большинство глаукофансланцевых поясов южного обрамления Сибирского кратона сформировались в интраокеанической преддуговой обстановке, т. е. при погружении океанической плиты под островную дугу, в отличие от эклогитов и голубых сланцев Северного Китая, формирование которых большей частью связано с субдукцией под микроконтиненты гондванского типа. Ar-Ar-методом по фенгитам и натровым амфиболам были получены изотопные даты возраста высокобарического метаморфизма для глаукофановых сланцев Уймонской зоны Горного Алтая — 490–485 млн лет (Волкова и др., 2005), высокобарических включений в серпентинитовом меланже Чарской зоны Восточного Казахстана — 450–449 млн лет (Волкова, Скляров, 2007; Волкова и др., 2008) и глаукофановых сланцев Куртушибинского пояса Западного Саяна — 470–465 млн лет (Волкова и др., 2008). Полученный ордовикский возраст метаморфизма для глаукофановых сланцев южного обрамления Сибирского кратона согласуется со временем формирования многих глаукофансланцевых поясов Китая и обширного коллизионного пояса (Добрецов, Буслов, 2008). Многочисленные изотопно-геохронологические данные свидетельствуют о том, что в это время на огромной территории Центральной Азии произошли крупные аккреционно-коллизионные события, которые привели к амальгамации террейнов различного происхождения, эксгумации высокобарических пород, затуханию островодужного вулканизма и обширному формированию молодой континентальной коры (Volkova, Budanov, 1999; Волкова и др., 2001; Volkova et al., 2004). Эти работы служили продолжением и детализацией более ранних исследований Н.Л. Добрецова и др. (Добрецов, 1974; Добрецов и др., 1967, 1972, 1978).

Большое внимание в работах лаборатории уделялось пирогенному метаморфизму — это самостоятельный тип близповерхностного термометаморфизма осадков, тепловым источником которого выступает энергия горения ископаемого органического вещества. По температуре поле образования пирометаморфических пород простирается вплоть до ~1500 °С. Пирогенные породы отличаются необычно высокой минералогической продуктивностью, они содержат десятки редких и новых минеральных видов. Структура кристаллохимических сообществ пирогенных систем достаточно проста. Здесь возникают только ангидритные соединения, преобладают тугоплавкие оксиды, алюминаты, ферриты, простые силикаты, а также галогензамещенные сложные соли (Пирогенный метаморфизм, 2005; Sokol et al., 1998, 2002). Кайнозойские процессы спонтанного горения залежей каустобиолитов естественным образом вовлечены в планетарные циклы обращения углерода, и это сместило исследовательские интересы из области минералогии в область геологической обусловленности пирогенных событий (Sokol, Volkova, 2007). Установлены причины и тектоническая приуроченность, изучено геологическое строение и дана минералого-петрографическая характеристика пород для некоторых пирогенных комплексов. Первая из них связана с угольными пожарами (Кузбасс, Курайская впадина в Горном Алтае, Рават в Таджикистане), вторая — с горением природного газа (комплексы древних грязевых вулканов формации Хатрурим, Израиль, Иордания и современная

Керченско-Таманская провинция). На основе этих данных впервые были реконструированы сценарии пирогенных событий в пределах угленосных и нефтегазоносных формаций. Впервые доказано, что масштабные пожары сопровождают ранние стадии орогенеза, когда в зону аэрации массово выводятся свежие угленосные или битуминозные толщи. Обоснован и на примере объектов дислоцированной периферии Кузбасса практически реализован оригинальный алгоритм $^{40}Ar/^{39}Ar$-датирования времени возгораний (Новиков и др., 2008). Обосновано применение пирогенных пород в качестве индикаторов древних провинций грязевого вулканизма и связанных с ними резервуаров углеводородов (Сокол и др., 2008). Пирогенные породы вследствие их устойчивости при выветривании и хорошей сохранности могут рассматриваться в качестве перспективного критерия при поисках месторождений углеводородов.

Дальнейшее развитие исследований по метаморфической петрологии в Институте геологии и минералогии СО РАН имеет значительные перспективы. Они состоят, прежде всего, в изучении геодинамической обусловленности (причин) метаморфизма с помощью средств математического моделирования, в определении природы протолитов метаморфических пород с целью геодинамических реконструкций, в исследованиях кинетики метаморфизма для оценки его длительности и масштабов массопереноса, уточнения моделей геодинамических процессов на основе изучения метаморфических пород (например, высокобарических пород) для уточнения моделей субдукции.