РАЗВИТИЕ МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

и их связь с учением о полезных ископаемых

АКАДЕМИЯ НАУК СССР

ОТДЕЛЕНИЕ ГЕОЛОГИИ, ГЕОФИЗИКИ И ГЕОХИМИИ



A. J. Peterman

549+550.4
553.

РАЗВИТИЕ МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

и их связь с учением о полезных ископаемых

К 100-летию
со дня рождения
академика
А. Е. ФЕРСМАНА

3928

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НАУКА»
МОСКВА 1983

Институт Геологических Наук

УДК 550.4/553.4

В 1983 г. исполняется 100 лет со дня рождения выдающегося минералога и геохимика, а также одного из главных основателей учения о геохимии полезных ископаемых академика Александра Евгеньевича Ферсмана. В ознаменование этой даты издается настоящий сборник. Он составлен из статей наиболее крупных советских геохимиков и минералогов. В книге освещены вопросы развития прикладной геохимии и то новое, что дало для понимания законов этой науки изучение Луны и других космических тел, а также роль эксперимента в современной геохимии. Дана трактовка пегматитового процесса и условий образования полезных ископаемых, связанных с этим процессом. Большое внимание уделено современному состоянию учения о полезных ископаемых и особенно неметаллических полезных ископаемых, экономическому значению того или иного полезного ископаемого.

Редколлегия

академик Ф. В. ЧУХРОВ (ответственный редактор),
В. Л. БАРСУКОВ, Г. И. ГОРБУНОВ, Д. С. КОРЖИНСКИЙ,
В. В. ИВАНОВ, Б. И. КОГАН, В. П. ПЕТРОВ

Р 1904020000—238
042 (02)—83 205—83—II

© Издательство «Наука», 1983 г.

ПРЕДИСЛОВИЕ

Академик Александр Евгеньевич Ферсман, столетие со дня рождения которого исполняется 8 ноября 1983 г., широко известен как выдающийся минералог и геохимик — настойчивый и проницательный исследователь минеральных богатств нашей страны, неутомимый путешественник, блестящий популяризатор геологических знаний.

По разносторонности интересов, обширности знаний, богатству, глубине и смелости мысли А. Е. Ферсман принадлежит к плеяде замечательных деятелей русской и советской науки.

Свою научную деятельность А. Е. Ферсман начал задолго до первой мировой войны, но по-настоящему его дарование развернулось после Великой Октябрьской социалистической революции. Именно в советское время А. Е. Ферсман внес огромный вклад в геологическую науку, им были написаны обобщающие монографии по общей и региональной геохимии, проведены обширные экспедиционные работы на Кольском полуострове и в Средней Азии, на Урале и в Забайкалье.

Энергичная деятельность А. Е. Ферсмана получила высокую оценку еще в 1919 г. со стороны академиков В. И. Вернадского, А. П. Карпинского и А. Н. Крылова; в их отзыве читаем: «В лице А. Е. Ферсмана наша страна имеет одного из наиболее талантливых минералогов, прекрасного знатока минералов вообще, энергичного исследователя часто очень трудных для изучения, так называемых неблагодарных минеральных образований, не привлекающих исследователей ни внешней красотой, ни определенными ясно выраженными кристаллографическими признаками, исследователя минералов в различных направлениях, выясняющих их близкие отношения к другим отраслям знания, их генезис и их роль в области, отмечаемой теперь иногда названием «геохимия». Увлеченный интересом к научному изучению природы, А. Е. Ферсман, превосходно владеющий даром ясного и красноречивого изложения, вносит это

увлечение не только в среду своих учеников, но нередко и сотоварищей по науке» (Александр Евгеньевич Ферсман: Материалы к библиографии ученых СССР. Сер. геол. наук. М.: Наука, 1964, вып. 19, с. 21).

В феврале 1919 г. в возрасте 35 лет А. Е. Ферсман был избран действительным членом Академии наук и одновременно занял должность директора Минералогического музея Академии. В продолжение многих лет Александр Евгеньевич вел большую и плодотворную организационную работу в Академии наук и ее филиалах.

Научное наследие А. Е. Ферсмана, отражая большой размах и редкостную продуктивность его научной деятельности, служит и еще долго будет служить одной из основ развития минералогии, геохимии и сопредельных геологических наук в нашей стране. В предлагаемом сборнике освещены развитие и состояние идей выдающегося естествоиспытателя и пламенного патриота, нашего талантливого соотечественника А. Е. Ферсмана.

УДК 549

Ф. В. ЧУХРОВ, Н. В. ПЕТРОВСКАЯ

РАЗВИТИЕ ИДЕЙ А. Е. ФЕРСМАНА В СОВРЕМЕННОЙ МИНЕРАЛОГИИ

Немногие исследователи первой половины XX в. оставили столь ценное и обширное научное наследие, как академик А. Е. Ферсман (свыше 1500 статей и заметок, серия монографий). Его научные интересы охватывали проблемы геохимии, минералогии, петрологии, учения о месторождениях полезных ископаемых, их поисков и технологии минерального сырья. Однако главными в жизни Александра Евгеньевича были два взаимосвязанных направления исследований — геохимическое и минералогическое. Достойный ученик и преемник В. И. Вернадского, он обогатил минералогию идеями «геохимии геопроцесса», а основу всех геохимических построений видел в минералогических данных. В этом смысле Александр Евгеньевич во всех своих работах действительно был «прежде всего минералогом» [20, с. 4].

Поражает разнообразие объектов минералогических исследований А. Е. Ферсмана: таковы минералы пегматитов, гранитов, щелочных пород, драгоценные и цветные камни различного генезиса, минералы глин, мраморов, каменноугольных отложений и др. Большое внимание А. Е. уделил магнезиальным силикатам, цеолитам, минералам урана, полевым шпатам, кварцу. Уровень характеристики и выводы об условиях их образования и в наше время не утратили своей ценности.

А. Е. Ферсман был не только выдающимся исследователем, но и блестящим популяризатором минералогии. Его книги о значении камня в истории материальной культуры, о путях изучения и практического использования минералов получили широкую известность как в нашей стране, так и за рубежом.

В краткой статье невозможно в полной мере осветить значение научного наследия А. Е. Ферсмана для современной минералогии; мы остановимся лишь на некоторых из многочисленных вопросов, постановка или разработка которых тесно связана с его деятельностью.

Положение минералогии в естествознании. В работах Александра Евгеньевича подчеркиваются тесные связи минералогии не только с геохимией, но также и с физической химией. В этих

связях он видел как бы вершины треугольника, граничащего с полями действия других наук — общей геологии, физики, биологии, изучения космоса [21, с. 24]; в настоящее время представления о тесных связях и взаимопроникновении разных наук стали общепризнанными. Их развитию способствовало широкое внедрение в минералогию физических методов, использование данных физической химии и физики твердого тела для изучения структур минералов, изоморфизма в них, неоднородности минеральных индивидов. Идеи А. Е. Ферсмана о космическом веществе пополнились данными космической минералогии, изучающей продукты внеземных процессов.

На современном этапе развития минералогия охватывает широкий круг объектов, земных и космических.

Особое значение имеют высказывания А. Е. Ферсмана о необходимости тесных связей минералогии и геохимии. В последние годы это положение получило общее признание, что отразилось в координированной разработке геохимических и минералогических приблем рудогенеза, источников рудного вещества, метасоматоза и метаморфизма (работы Д. С. Коржинского, Л. Н. Овчинникова, В. Л. Барсукова, В. И. Рехарского, И. Д. Рябчикова и др.).

Важнейшей задачей развития минералогии А. Е. Ферсман считал усиление в ней генетического направления. Хотя Александру Евгеньевичу, как и последующим поколениям минералогов, была ясна важность накопления фактических сведений о минералах, он подчеркивал необходимость не останавливаться на констатации фактов, а исследовать их природу. Работы А. Е. Ферсмана стимулировали формирование генетической минералогии как крупного раздела науки о минералах. Ее проблемам стали посвящаться многочисленные статьи, появился ряд специальных монографий.

Понятие «минерал». В трактовке понятия «минерал» А. Е. Ферсман придерживался взглядов В. И. Вернадского; он относил к минералам все «независимые части земной коры любого агрегатного состояния, обладающие химической и физической однородностью», а также тела космического происхождения. Примечательны пояснения к условию однородности минералов, которое «принимается лишь в особых пределах, так как сложные изоморфные постройки, абсорбционные системы, коллоидальные смеси — все это создает такие колебания в составе и такие отклонения от точных стехиометрических отношений, что понятие о минеральном виде, несомненно, оказывается гораздо менее устойчивым, чем понятие о виде в области наук биологических» [21, с. 26].

Подчеркнутая А. Е. Ферсманом сложность понятий «минерал» и «минеральный вид» и условность их определений подтверждается материалами не прекращающейся дискуссии. Продолжают существовать разные взгляды на принадлежность к минералам некристаллических веществ, продуктов внеземных

процессов и т. п. Их обсуждению были посвящены специальные совещания, организованные в 70-х годах Всесоюзным минералогическим обществом, и многочисленные публикации. Большинство минералогов склонны рассматривать минералы как природные кристаллические образования, относительно однородные по составу и структуре; в иных агрегатных состояниях вещества природного происхождения (газы, жидкости) не относятся к минералам, хотя остаются важными объектами исследований.

Сохраняют свое значение высказывания А. Е. Ферсмана об условности выделения минеральных видов в рядах изоморфных соединений. Продолжают накапливаться данные, позволяющие определять степень индивидуальности членов таких рядов. Остается в полной мере справедливым мнение А. Е. Ферсмана [18], согласно которому нельзя подойти чисто формально к разделению изоморфных рядов и других сложных образований.

Требуют уточнения представления о положении в классификации минералов политипов. В настоящее время количество достоверно установленных минеральных видов превышает 3000, т. е. количество, которое А. Е. считал предельным «в доступной нам земной коре». Однако скорость роста числа минералов все увеличивается, в 3—4 раза превышая ту, которая отмечалась А. Е. Ферсманом (70—80 против 20—25 открытий в год). По-видимому, предельное число минералов будет существенно превышать указанное А. Е. Ферсманом. Предпосылкой открытия многих новых минеральных видов является все более широкое использование минералогами новых физических методов изучения вещества.

Как и предсказывал Александр Евгеньевич, сложность определения понятий «минеральный вид» и «минеральная разновидность» сказывается на разработке основ их систематики. Наиболее широкое признание получила двухступенчатая классификация минералов: по химическому составу (что близко к идее А. Е.) — на первой ступени и по типам структур — на второй. Этот принцип был принят при составлении первого в СССР справочника «Минералы», обобщающего мировой опыт минералогических исследований. Его тома уже служат настольными книгами минералогов и других специалистов. В этом труде в характеристиках минеральных видов широко использованы результаты изучения минералов СССР; выполняется долг советских минералогов, о котором писал А. Е. Ферсман, призывая к обобщению отечественных материалов по минералогии [19].

Кристаллические структуры минералов. Вдохновленный идеями кристаллохимии начала 30-х годов, Александр Евгеньевич дал расширенное определение задач этой науки, подчеркнув, что к их числу, помимо выяснения законов образования кристаллов, относится изучение связи между химическим составом и физическими свойствами, влияния расположения атомов

на химический состав кристаллического вещества, а также влияния химического состава на расположение в нем атомов (ионов). Важным вкладом в развитие кристаллохимической минералогии явилась разработка А. Е. Ферсманом вопросов энергии кристаллических решеток минералов. Кристаллическая решетка — это «некоторая энергетическая единица, устойчивость которой определяется соответствующим энергетическим эффектом при ее образовании» [21, с. 95]. В более поздний период структурные исследования получили развитие в блестящих работах академика Н. В. Белова и его учеников.

В настоящее время успешно разрабатывается общая теория кристаллического поля, базирующаяся на данных тонких физических методов, таких, как мессбауэровская и рамановская спектроскопии, электронный парамагнитный резонанс (ЭПР), ядерный магнитный и квадрупольный резонансы (ЯМР, ЯКР), рентгеновский эмиссионный и фотоэлектронный методы и т. д. Ведется изучение электронных структур минералов, взаимодействия в них атомов и атомных группировок, а также свободных радикалов, определяются структурные позиции примесных и других центров, их электронная конфигурация; совокупность вопросов, решаемых рядом физических методов, получила несколько условное название «физики минералов».

По-новому освещены данные, характеризующие энергию кристаллических решеток. С позиции квантовой механики оцениваются вклады энергии электрон-электронных, электрон-ядерных и ядерно-ядерных взаимодействий. Выявлены слабые, средние и сильные кристаллические поля, различающиеся по состоянию ионов с разными электронными оболочками. Разработана методика расчетов энергии решетки кристаллов [29, 8] и произведены ее определения для ряда минералов. Обращают на себя внимание данные, полученные для политипных модификаций мусковита: показана энергетическая выгодность образования в конкретных условиях политипа 1M по сравнению с политипом $2M_1$ [10]. Выявлена энергетическая неэквивалентность кремнекислородных тетраэдров в гетерогенных силикатных системах [5]. Расчеты энергии кристаллической решетки минералов используются при исследовании координации ионов, в частности водорода, магния, вольфрама, ориентации молекул воды и во многих других случаях.

В связи с анализом энергии кристаллических решеток рассматриваются упорядоченные и неупорядоченные структуры природных твердых растворов, а также упорядоченные скопления точечных дефектов в кристаллах. Типы дефектов и их структурные позиции в минералах изучаются ограниченно, но это направление исследований обещает быть плодотворным. Данные о влиянии дислокаций широко используются в теории роста кристаллов, а их взаимодействие и перемещение считаются определяющими механизм деформаций кристаллов и развития в них трещин.

Интересовавшие А. Е. Ферсмана вопросы полиморфизма минералов в настоящее время значительно углубились, в первую очередь благодаря обнаружению многочисленных представителей политипных модификаций минералов разных классов — силикатов, сульфидов, интерметаллических соединений и самородных металлов. Создана теория политипии, совершенствуются ее методы [6].

При изучении структур минералов исследователи все шире используют материалы и выводы теории кристаллизации и физики твердого тела, которые, в свою очередь, во многом пополняются благодаря изучению структур природных кристаллических веществ. Например, уже давно открытые в минералах мозаичные субструктуры кристаллов стали активно изучаться специалистами, работающими в других областях, а установленные ими закономерности развития мозаичности (влияние степени пересыщения растворов, скорости кристаллизации, роль примесей и т. п.) используются при интерпретации минералогических данных.

Вопросы неоднородности минералов. Неоднократно упоминается в работах Александра Евгеньевича неоднородность выделений минералов. Ему принадлежит вывод о подавляющем количестве в природе неоднородных агрегатов, зонарных и пойкилитовых структур, смесей, образовавшихся при разрушении минералов, и т. д. В качестве примеров смесей рассматривались выделения водных магнезиальных силикатов, впервые полно охарактеризованных А. Е. Ферсманом [20].

Последующие работы, с применением узколокальных физических методов, особенно электронной микроскопии в сочетании с методами микродифракции электронов и энергетической дисперсии, дали новые доказательства широчайшей распространенности явлений неоднородности минеральных индивидов и агрегатов. Например, электронно-микроскопические исследования выявили ультратонкие зоны роста в индивидах самородного золота, пирита, арсенопирита, касситерита и других минералов. Во многих случаях определены различия состава таких зон; выявлены пятнообразные сгущения в них примесей и микровключения различных минералов, нередко синтаксические. Неоднородность агрегатов характерна для выделений минералов эндогенного происхождения; весьма обычна она у продуктов гипергенеза (окислы железа, окислы марганца, глинистые минералы и др.). Полученные данные опубликованы во многих статьях и тематических сборниках, в частности в сборнике «Вопросы однородности и неоднородности минералов» [3]. В свете новых данных пересматриваются прежние представления о составе минералов и изоморфных замещениях в них [25]. Например, некоторые сложные сульфиды (сульфосоли) оказались смесями нескольких минеральных фаз. Предпринимаются попытки генетической систематизации проявлений неоднородности минералов с выделением ее прото-, син- и эпигенетических форм [14].

Совокупность исследований по неоднородности минералов отвечает требованиям уточнения общих знаний о минеральных видах и служит решению задач генетической минералогии.

Изоморфизм в минералах. Александр Евгеньевич был одним из первых минералогов, оценивших огромное значение явлений изоморфизма в минералах. Углубленное изучение изоморфных замещений началось лишь в первой половине XX в. Этому в существенной мере способствовали труды В. М. Гольдшмидта и В. И. Вернадского, ранние работы А. Е. Ферсмана. Позднее, в четырехтомной монографии «Геохимия» [21] в главе «Учение об изоморфии», развивая положение о типизации изоморфных рядов элементов, он предложил выделять, помимо «нормальной изоморфии», эндокриптию, дав их четкие определения [21, т. 3, с. 129]. Анализируя проявления изовалентного и гетеровалентного изоморфизма, А. Е. показал их связи с положением элементов в периодической системе Менделеева. Не потеряли своего значения суждения А. Е. Ферсмана об ограниченной смесимости ряда соединений и о факторах изоморфизма, в частности о температурных условиях, влияющих на изоморфную емкость минералов.

В настоящее время учение об изоморфизме находится на новой ступени своего развития. Все более широкими становятся комплексы методов, служащих целям этого учения; используются локальный рентгеноспектральный и рентгеноструктурный анализы, мессбауэровская и инфракрасная спектроскопия, методы ядерного квадрупольного и электронного парамагнитного резонанса. Применяются также методы магнитостатические (для изучения примесей Fe, Mn, Cr, V), осколковой радиографии (для примеси урана), изучаются электрические, оптические и другие свойства. Впервые установлена возможность достоверного определения позиций ряда примесных атомов в кристаллических решетках минералов; показано, что при гетеровалентном изоморфизме одни и те же элементы могут одновременно занимать разные позиции, нередко участвуя в катионных и анионных подрешетках. Примесные центры разных типов возникают при замещении Ca^{2+} на TR^{3+} и F на O^{2-} в гранатах, шеелите, флюорите и других минералах [2].

Высокочувствительные методы спектрального и атомно-абсорбционного анализов показали, что элементы-примеси, присутствующие в небольших количествах во многих минералах, более разнообразны, чем представлялось ранее, и могут исчисляться десятками. Большая их часть образует микровключения собственных минералов или входит в состав капсюлированных газов и жидкостей — реликтов минералообразующих флюидов. Например, примеси Fe, Mn, Ti, W, Ta и Nb в касситерите оказались в основном связанными с ультрамелкими выделениями минералов — тапиолита, ильменорутила, вольфрамита, колумбита—танталита; только часть указанных элементов, а также V, Cr, In и др. входят изоморфно в структуру касситерита.

Тонкие примеси других минералов были установлены при изучении многих сульфидов. Например, примесь меди в пирите большей частью связана с микровключениями минералов меди [28], хотя экспериментально доказана возможность вхождения этого металла в структуру пирита при высоких давлениях; предполагается, что атомы меди могут занимать стабильное положение при частичном замещении серы мышьяком. Данные о примесях в сульфидах обобщены Н. Н. Мозговой [11].

Обилие в минералах механических примесей, многие из которых являются эпигенетическими, заставляет пересматривать представления об изоморфной емкости минералов. Минералы—твердые растворы, возникнув при определенных физико-химических условиях минералообразования, при их изменении, в отсутствие стабилизирующих факторов, оказывались неустойчивыми и распадались с образованием новых минеральных фаз. Распад характерен для многих природных изоморфных смесей, в том числе для образующихся в системах Zn—Cu—S, Ti—Fe—Al—O и др. Даже в низкопробных разновидностях самородного золота, считающегося твердым раствором Au—Ag с неограниченной смесимостью этих металлов, обнаружены признаки распада с четким обособлением новой фазы состава Au—Ag и чистого серебра [15].

Формируются концепции, относящиеся к постепенному упорядочению и к распаду твердых растворов, а также к вопросам о формах нахождения примесей в минералах, занимающих промежуточное положение между изоморфными и механическими смесями [2].

Условия образования и преобразования минералов. Неизменный интерес А. Е. Ферсмана к вопросам генезиса минералов отражается во всех его работах — от наиболее ранних статей [17] до классической монографии «Пегматиты» [22]. Минералы и их ассоциации рассматриваются в них как продукты закономерного развития минералообразующих систем, а поля устойчивости минералов — как функции менявшихся физико-химических условий. А. Е. Ферсман при изучении пегматитов показал различие минеральных парагенезисов, возникавших в разные периоды, которые он назвал «геофазами». Пути сравнительного анализа разновозрастных минеральных ассоциаций и генераций минералов, а также схемы их последовательного формирования оказались весьма плодотворными для выяснения генезиса пегматитов (работы К. А. Власова, А. И. Гинзбурга, Г. Г. Родионова и др.) и длительно формировавшихся гидротермальных рудных месторождений (исследования А. Г. Бетехтина, О. Д. Левицкого, Н. В. Петровской, Т. Н. Шадлун и др.).

Представления А. Е. Ферсмана о главных факторах минералогенеза в общих чертах близки к современным; в своих работах он называл в качестве таких факторов состав минералообразующих сред, соотношения масс участвующих в них элементов, термодинамические параметры процессов. Вместе с тем

А. Е. указывал на недопустимость упрощенного использования в минералогии известного правила фаз Гиббса, подчеркивая трудность и даже невозможность полного учета зависимостей минералообразования от многих факторов, а также отсутствие истинного равновесия для продуктов многих природных химических реакций. Разные стороны этой важной проблемы позже были рассмотрены Д. С. Коржинским, В. А. Жариковым, А. А. Маракушевым.

Несомненный интерес представляют высказывания А. Е. Ферсмана о роли коллоидов в минералообразовании. Он считал, что эта роль резко повышается в зоне гипергенеза, где химические реакции в основном протекают быстро при низких давлениях и низких или слабо повышенных температурах [20, с. 524]. Александром Евгеньевичем отмечалось отсутствие резкой границы между коллоидными и кристаллическими веществами, поскольку состав коллоидов «весьма часто приближается к стехиометрическому» [там же, с. 525]. В дальнейшем к исследованию коллоидных систем были привлечены методы рентгеноструктурного анализа и электронной микроскопии, доказавшие существование многих квазиколлоидных образований, состоящих из ультрамелких кристаллических частиц. Наряду с этим появилось понятие о рентгеноаморфных веществах, возникающих в разных условиях и нередко метастабильных. Получены данные, свидетельствующие об участии коллоидных фаз в гидротермальном рудообразовании. Коллоидно-дисперсными оказались системы включений одних минералов в других, в частности самородного золота в сульфидах. Много нового о роли коллоидов в минералообразовании обещают дать исследования продуктов современной гидротермальной деятельности (работы С. И. Набоко, Л. М. Лебедева и др.).

Глубоко справедливы суждения А. Е. Ферсмана о закономерностях эпигенетических преобразований минеральных веществ. Примечательны следующие его слова: «каждый минерал устойчив лишь в строго определенные моменты своего существования» [20, с. 131], т. е. при определенных физико-химических условиях; их изменение неизбежно вызывает изменение его состава, структуры, свойств. Эти положения в наше время представляются очевидными, но в начале века они лишь начинали утверждаться в сознании исследователей.

Александра Евгеньевича интересовали соединения, возникающие как промежуточные продукты реакций минералообразования или процессов изменения ранее образовавшихся минералов. Обладая малой стабильностью, они «постепенно переходят в более определенные минеральные виды или распадаются на неоднородный агрегат» [21, т. 3, с. 672]. Такие образования А. Е. Ферсман считал особым видом природных соединений и предложил для них название «мутабильные». По современным представлениям, длительность существования природных кристаллических веществ и их изменчивость не являются условием,

определяющим их принадлежность к минералам. Поэтому «мутабильные» образования, обладающие достаточной однородностью, правильнее рассматривать как особую группу «минералов-эфемеров» [26]. Изучение их реликтов и реконструкция природы исчезнувших фаз важны для понимания реакций в минералообразующих системах. Пути для этого могут быть разными — от аналогий с экспериментально изученными реакциями в растворах разного состава до поисков следов минералов-эфемеров в природных образованиях. Существенную роль в этом плане могут играть исследования осадков современных гидротерм, фумарол, минерализованных вод и рассолов, в которых непрерывно возникают и затем могут преобразовываться сульфиды, кремнезем, окислы железа и марганца, карбонаты и т. д. Возникновение таких минералов зависит от температуры, pH и Eh растворов. В ряде случаев, как, например, при образовании гидратов окиси железа, сказывается влияние бактериальной деятельности и других биогенных факторов. Минералы-эфемеры могут быть обнаружены и при изучении гидротермальных руд. К ним в какой-то части, вероятно, относятся остатки газово-жидких растворов, капсюлированных в жильном кварце и в других гидротермальных минералах. Их исследования начались только в последние десятилетия; особенно плодотворным было использование электронной микроскопии в сочетании с микродифракцией электронов и энергодисперсионным анализом [1]. С разработкой проблемы преобразования минералов под действием различных факторов связано пополнение и углубление знаний о процессах эволюции минерального состава земной коры, в том числе о метаморфизме пород и руд. Исследования, которые ведутся разными путями, во многих случаях позволили выявить различия состава минералов и их структуры, а также минеральных парагенезисов на разном удалении от зоны наиболее активного воздействия метаморфизующих агентов (например, от экзоконтактовой зоны интрузива). Эмпирические закономерности проверяются и дополняются результатами экспериментов и теоретических расчетов. Исследуются возможности полиморфных превращений в процессе перекристаллизации (пример — переход вюртцита в сфалерит); признаки такого перехода установлены методами рентгеновской дифракции по широким диффузным рефлексам обратной решетки. Экспериментально подтверждается существенная роль диффузии при изменении состава минералов и при распаде твердых растворов.

Типоморфизм минералов. В последние десятилетия стало очевидным весьма большое значение идей А. Е. Ферсмана, относящихся к типоморфизму минералов. Их воплощением явились четкие определения этого понятия, впервые данные в широкой трактовке А. Е. Ферсманом в его монографии «Пегматиты». До этого термин «типоморфизм», предложенный в начале XX в. Ф. Бекке, использовался в более узком смысле —

для обозначения типичных минералов метаморфических пород и несколько позднее — при характеристике минералов месторождений разных формаций.

По А. Е. Ферсману, типоморфными являются минералы, «занимающие по тем или иным причинам определенное место в геохимическом процессе и потому отвечающие тому, что в исторической геологии мы называем руководящими ископаемыми» [22, с. 296]; чаще типоморфными являются отдельные особенности минералов (их состав, содержание примесей, окраска, облик кристаллов). Эти положения, ставшие классическими, не сразу привлекли должное внимание, хотя А. Е. Ферсман убедительно показал их значение на конкретных примерах. Лишь в 60—70-х годах они были как бы заново переосмыслены и легли в основу работ, открывающих собой новый этап развития генетической минералогии [24]. Возрождение интереса к типоморфизму минералов было связано с поиском более достоверных индикаторов генезиса пород и руд, а также оценочных признаков минеральных месторождений. Определенную роль сыграла инициатива минералогических коллективов ИГЕМ АН СССР и затем Всесоюзного института минерального сырья (ВИМС) Министерства геологии СССР. В настоящее время проблемой типоморфизма минералов в той или иной мере занимаются десятки научно-исследовательских институтов АН СССР и АН союзных республик, а также институтов Министерства геологии СССР. Проведены два межотраслевых совещания, опубликованы сотни статей и ряд монографий по типоморфизму минералов, в первую очередь промышленноценных — самородного золота, магнетита, касситерита, вольфрамита, сульфидов Fe, Cu, Pb, Zn, Bi и др.

Развитие представлений о типоморфизме привело к расширению этого понятия и его использованию не только минералогами. Исследователи рудных месторождений применяют его для обозначения характерных представителей рудных формаций и типичных минеральных ассоциаций определенных стадий рудообразования; литологи называют типоморфными фации определенных пород. В свете новых данных попытки отдельных исследователей вернуться к узкому значению слова «типоморфизм» представляются своего рода анахронизмом. С этими попытками связаны малообоснованные предложения дополнительных понятий «типохимизм», «типохроматизм». Столь же неоправданными являются высказывания об ограниченности задач исследований типоморфизма получением статистических данных, характеризующих типичные для тех или иных условий особенности минералов. Содержание учения о типоморфизме на современном этапе определяется прежде всего глубоким анализом зависимостей состава, структуры, свойств и формы выделений минералов от факторов минералообразования. Именно поэтому в разработке проблем типоморфизма все большее значение приобретают целенаправленные эксперимен-

ты, тесно связанные с изучением природных минеральных систем.

Широкое признание значения понятия «типоморфизм» позволяет относить к учению о типоморфизме вопросы, решаемые методами минералотермометрии и минералобарометрии. Эти вопросы рассматриваются в печати и обсуждаются на многих совещаниях. Проводимые исследования не только увеличивают количество «минералогеотермометров», но и вносят существенные коррективы в их использование. Доказано, что рассматриваемые как индикаторы температуры особенности состава ряда минералов зависят и от других факторов, в частности от характера входящих в них примесей. Показано несовершенство геотермометра Офтедаля (по содержанию скандия в биотите), сфалеритового геотермометра Куллеруда, полевошпатового — Барта [16]. В качестве индикаторов температуры и давления стала использоваться зависимость от этих факторов распределения некоторых элементов между генетически взаимосвязанными, «сосуществующими» минералами (работы Т. Ф. Барта, А. А. Маракушева, Л. Л. Перчука, В. С. Соболева и др.). Это относится, в частности, к магнезиальности сосуществующих клинопироксена и граната [12], распределению примесей в парах сульфид—окисел и сульфид—сульфид [9]. Об относительно низких и медленно снижавшихся температурах при минералообразовании позволяет судить степень упорядоченности в распределении примесей в некоторых минералах, например в диоктаэдрических слоистых силикатах [7, 10].

Большое внимание уделяется минеральным индикаторам кислотности и щелочности растворов и их окислительных и восстановительных свойств. Одним из примеров служат исследования, подтвердившие возможность перехода кубической модификации ZnS в гексагональную с повышением кислотности растворов при относительно низких температурах и высоком окислительном потенциале среды. Структуры распада титаномагнетита, как показали экспериментальные исследования, зависят от парциального давления кислорода, однако на них также влияет и температура [1]. Аметистовая окраска кварца, связанная с образованием в его структуре дефектов при замещении кремния трехвалентным железом, может служить показателем высокого окислительного потенциала; понижение щелочности благоприятно для ослабления дымчатой окраски у кварца.

В связи с проблемой типоморфизма минералов несомненный интерес представляют данные о зависимости габитусных форм кристаллов минералов от степени пересыщения растворов. Аналогичная зависимость отмечена для высоты микроступеней рельефа граней кристаллов, для форм расщепленного и дендритного роста индивидов и т. д. Гранные формы и облик кристаллов могут служить показателями состава минералообразующих сред в разных зонах рудных полей, т. е. могут использоваться

при исследовании зональности оруденения. На многочисленных примерах доказывается типоморфное значение деталей структуры минералов — «структурного типоморфизма», по В. А. Франк-Каменецкому [23].

Целям разработки проблемы типоморфизма минералов стали служить методы масс-спектрометрии. Еще в 20—30-х годах А. Е. Ферсман, чуткий ко всему новому, обратил внимание на необходимость углубленного изучения изотопного состава минералообразующих элементов [21, т. 3, с. 64]. В тот период намечались лишь некоторые закономерности, управляющие природным фракционированием изотопов. Вскоре различия изотопного состава серы, кислорода, углерода стали использоваться как показатели разного времени и условий минерало- и рудообразования, формационной принадлежности месторождений, источников рудогенного вещества и т. п. [27]. В последние годы в ИГЕМ АН СССР и в некоторых других отечественных и зарубежных институтах началось изучение изотопного состава элементов, не только входящих в кристаллическую структуру минералов, но и находящихся в заключенных в тех же минералах газах и жидкостях.

Круг исследований по типоморфизму непрерывно расширяется. Появилось много новых данных по типоморфизму полевых шпатов, турмалинов, гранатов, апатита, берилла, слюд, глинистых минералов; выводы А. Е. Ферсмана об их типоморфных особенностях находят все новые подтверждения. Постепенно создается целостное учение о типоморфизме [24]. Результаты исследований по типоморфизму минералов все шире используются в практике геологических поисков, разведки и оценки минеральных месторождений [4].

Топоминералогия. А. Е. Ферсман не раз подчеркивал «совершенно исключительное значение» топоминералогии, т. е. минералогии отдельных областей, для развития минералогии в целом [19, с. 15]. Результатами его участия в многочисленных научных экспедициях и командировках явились новые данные о минералах Кольского полуострова, Подмосковья, Кавказа и Закавказья, Урала, п-ова Челекен, Средней Азии, Казахстана, Сибири, Монголо-Охотского пояса. По инициативе Александра Евгеньевича начала издаваться многотомная монография «Минералы СССР», главным редактором которой он был. К сожалению, после выхода в свет первых томов эта работа была прекращена. В последние десятилетия интерес к региональной минералогии стал усиливаться. Достаточно упомянуть издание четырехтомного коллективного труда «Минералы Узбекистана» (1975—1977 гг.), монографий, посвященных минералогии Хибин (1978 г.), Закарпатья (1965 г.), Донецкого и Криворожского бассейнов (1975—1978 гг.). Значение опубликованных трудов трудно переоценить. Они создают основы для широких минералогических обобщений и уточнения знаний об отдельных минеральных видах и их генезисе. Накапливаются

данные о влиянии региональных геологических и геохимических особенностей на вариации состава и свойств минералов. Намечаются методы топоминералогических исследований разных масштабов — от детального минералогического картирования рудных тел и месторождений [13] до топоминералогических характеристик провинций.

Поразительна практическая значимость региональных минералогических исследований А. Е. Ферсмана. Широко известно значение его прогнозов в открытии крупнейших апатитовых месторождений на Кольском полуострове, в расширении сырьевых ресурсов флогопита, мусковита, редких металлов, драгоценных камней. Ко многим предположениям Александра Евгеньевича еще не раз будут возвращаться исследователи и разведчики минеральных месторождений.

О путях развития минералогии. Характеризуя перспективы минералогии, Александр Евгеньевич высказывал убеждение, что она является «самой старой наукой о Земле и ее веществе» [19, с. 10], которая еще в начале века стояла на пороге новых научных течений. Высказывание А. Е. Ферсмана можно рассматривать как предвидение состояния минералогии в середине века, когда широкое использование новых физических методов открыло невиданные ранее возможности выявления тончайших деталей структуры и состава минералов, а тщательные минералогические наблюдения и экспериментальные исследования обеспечили создание надежных основ для интерпретации получаемых данных.

3928

Научная дальновидность А. Е. Ферсмана сказалась и в формулировании основных направлений минералогических работ, остающихся актуальными. Среди них были отмечены: «1) Изучение природы минерала как сложной химической и физической системы, тесно зависящей от кристаллической структуры, условий образования... и от энергетики кристаллизации. 2) Всестороннее изучение свойств минералов на основе методов современной физики, химии и техники. 3) Изучение образования минералов в земной коре. 4) Изучение сочетания минералов в природе — законов парагенезиса и постановка проблем региональной минералогии» [19, с. 12]. В дополнение упоминались проблемы прикладной минералогии и метеоритики.

В настоящее время, в дополнение к намеченным Александром Евгеньевичем направлениям исследований по минералогии, решаются задачи уточнения полей устойчивости минеральных видов в разных геологических условиях, создаются математические модели процессов минералообразования, проводится все более глубокий анализ особенностей этих процессов. Выполняется указывавшаяся А. Е. Ферсманом и другими учеными задача расширения комплекса методов исследований минерального вещества. Помимо упомянутых выше методов электронной микроскопии, электронографии, ЭПР, ЯМР, ЯКР, мессбауэровской и рамановской спектроскопии, масс-спектрометрии, мно-

гое обещают дать методы электронной микроскопии высокого разрешения, искровой масс-спектрометрии, лазерного спектрального анализа. Недалеко время, когда в минералогии будут применяться некоторые методы голографии.

Работы по синтезу минералов, значение которых подчеркивал А. Е. Ферсман, создают основы для новых отраслей промышленности, производящей искусственные минералы, в том числе «самоцветы». Развитие прикладной минералогии становится все более важным фактором в повышении эффективности поисковых и разведочных работ. По минералам-индикаторам успешно ведутся поиски месторождений. Ставится задача выявления новых видов промышленного минерального сырья.

Среди задач, сформулированных А. Е. Ферсманом, укажем и те, которые относятся к организации минералогических работ. Александр Евгеньевич призывал к «объединению разрозненных минералогов в Союзе», к организации в Москве отделения Всесоюзного минералогического общества, к «налаживанию печатания минералогической литературы» [19]. В настоящее время Московское отделение Всесоюзного минералогического общества объединяет более 600 членов, имеет ряд специализированных комиссий, проводит научные конференции. ВМО имеет также отделения на Украине, Урале, в Сибири и на Дальнем Востоке, в союзных республиках. Деятельностью отделений руководит совет Общества. Возрастает общий объем минералогических публикаций. Наряду со старейшим журналом — «Записки Всесоюзного минералогического общества» — с 1979 г. в Киеве стал издаваться «Минералогический журнал». Публикуются минералогические сборники и монографии, посвященные отдельным минералам.

Приведенные данные характеризуют лишь отдельные фрагменты общей картины развития идей А. Е. Ферсмана, но и они показывают, что минералогия в Советском Союзе идет по пути, намеченному классиками учения о минералах, к числу которых относится наш замечательный соотечественник академик Александр Евгеньевич Ферсман. Его минералогические труды не стареют; они по-прежнему являются настольными книгами минералогов и продолжают служить источниками ценнейших минералогических идей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Богатиков О. А., Боярская Р. В., Карпова О. В.* Неоднородность титаномагнетита.— В кн.: Вопросы однородности и неоднородности минералов. М.: Наука, 1971, с. 127—140.
2. *Бокий Г. Б.* Границы применения понятия «изоморфизм».— В кн.: Изоморфизм в минералах. М.: Наука, 1975, с. 7—14.
3. Вопросы однородности и неоднородности минералов/Под ред. Ф. В. Чухрова, Н. В. Петровской. М.: Наука, 1971. 213 с.
4. *Гинзбург А. И.* Практические аспекты учения о типоморфизме минералов. М.: Наука, 1980, с. 3—10.

5. *Диков Ю. П., Рехарский В. И.* Энергетический аспект межтетраэдрических взаимодействий в силикатообразующих кластерах.— Докл. АН СССР, 1981, 256, № 5, с. 1226—1229.
6. *Звягин Б. Б., Соболева С. В., Чухров Ф. В.* Политипия минералов и определяющие ее факторы.— В кн.: Типоморфизм минералов и его практическое значение. М.: Недра, 1972, с. 67—72.
7. *Звягин Б. Б., Жухлистов А. П., Сидоренко О. В.* и др. Особенности типоморфизма кристаллических структур (на примере диоктаэдрических слоистых силикатов).— В кн.: Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов. М.: Наука, 1980, с. 43—51.
8. *Мамулов С. А.* Способы вычисления энергии решетки кристаллов.— Тр. Вост. НИИ и горн. фак. Сиб. металлург. ин-та, 1961, вып. 2. 191 с.
9. *Маракушев А. А., Безмен Н. И.* Термодинамика сульфидов и окислов в связи с проблемами рудообразования. М.: Наука, 1972. 200 с.
10. *Минеева Р. М., Соболева С. В., Звягин Б. Б.* Сравнение энергетических характеристик политипных модификаций мусковита 1М и 2М.— В кн.: Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов. М.: Наука, 1980, с. 91—97.
11. *Мозгова Н. Н.* Об изоморфизме в сульфидах и их аналогах.— В кн.: Изоморфизм в минералах. М.: Наука, 1975, с. 86—113.
12. *Перчук Л. Л.* Типоморфные особенности сосуществующих минералов.— В кн.: Типоморфизм минералов и его практическое значение. М.: Недра, 1972, с. 39—50.
13. *Петровская Н. В.* О минералогическом картировании при изучении колчеданных месторождений Урала.— Тр. ЦНИГРИ, 1959, вып. 29, с. 13—28.
14. *Петровская Н. В.* Признаки неоднородности минералов и их генетическое значение.— Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1977, ч. 106, вып. 1, с. 34—44.
15. *Петровская Н. В., Новгородова М. И., Фролова К. Е.* и др. Природа неоднородности и фазовый состав эндогенных выделений самородного золота.— В кн.: Неоднородность минералов и тонкие минеральные смеси. М.: Наука, 1977, с. 16—27.
16. *Рябчиков И. Д.* Усовершенствование полевошпатового геологического термометра Барта.— В кн.: Минералогическая термометрия и барометрия. М.: Наука, 1965, с. 49—60.
17. *Ферсман А. Е.* По вопросу о генезисе минералов и их взаимных отношениях.— Тр. СПб. о-ва естествоисп., 1912, **43**, вып. 1, с. 255—273.
18. *Ферсман А. Е.* О числе минеральных видов.— Докл. АН СССР, 1938, **19**, № 4, с. 271—274.
19. *Ферсман А. Е.* Задачи минералогии в нашей стране.— Зап. Всерос. минерал. о-ва, 1945, ч. 74, вып. 1, с. 10—24.
20. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 1. 862 с.
21. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955, 1958, 1959. Т. 3—5. 798, 588, 858 с.
22. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1960. Т. 6. 742 с.
23. *Франк-Каменецкий В. А.* Структурный типоморфизм минералов.— В кн.: Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов. М.: Наука, 1980, с. 35—42.
24. *Чухров Ф. В.* Типоморфизм — важнейшая проблема современной минералогии.— В кн.: Типоморфизм минералов. М.: Наука, 1969, с. 3—14.
25. *Чухров Ф. В.* Проблема однородности и неоднородности минералов.— В кн.: Вопросы однородности и неоднородности минералов. М.: Наука, 1971, с. 5—15.
26. *Чухров Ф. В.* Минералы-эфемеры.— Природа, 1973, № 9, с. 64—69.
27. *Чухров Ф. В.* Геохимическая среда и изотопный состав серы руд и горных пород.— Изв. АН АрмССР. Сер. Науки о Земле, 1979, **32**, № 2, с. 3—18.
28. *Fleischer M.* Minor elements in some sulfide minerals.— Econ. Geol., 1955, Fifty annivers. vol., pt 2, p. 970—1024.
29. *Waddington T. C.* Lattice energies and their significance in inorganic chemistry.— Adv. Inorg. Chem. and Radiochem., 1959, 1, p. 158—218.

УДК 548.3 : 550.4

В. С. УРУСОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ПУТИ РАЗВИТИЯ ГЕОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ТЕОРИИ А. Е. ФЕРСМАНА[1]

Академик А. Е. Ферсман — один из творцов геохимии, в которую он внес целый ряд оригинальных идей и в которой создал непрерывно развивающиеся новые направления. Одному из них, которое А. Е. назвал «геоэнергетическим анализом природных процессов», по существу был посвящен весь 3 том его «Геохимии» [21].

В рамках этого направления А. Е. Ферсман поставил вопросы о строении и свойствах кристаллического вещества, о природе и законах изоморфизма и полиморфизма, о последовательности кристаллизации из минералообразующих сред, о законах сочетания (парагенезисе) химических элементов, о сродстве их друг к другу и о геохимической классификации элементов. В настоящей статье будет рассмотрено современное состояние всех этих проблем, которые являются пограничными между двумя родственными науками — геохимией и кристаллохимией. А. Е. Ферсман, создавая общую энергетическую теорию геохимических процессов, явился, по существу, родоначальником и того нового направления теоретической мысли в кристаллохимии, которое сейчас приобрело некоторую самостоятельность под названием энергетической кристаллохимии [15].

Все свои геохимические и минералогические выводы А. Е. Ферсман строил на фундаменте периодического закона Д. И. Менделеева, с анализа которого начинается третий том «Геохимии»; в этом законе А. Е. Ферсман видел сжатое и выраженное в табличной форме обобщение многих геохимических и кристаллохимических закономерностей. Это особенно относится к выявленной им роли диагональных направлений таблицы Периодической системы, вдоль которых располагаются элементы с близкими ионными радиусами и по которым проходят границы между полями элементов с разными кислотно-основными свойствами, принадлежащих также и к различным геохимическим полям (литофилов, халькофилов, атмофилов и т. п.).

А. Е. Ферсман подчеркнул, что «величины радиусов ионов... совершенно явно следуют законам построения Менделеевской таблицы» [21, с. 76]. Именно поэтому они являются «решающим фактором при формулировке основных законов геохимии и кристаллохимии» [20, с. 80].

Для того чтобы правильно оценить изменения в наших представлениях о размерах атомных частиц в кристаллическом веществе, которые происходят и в наше время, следует напом-

[1] Доклад на 21 Научном чтении им. акад. А. Е. Ферсмана, 16 декабря 1981 г.

нить об отношении классиков науки к понятию «радиус иона или атома». Так, В. М. Гольдшмидту было «ясно, что определяемый радиус есть эффективный или кажущийся, а не действительный» [7, с. 79]. Ему вторит О. Гассель [2, с. 15]: «...все те ионные и атомные радиусы, о которых идет здесь речь, не являются истинными радиусами ионов и атомов, но представляют собой лишь «кажущиеся радиусы», выводящиеся из допущения о соприкасающихся жестких сферах». А. Е. Ферсман предпочитал рассматривать радиус иона скорее как сферу его действия в кристалле, чем как его действительный размер. Однако именно он подчеркнул, что «как бы не относиться к физическому смыслу радиусов ионов... они имеют огромное практическое значение как величины, с которыми можно легко и просто оперировать как в кристаллохимии, так и в геохимии» [22, с. 106].

Со временем, как часто случалось в истории науки, ясное представление самих творцов концепции ионных радиусов об их условном, неабсолютном характере в какой-то степени затушевалось в результате их успешного применения. Стало казаться, что значения радиусов отдельных ионов выведены из опыта, тогда как наблюдаемыми величинами на самом деле являются лишь межатомные расстояния (суммы радиусов) или их изменения в рядах соединений с общим ионом (разности радиусов). Поэтому когда появились достаточно надежные экспериментальные оценки размеров ионов по распределению электронной плотности в кристаллах и квантово-механические расчеты орбитальных радиусов электронных оболочек и они, как и следовало ожидать, не совпали с эмпирическими радиусами, это было принято некоторыми исследователями как признак кризиса, даже ошибочности классической концепции. Появились попытки создания абсолютной системы радиусов и пересмотра основ кристаллохимии [5]. Хотя нет способа избежать условного характера разделения реального межатомного расстояния на отдельные ионные (или атомные) вклады в гетероатомных веществах, для решения большинства практических вопросов по-прежнему оказывается вполне достаточным использование классических систем радиусов ионов [14, 1] с учетом границ их применимости.

Тесно связанными с понятием радиусов ионов были и введенные А. Е. Ферсманом энергетические коэффициенты — ЭК и ВЭК. По аналогии с аддитивным характером радиусов ионов А. Е. Ферсман предположил, что и энергия ионной решетки может быть представлена как аддитивная функция отдельных ионных инкрементов — ЭК. Оказалось, что это можно приближенно сделать, если принять ЭК $\sim z^2/2r$, где z — заряд (или валентность), ВЭК $\sim z/2r$ (половина ионного потенциала Картледжа). Однако и самому создателю системы ЭК было ясно, во-первых, что строго теоретически получить выражение ЭК $\sim z^2/2r$ из уравнения энергии решетки Капустинского мож-

но только при условии равенства зарядов и радиусов катиона и аниона, которое соблюдается довольно редко (например, для KF или SrO), а, во-вторых, точность расчета энергии решетки как суммы ЭК остается очень невысокой, порядка 10—20%. Тем не менее А. Е. Ферсман надеялся, применяя понятие энергии решетки и аппарат ЭК, получить ответы на многие вопросы, представляющие геохимический и минералогический интерес, в частности объяснить свойства кристаллических веществ, определить их последовательность в процессах кристаллизации, объяснить устойчивые парагенезисы минералов и химических элементов, указать направленность изоморфных замещений и др.

А. Е. Ферсману удалось, опираясь на более ранние работы Э. Фридриха и В. М. Гольдшмидта, связать механическую прочность, прежде всего твердость ионных минералов со средневзвешенным значением ВЭК. Этот подход к изучению твердости был развит А. С. Поваренных [9] и доведен им до большой детальности; для характеристики прочности связи введены коэффициенты, учитывающие, в частности, отклонение типа химической связи от чисто ионного в связи с тем, что при прочих равных условиях твердость соединения резко увеличивается с ростом ковалентности связи.

Более трудным для решения оказался вопрос о термической устойчивости минералов, т. е. о температурах их плавления или разложения, который имеет важное значение в связи с решением проблемы последовательности кристаллизации расплавов, в частности природных силикатных магм, и, следовательно, их кристаллизационной дифференциации. Из общих соображений, к которым прибегал и А. Е. Ферсман, следовало бы ожидать, что должна существовать прямая корреляция между энергией решетки и температурой плавления. Однако это ожидание в целом не оправдалось. Можно было лишь сказать, что в последовательности кристаллизации, описываемой известной «вилкой Боуэна», идет постепенное уменьшение ЭК катионов: $ЭК_{Mg^{2+}} > ЭК_{Fe^{2+}} > ЭК_{Ca^{2+}} > ЭК_{Na^{+}} > ЭК_{K^{+}}$. Наблюдениями же К. Фаянса, В. С. Соболева, А. Рингвуда, А. С. Поваренных было установлено, что более ковалентные вещества плавятся при более низких температурах, чем более ионные, при очень близких межатомных расстояниях и зарядах ионов, а следовательно, и энергиях решеток (например, NaCl—AgCl, CaF_2—CuF_2 и др., см. [15]). Более того, было показано [15], что часто обнаруживается обратная корреляция между энергиями решеток и температурами плавления.

Эти и многие другие факты, которые были в свое время подробно рассмотрены [15], заставили нас, вслед за Б. Ф. Ормонтом, ввести в качестве универсальной характеристики энергии сцепления кристалла энергию атомизации E — энергию, которая выделяется при образовании кристалла из газа нейтральных атомов (а не ионов, как в случае энергии решетки U).

Различные преимущества E перед U имеют как чисто теоретический, так и практический характер. Не останавливаясь на первых, отмечу лишь практическую ценность понятия «энергия атомизации». Так, выяснилось, что именно энергия атомизации кристалла находится в ожидаемой прямой корреляции с температурами плавления.

Этот факт был впервые отмечен В. В. Щербиной [23] на примере ряда плагиоклазов после того, как он познакомился с ранней работой автора [13], содержавшей аргументацию в пользу энергии атомизации. Позже были найдены многочисленные подтверждения этого [15]; оказалось, что отношение E/T для самых различных веществ колеблется в узких пределах (0,10—0,20 ккал/моль·град). Поэтому формулировку закона А. Е. Ферсмана («последовательность кристаллизации из природных растворов и расплавов следует в основном уменьшению энергии решеток») нужно изменить: последовательность кристаллизации из расплава следует порядку понижения энергий атомизации. Конечно, А. Е. Ферсман прекрасно понимал, что этот закон носит статистический характер и что путь кристаллизации зависит от состава системы: «постоянство этой последовательности в общем в земной коре вызывается сравнительно небольшой амплитудой колебаний концентраций» [21, с. 155].

Другая геохимическая проблема, которая очень интересовала В. М. Гольдшмидта и А. Е. Ферсмана, — природа процессов разделения элементов между окисной (литофилы), сульфидной (халькофилы) и металлической (сидерофилы) фазами, т. е. в конечном счете природа сродства элементов к кислороду и сере, не могла в то время найти окончательного решения. Были отмечены только определенные позиции на кривой атомных объемов, которые занимают указанные группы элементов (В. М. Гольдшмидт), а также связи со стандартными электродными потенциалами и с теплотами образования окислов и сульфидов (А. Е. Ферсман). Однако оставался открытым вопрос о механизме такого разделения, которое определяет как состав оболочек Земли, так и в более мелком, но практически более важном масштабе — проявление собственно рудного процесса в земной коре.

Отчасти это можно объяснить тем, что для обменной реакции типа $AX+BY \rightarrow AY+BX$ концепция ЭК Ферсмана приводит к нулевому тепловому эффекту, т. е. разрешает существование всех сочетаний катионов и анионов. Здесь стремление найти строго аддитивную характеристику сослужило плохую службу. А. Е. Ферсман отдавал себе отчет в этом недостатке системы ЭК, что можно видеть из его замечаний в 3 томе «Геохимии» [21, с. 153]: «Если бы закон аддитивности энергии... имел полное значение, то из химии выпало бы огромное количество различных реакций обмена». Однако оставаясь целиком на почве представлений ионной модели, он считал, что «направ-

ление обменных химических реакций решается геометрией» [21, с. 154] (т. е. отношением радиусов катиона и аниона, координационными числами и т. п.). Здесь видно, что он еще не придавал должного значения характеру химической связи, роль которой будет рассмотрена ниже.

Конечно, приведенная обменная реакция характеризуется определенной энтальпией, и если она экзотермическая с достаточно большим тепловым эффектом, то по принципу Бертло она сильно смещена вправо, в сторону образования AY и BX. Действительно, затем в работах А. ван Аркеля, Б. В. Некрасова и Д. А. Бочвара, Г. Рамберга, В. С. Соболева были найдены с использованием теории энергии решетки определенные правила, управляющие смещением обменной реакции. Они сводились в целом к тому, что в стабильной паре соединений одно должно быть соединением наименьших по размеру и (или) наибольших по зарядам ионов (например, AY), а другое — наибольших по размеру и (или) наименьших по зарядам ионов (например, BX). Это направление реакции обеспечивает энергетический выигрыш. Пример: $LiCl+NaF \rightarrow LiF+NaCl$, $\Delta H^0_{298} = -11$ ккал/моль.

Химики (А. ван Аркель, Б. В. Некрасов и Д. А. Бочвар) имели дело с высокоионными соединениями, для которых установленные правила находятся в полном соответствии с опытом; минералоги (В. С. Соболев и Г. Рамберг) обратились к более широкому кругу природных веществ и обнаружили многие расхождения предсказаний теории и данных опыта. Один из примеров этого: $ZnF_2+CaS \rightarrow ZnS+CaF_2$, $\Delta H_{298} = -46$ ккал/моль. В этой реакции, по ионным правилам, должно было бы быть стабильным сочетание более мелкого Zn^{2+} с более мелким же анионом F^-, а опыт показывает, что имеется практически полное смещение равновесия в другую сторону с образованием сфалерита и флюорита. На основе подобных исключений В. С. Соболев сформулировал эмпирическое правило [11]: при сильной поляризации устойчивой является та пара, в которой более поляризуемый анион (в данном примере S^{2-}) сочетается с более поляризующим катионом (в данном примере Zn^{2+}).

Особенно большое значение имеет вопрос о сродстве элементов к кислороду и сере, поставленный еще на заре геохимии. Возвращаясь к нему позже, В. И. Лебедев [4] справедливо указал, что литофилы, т. е. элементы, склонные давать кислородные соединения, образуют в них существенно ионные связи, а халькофилы, т. е. элементы, склонные к устойчивым сочетаниям с серой и ее аналогами (селеном, теллуром, мышьяком и т. п.), образуют с ними существенно ковалентные соединения. Однако само по себе это правильное замечание еще не дает объяснения сущности сродства. Выявить его можно, лишь анализируя теоретически сдвиги равновесия в обменных реакциях типа $SiS_2+MoO_2 \rightarrow SiO_2+MoS_2$, $\Delta H^0_{298} = -101$ ккал/моль; $CaS+PbCO_3 \rightarrow PbS+CaCO_3$, $\Delta H^0_{298} = -32$ ккал/моль. Такой

анализ был проведен [15] с использованием энергии атомизации, которая является функцией разности электроотрицательностей связанных атомов, или, говоря более современным языком, функцией эффективных зарядов атомов или степени ковалентности химической связи. Из такого анализа следует, что наиболее общим правилом смещения обменных равновесий является правило максимальной полярности химической связи, согласно которому в стабильной паре сочетаются наиболее ионное (разность электроотрицательностей максимальна) и наиболее ковалентное (разность электроотрицательностей минимальна) соединения. Это обеспечивает весьма значительный выигрыш энергии, особенно когда правило максимальной полярности действует одновременно с «ионным» правилом сочетания меньшего по размеру катиона и меньшего аниона (образование кварца вместе с молибденитом в первом из приведенных выше примеров).

Природа сродства одних элементов к кислороду, других — к сере стала вполне ясной, и научные усилия смещаются в сторону детализации рядов сродства, которая может быть сделана на основе термодинамических расчетов многочисленных окисно-сульфидных обменных равновесий, дающих подробную картину явления [6]. Более того, А. А. Маракушеву [6] удалось установить показатель самородности, как величину, обратную произведению сродства металла к кислороду и сере. Как и следовало ожидать, этот показатель оказался наибольшим для платины.

При дальнейшей работе выяснилось, что обменные равновесия управляют и появлением типичных стабильных сочетаний внутри отдельных классов минералов, например среди сульфидов или силикатов. Таким путем удалось объяснить, например, постоянную связь золота с теллуром, а меди — с серой [15]. Кроме того, становится ясным типичное для минералогии силикатов сочетание более заряженных катионов (Mg^{2+}, Fe^{2+}, Be^{2+}, Zr^{4+}) с ортосиликатным анионом в островных структурах (оливины, циркон, фенакит), а менее заряженных (Na^{+}, K^{+}) — с алюмосиликатными анионами типа $(AlSi_3O_8)^{-}$ в каркасных структурах (полевые шпаты, фельдшпатоиды). Таким образом, кристаллизационная дифференциация силикатных магм управляется тем же правилом максимальной полярности химической связи. Ее крайним случаем является образование щелочных пород, обогащенных Na, K и другими элементами. С рассматриваемых позиций вполне понятным становится повышение концентрации в щелочных породах галогенов (F и Cl) и фосфора, эти элементы образуют с щелочными металлами и кальцием высокоионные соединения.

Можно дать и иную трактовку обменным равновесиям, основанную на кислотно-основной концепции. Напомним, что БЭК Ферсмана по существу совпадают с ионными потенциалами Картледжа — z/r (А. Е. Ферсман называл их картлями),

а диаграмма ионных потенциалов, как известно, до сих пор иногда используется для очень наглядной классификации катионов по кислотно-основным свойствам: сильные металлы, слабые металлы, амфотерные катионы и катионы-комплексообразователи. В последние годы на основе обобщенной концепции кислот и оснований, принадлежащей Г. Льюису, Дж. Бренстеду, М. И. Усановичу и другим исследователям, особенно в формулировке Р. Пирсона (принцип ЖМКО — жестких и мягких кислот и оснований), удалось дать удобную качественную и полуколичественную картину взаимодействия между собой отдельных составляющих минерального вещества (атомов, ионов, комплексных радикалов и пр.) [15]. Один из современных вариантов описания кислотно-основных свойств атомов и ионов принадлежит А. А. Годовикову [3], предложившему силовые характеристики (отношения потенциалов ионизации к орбитальным радиусам) для углубленной классификации минералов и неорганических соединений.

Не останавливаясь в деталях на способах использования этой полезнейшей концепции в минералогии и геохимии, следует отметить, что именно действие законов энергетики кислотно-основных равновесий приводит к своего рода естественному отбору среди минералов. Из возможного огромного количества сочетаний химических элементов стабильно существует в земной коре только 2000—2500 минеральных видов, причем большая часть из них относится к гипергенным, т. е. образуется в условиях взаимодействия самой внешней оболочки кристаллической коры с гидросферой, атмосферой и живым веществом. В магматическом процессе образуется не более 200 минералов, в гидротермальном — около 500. Нужно учесть также, что значительная часть минералов (около 800 видов) содержит воду или гидроксил-ион, что характеризует специфическую роль воды в земных минералах. В веществе поверхности Луны, практически лишенной воды, обнаружено не более 100 минералов. Еще более бедна, по-видимому, минералогия земных недр; в строении мантии Земли принимают участие лишь несколько десятков минералов. Это подтверждает справедливость известных положений А. Е. Ферсмана: «природа выбирает лишь простейшие пути и простейшие соединения» [21, с. 343] и «законы кристаллохимии или термодинамики нам показывают, что далеко не все сочетания геохимически и энергетически возможны и что среди них только наиболее простые и сравнительно немногие отвечают условиям достаточной энергетической устойчивости» [21, с. 13].

Другим важнейшим фактором, ограничивающим число минеральных видов, является изоморфизм, т. е. способность атомов замещать друг друга в одних и тех же позициях кристаллической структуры. А. Е. Ферсман приводил примеры Sc и Re, не образующих собственных минералов, а входящих изоморфно в минералы Mg (Fe) и Mo соответственно. К ним можно

добавить Rb — постоянный «заместитель» калия, Hf — «близнец» циркония, Ta и Nb, замещающие титан, Se, маскирующийся в сульфидах, Ga и Ge, «спрятанные» почти целиком в минералах алюминия и кремния, и, наконец, две большие группы элементов — платиноиды (шесть элементов) и редкие земли и иттрий (15 элементов), образующие благодаря тесным изоморфным связям только общие кристаллические постройки.

Таким образом, почти третья часть всех стабильных элементов не дает собственных минералов. Имеется еще группа элементов (например, Cd, In, Tl, Te, Br), для которых известны только весьма редкие собственные минералы и подавляющая доля которых находится в изоморфной форме в «чужих» минералах.

Это известные факты, однако менее известно то, что и большая часть таких распространенных рудных металлов, как Cr, Cu, Zn, Ni, Co, Mn, Sn, Hg, Pb и др., рассеяна в горных породах в виде ничтожных по содержанию изоморфных примесей и лишь малая их доля концентрируется в месторождениях. Так, по подсчетам А. А. Саукова [10], в месторождениях заключено лишь 0,02% всей ртути. Около 99,98% атомов ртути находится в состоянии крайнего рассеяния в горных породах, где ее содержание измеряется миллионными долями процента. По оценкам К. Ранкамы и Т. Сахамы [24], 80—90% даже таких обычных халькофильных и сидерофильных элементов, как Cu, Zn, Pb, Ni, Co, находится в сложной изоморфной смеси с породообразующими элементами преимущественно в силикатах и окислах. Здесь, помимо законов изоморфизма, проявляется и закон действующих масс.

Изоморфизму В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман, В. М. Гольдшмидт и их последователи придавали огромную роль. В 1910 г. В. И. Вернадский указывал, что наиболее глубоко и полно парагенезис элементов охватывается учением об изоморфных рядах. Этот вывод был сделан накануне открытия в 1912 г. М. Лауэ дифракции рентгеновских лучей, т. е. был основан практически только на данных о химическом составе минералов.

Через 20 лет В. М. Гольдшмидт и А. Е. Ферсман подошли к учению об изоморфизме с кристаллохимических позиций. Этим ученым принадлежат сохранившаяся в основных чертах классификация изоморфизма и формулировка основных правил изоморфных замещений. По В. М. Гольдшмидту, это «систематическое изучение законов распределения элементов... выявляет близкие взаимоотношения между кристаллохимическими и геохимическими особенностями элементов» [7, с. 77]. Важно отметить, что оба исследователя рассматривали образование структур твердых растворов с энергетической позиции, полагая, что замещающие друг друга частицы производят в кристаллах одинаковое физическое действие, которое обусловлено не обязательно одинаковыми радиусами, но скорее близкими силовы-

ми полями [7, с. 147]. А. Е. Ферсман писал: «...apriori надо ожидать, что замещение будет идти в сторону уменьшения энергии системы (увеличения энтропии)...» [21, с. 154]. Именно на этих суждениях и были основаны правила полярности изоморфизма, гласящие о большей выгодности замещения крупного иона на мелкий и менее заряженного на более заряженный (при одновременном некотором увеличении размера). Правило диагональных рядов А. Е. Ферсмана является, очевидно, дальнейшей детализацией второго из правил полярности, в которой очень удачно использованы закономерности изменения радиусов ионов в периодической системе Д. И. Менделеева. Подобным же образом трактовались различные типы кристаллохимической компенсации при гетеровалентном изоморфизме. Резюме А. Е. Ферсмана: «Анализ явлений изоморфизма с точки зрения энергетики представляет очень важную задачу и намечает совершенно новые пути в изучении геохимических процессов. Изоморфизм есть не просто случайная замена одних элементов другими на основании их объема и закона масс, а один из способов достижения более устойчивых энергетических комплексов... Однако анализ этой проблемы с точки зрения энергетики пока невозможен и частично наталкивается на ряд противоречий» [22, с. 209].

Несмотря на такое заключение, не будет преувеличением сказать, что позже самые радикальные изменения произошли именно в области представлений об изоморфизме. Во-первых, стало совершенно ясно, что проблема изоморфизма — комплексная и ее решение зависит в равной степени от применения методов как кристаллохимии, так и физической химии и термодинамики (в их разделах о диаграммах состояния и твердых растворах).

С точки зрения термодинамики растворов задача изучения стабильности изоморфной смеси в зависимости от состава, температуры и давления сводится к поиску минимума свободной энергии смешения $\Delta G_{см} = G_{тв.\ р-р} - x_1 G_1 - x_2 G_2 = \Delta H_{см} - T\Delta S_{см}$, где $G_{тв.\ р-р}$ — свободная энергия твердого раствора состава x_1 мольных долей первого компонента, x_2 мольных долей второго компонента при температуре T и давлении P; G_1 и G_2 — свободные энергии чистых компонентов при тех же условиях. Аналогичные разностные выражения могут быть записаны для энтальпии и энтропии смешения $\Delta H_{см}$ и $\Delta S_{см}$.

В первом и часто довольно хорошем приближении энтропия смешения двух веществ в твердом состоянии может быть найдена обычным статистико-термодинамическим путем, как для идеальной газовой или жидкой смеси. Это существенно положительная величина, достигающая максимального значения $\Delta S_{см} = 1{,}38$ э. е. при эквимолярном составе $x_1 = x_2 = 0{,}5$ и соответствующая неупорядоченному распределению изоморфно замещающих друг друга элементов в общих позициях структуры. Легко понять, что энтропия смешения всегда дает отри-

цательный вклад в свободную энергию и, следовательно, всегда стабилизирует смесь. Именно благодаря ей газы всегда, а жидкости часто смешиваются во всех пропорциях [1].

Однако мы знаем, что неограниченные твердые растворы являются скорее исключением, чем правилом, и если образуются при повышенных температурах, то при понижении температуры — распадаются. Отсюда следует, что должен существовать эффект, противодействующий смешению, т. е. вносящий положительный вклад в свободную энергию. Этот эффект может быть связан только с энтальпией смешения $\Delta H_{см}$. Качественное рассмотрение вопроса показывает, что энтальпия смешения возникает из-за различного рода деформаций структуры твердого раствора, как геометрических, так и электронных. Уже из подобных рассуждений следует вывод о близости размеров (периодов ячейки, радиусов ионов) компонентов и поляризационных свойств ионных радикалов, т. е. близости характеров химической связи, как о причине широкой взаимной смесимости. По широко известному правилу Гольдшмидта, обычно (при умеренно высоких температурах) широкая смесимость в твердом состоянии наблюдается, если радиусы замещающих друг друга ионов отличаются не более чем на 15%.

Итак, чем больше различные виды деформации структуры и $\Delta H_{см}$, тем более ограничена смесимость в твердом состоянии. С точки зрения построения фазовых диаграмм мы переходим с ростом $\Delta H_{см}$ от диаграммы I типа с неограниченной смесимостью к диаграмме V типа с ограниченной смесимостью при температурах плавления и, наконец, к диаграммам состояния с простой эвтектикой. Отличие диаграмм всех этих типов друг от друга можно свести к одной характеристике — критической температуре распада $T_{кр}$ твердого раствора: для I типа она ниже кривой солидуса, для V типа — пересекает ее, а для диаграммы состояния с простой эвтектикой ее можно мысленно представить гораздо выше температур плавления.

Термодинамическое решение задачи о связи $T_{кр}$ с энтальпией смешения $\Delta H_{см}$ было найдено Р. Беккером в 1937 г. в рамках приближения строго регулярных растворов, для которых $\Delta H_{см}=x_1x_2Q$; $\Delta S_{см}=\Delta S_{ид}$: $T_{кр}=Q/2R$, где R — универсальная газовая постоянная; $Q=\text{const}$.

Из приведенного соотношения очевидно, что чем больше энергия взаимодействия Q, тем больше критическая температура распада $T_{кр}$. Впервые попытку связать кристаллохимические различия компонентов с типом диаграммы состояния сделал еще в 1948 г. В. С. Соболев [12]. Он использовал относительную разность радиусов $\delta r=(r_2-r_1)/r_1$, $r_2>r_1$ и нашел следую-

[1] Сделаем отступление для следующего рассуждения общего характера. Если бы «миром правила энтропия», то везде во Вселенной вещество было бы гомогенной смесью всех компонентов. Однако существует барьер, о который энтропия «спотыкается». Таким барьером служит твердая, в основном кристаллическая, фаза вещества.

щую статистическую корреляцию: при $\delta r < 10$—15% диаграммы состояния обычно относятся к I типу, при 10—$15\% < \delta r < 25$—40% — к III типу (непрерывный ряд твердых растворов с минимумом); если $\delta r > 25$—40%, то вероятен простой эвтектический тип диаграмм состояния.

Таким образом, к 50-м годам в науке о веществе вообще и к 60-м годам в геохимии и минералогии возникла необходимость перехода от качественного периода в изучении изоморфизма к количественному. Задача сводится, как мы видели, к отысканию параметра взаимодействия Q, которое может быть осуществлено либо экспериментальным, либо теоретическим путем. Экспериментальное (калориметрическое) измерение теплот смешения сталкивается с большими трудностями, так как $\Delta H_{см}$ — обычно малые величины (порядка десятых долей и единиц ккал/моль). К настоящему времени известно около 20 твердых растворов, для которых выполнены калориметрические измерения. Тем не менее прогресс калориметрической техники идет настолько быстро, что стало возможным в самое последнее время измерить [25] теплоты смешения в оливиновой $(Mg, Fe)_2SiO_4$ изоморфной смеси, которые в максимуме для средних составов не превышают 0,4 ккал/моль, и даже определить зависимость $\Delta H_{см}$ от состава. Однако трудность таких измерений не позволяет надеяться на быстрое накопление калориметрических данных [26].

Теоретическое определение параметра взаимодействия состоит в нахождении следующей разности: $\Delta U_{см} = U_{тв.\ р\text{-}р} - x_1U_1 - x_2U_2$, где U — внутренняя энергия твердого раствора или его чистых компонентов. На первом этапе усилиями физиков эта задача решалась в чисто ионном приближении, когда U — энергия решетки. К началу 60-х годов уже существовало несколько моделей, которые позволяли с высокой точностью описать имевшиеся экспериментальные данные для твердых растворов типа NaCl—KCl.

Возникла новая задача распространения теории на гораздо более широкий круг минеральных твердых растворов, образованных в большинстве соединениями с тем или иным отклонением от чисто ионного типа: для них, как было показано ранее [15], энергия решетки не может правильно передавать энергию взаимодействия в кристалле. Решение было снова найдено [16] на пути использования понятия энергии атомизации кристалла. Такой подход привел к следующему уравнению для энтальпии смешения (в упрощенной и обобщенной форме): $\Delta H_{см} = x_1x_2[a(\Delta r)^2 + b(\Delta \varepsilon)^2]$, где Δr — разность радиусов; $\Delta \varepsilon$ — разность степеней ионности связи; a и b — полуэмпирические параметры. В этом уравнении выражены оба классических условия осуществления изоморфной смесимости: близость радиусов и близость поляризационных свойств замещающих друг друга ионов. Действительно, чем больше Δr или $\Delta \varepsilon$, или оба эффекта вместе, тем больше $\Delta H_{см}(Q)$, тем выше $T_{кр}$ и тем меньше пределы взаимных замещений.

На кристаллохимическом фундаменте была разработана схема определения пределов изоморфизма в зависимости от температуры [16] (а в последнее время — и от давления). Этим путем были найдены в хорошем согласии с опытом области существования и распада нескольких десятков твердых растворов минералов различных классов (окислов, халькогенидов, кислородных солей и т. п.).

Кроме того, оказалось возможным на строгой основе объяснить все известные эмпирические правила изоморфизма, а также предложить ряд новых или существенно уточненных формулировок. Стало ясным, что количественная трактовка изоморфизма не зависит (и не может зависеть) от выбора системы радиусов атомов или ионов, что рассеяло иллюзию, связанную с поиском неких специфических для изоморфизма систем радиусов.

Рассмотрение функциональной формы размерного параметра изоморфизма $\Delta r/(x_1r_1+x_2r_2+r)$, где r — радиус общей, не изменяющейся в процессе замещения структурной единицы, показывает, что величина r сильно влияет на пределы замещений. Следовательно, способность замещать друг друга является не только свойством данной пары атомов, но и всего конкретного кристаллического окружения. На примере пар Mg—Ca и Ca—Ba показано, что увеличение размера общей структурной единицы сильно расширяет пределы замещений в ряду окислы—карбонаты—титанаты—силикаты [16].

Таким образом, вполне подтвердились слова А. Е. Ферсмана: «Вообще явление замещения или совместного вхождения в общую решетку представляет одно из самых замечательных явлений сходства радиусов веществ, но и оно много более сложно, чем простое применение равенства радиусов или их отклонения (не свыше 10—15% от меньшего)» [22, с. 131].

Естественное объяснение получает и полярность изоморфизма, ибо размерный параметр и энергия смешения оказываются асимметричными функциями состава, причем затрата энергии больше в случае замещения мелкого иона крупным, чем в обратном случае. Физический смысл таких правил, как правило посредничества (медиации) для многокомпонентных смесей, депрессии изоморфизма под давлением, роли полиморфизма и т. п., рассмотрен в нашей работе [16].

Обзор геоэнергетического анализа, созданного А. Е. Ферсманом, был бы неполным, если бы в нем не было упомянуто о том общем показателе направленности геохимических процессов, который он назвал «парагеном». Стремясь внести «число в понимание свойств пространства и времени природных процессов» [21, с. 324], А. Е. Ферсман думал, что может быть найден показатель места каждого элемента в общем ходе кристаллизации. Он считал, что параген должен быть сложной функцией ЭК элемента, его координационного числа, вообще типа кристаллической структуры, поляризации (т. е. типа химической

связи) и, наконец, степени диссоциации в растворе (расплаве) и даже кларка (концентрации) элемента. Фактически в парагене объединялись свойства иона (атома), соединения (кристалла), его заключающего, и даже свойства среды кристаллизации (ее состав, степень диссоциации и т. п.). Теперь ясно, что при всей глубине постановки проблемы она не могла быть решена в столь упрощенном и обобщенном виде.

Однако теория парагена А. Е. Ферсмана нашла свое современное продолжение в количественной теории коэффициентов распределения химических элементов в процессах кристаллизации. Эта теория, как и теория изоморфных замещений, строится на общих для всех процессов кристаллизации принципах термодинамического равновесия — на условии равенства химических потенциалов данного компонента в кристалле и среде (паре, растворе, расплаве). Этот фундамент дает исходные выражения для коэффициентов распределения (сокристаллизации), которые оказываются функциями свойств чистых компонентов (теплот и температур испарения, растворения, плавления) и коэффициентов активности их в смесях. Последние для твердой фазы отыскиваются на основе теории изоморфизма и оказываются функциями параметра взаимодействия, т. е. различия свойств ионов (атомов) в общих позициях конкретной кристаллической структуры. Поэтому проблема в значительной степени перемещается в сторону изучения свойств компонента в минералообразующей среде. Для бинарных расплавов были установлены простые эмпирические корреляции между энтальпиями смешения в твердой и жидкой фазах [19], это позволило перейти к количественным расчетам коэффициентов распределения при кристаллизации из расплавов. Величина коэффициента распределения в согласии с опытом оказывается относительно простой функцией разности радиусов замещающих друг друга ионов (атомов); это соответствует представлению В. М. Гольдшмидта, полностью разделявшемуся А. Е. Ферсманом: «размеры составляющих кристалл единиц... чрезвычайно важны для геохимического способа распределения и в кристаллических решетках до известной степени происходит „сортировка" этих единиц по величине» [7, с. 78].

Подобный же энергетический анализ сокристаллизации из водного раствора [18] показал, что поправка на неидеальность твердого раствора, выпадающего в осадок, в большинстве случаев приводит к радикальному улучшению согласия расчетов с опытом. И в этом случае наблюдается корреляция коэффициентов сокристаллизации с различием размеров примеси и кристаллизата, но она менее отчетлива из-за большого влияния растворимости чистых компонентов, а в ряде случаев — из-за явлений комплексообразования в растворе. Предстоит большая работа по уточнению разнообразных вариантов анализа процессов сокристаллизации.

Необходимость прямого использования знаний о свойствах смешения твердых фаз в теории комплементарности составов равновесно сосуществующих минералов, получившей название теории фазового соответствия [8], является очевидной. С перспективами такого использования знаний о свойствах твердых растворов связана, в частности, разработка эффективных и достаточно точных геотермометров и геобарометров. Первый опыт априорного введения энергетических свойств изоморфных смесей в анализ равновесия сосуществующих сульфидных минералов [17] позволил сделать ряд выводов для определения путей дальнейших исследований в этом направлении.

Как любил повторять А. Е. Ферсман, наука движется к познанию истины путем последовательных приближений. Мы находимся сейчас на одном из промежуточных этапов. Ближайшие задачи геоэнергетического анализа и энергетической кристаллохимии заключаются в более углубленном экспериментальном (на основе методов физики минералов) и теоретическом изучении химической связи в кристаллах, в развитии количественного подхода к энергетике гетеровалентного изоморфизма, в нахождении способов учета взаимного влияния компонентов в сложных смесях (твердых и жидких), в создании количественной теории полиморфизма и др.

В заключение хотелось бы подчеркнуть высокий уровень советских геоэнергетических исследований для решения задач геохимии, минералогии и кристаллохимии. В этом, безусловно, огромна заслуга А. Е. Ферсмана, который первым прорубил просеки в чащобе труднейших загадок природы, сделал эти просеки «проезжими» для своих учеников и последователей.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белов Н. В., Бокий Г. Б., Франк-Каменецкий В. А.* и др. Что нового в так называемой «новой» кристаллохимии.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1977, № 3, с. 136—147.
2. *Гассель О.* Кристаллохимия. Л.: ОНТИ Химтеорет, 1936. 200 с.
3. *Годовиков А. А.* Химические основы систематики минералов. М.: Недра, 1979. 303 с.
4. *Лебедев В. И.* Основы энергетического анализа геохимических процессов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1957. 342 с.
5. *Лебедев В. И.* Ионно-атомные радиусы и их значение для геохимии и химии. Л.: Изд-во ЛГУ, 1969. 156 с.
6. *Маракушев А. А., Безмен Н. И.* Термодинамика сульфидов и окислов в связи с проблемами рудообразования. М.: Наука, 1972. 200 с.
7. Основные идеи геохимии: Работы по геохимии и кристаллохимии В. М. Гольдшмидта 1911—1930/Под ред. А. Е. Ферсмана. Л.: Госхимтехиздат, 1933. 276 г.
8. *Перчук Л. Л., Рябчиков И. Д.* Фазовое соответствие в минеральных системах. М.: Недра, 1976. 287 с.
9. *Поваренных А. С.* Твердость минералов. Киев: Изд-во АН УССР, 1963. 304 с.
10. *Сауков А. А.* Геохимия ртути. М.: Наука, 1946. 129 с. (Тр. ИГН АН СССР; Вып. 78).
11. *Соболев В. С.* Энергия кристаллической решетки и законы распределения ионов в минералах.— Минерал. сб. Львов. геол. о-ва, 1948, № 2, с. 25—42.

12. *Соболев В. С., Соболева О. С.* Физико-химическая трактовка изоморфизма.— Науч. зап. Львов. ун-та. Сер. хим., 1948, **9**, вып. 1, с. 5—9.
13. *Урусов В. С.* К вопросу об использовании понятия энергии кристаллической решетки.— Геохимия, 1965, № 5, с. 551—555.
14. *Урусов В. С.* О физическом смысле различных систем радиусов атомов и ионов и их роли в решении вопросов изоморфизма.— В кн.: Проблемы изоморфных замещений атомов в кристаллах. М.: Наука, 1971, с. 12—31.
15. *Урусов В. С.* Энергетическая кристаллохимия. М.: Наука, 1975. 335 с.
16. *Урусов В. С.* Теория изоморфной смесимости. М.: Наука, 1977. 251 с.
17. *Урусов В. С.* Фазовое соответствие в сульфидных минеральных системах (теория, учитывающая неидеальность твердых растворов).— Геохимия, 1979, № 11, с. 1616—1629.
18. *Урусов В. С.* Энергетическая формулировка задачи равновесной кристаллизации из водного раствора.— Геохимия, 1980, № 5, с. 627—644.
19. *Урусов В. С., Кравчук И. Ф.* Энергетический анализ и расчеты коэффициентов распределения изовалентных изоморфных примесей при кристаллизации расплавов.— Геохимия, 1976, № 8, с. 1204—1223.
20. *Ферсман А. Е.* Геохимия. Л.: ОНТИ Госхимтехиздат, 1934. Т. 1. 324 с.
21. *Ферсман А. Е.* Геохимия. Л.: Химтеорет, 1937. Т. 3. 503 с.
22. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955. Т. 3. 798 с.
23. *Щербина В. В.* Зависимость изоморфных замещений от давления.— Геохимия, 1965, № 5, с. 544—550.
24. *Rankama K., Sahama Th.* Geochemistry. Chicago: Univ. Chicago Press, 1950. 912 p.
25. *Wood B. J., Kleppa O. J.* Thermochemistry of forsterite — fayalite — olivine solutions.— Geochim. et cosmochim. acta, 1981, **45**, N 4, p. 529—534.
26. *Newton R. C., Wood B. J., Kleppa O. J.* Thermochemistry of silicate solid solutions.— Bull. Miner., 1981, **104**, p. 162—171.

УДК 549.7 : 548.5

Н. Н. ШЕФТАЛЬ

МЕЧТЫ И ДЕЙСТВИТЕЛЬНОСТЬ
(синтез кристаллов)

Исполнилось 100 лет со дня рождения Александра Евгеньевича Ферсмана, прожившего необычайно кипучую жизнь. В истории советской науки его имя, как и имя его учителя В. И. Вернадского, знаменует решительный поворот минералогии к изучению генезиса минералов с привлечением идей и методов точных наук.

Александр Евгеньевич — автор ряда кристаллографических и кристалломорфологических работ. Крупнейшая из них — «Кристаллография алмаза» [22]. В ней он, блестящий гониометрист и кристалломорфолог, изложил результаты изучения 289 кристаллов алмаза из разных месторождений. Он измерил 124 одиночных и сдвойниковых кристаллов, зарисовал их богатые разнообразные формы и отклонения от них и описал морфологические особенности строения поверхностей граней. Приведены также картины световых рефлексов, видимых в гониометре, показывающие состояние поверхностей отражающих граней, их отклонения от плоскости. Эта работа — самое детальное описание кристаллов алмаза.

В ней он осуществил свой подход к кристаллам, выраженный им в 1911 г. в словах: «Наша задача — задача кристаллографов — заключается в том, чтобы научиться читать летопись, начертанную на поверхности кристалла, и таким способом проникнуть в тайну истории одного кристалла, группы кристаллов и, наконец, всего мира кристаллов» [22, с. 44]. Это определение можно считать программой кристалломорфологических работ настоящего времени. «Кристалл,— пишет А. Е.,— не является просто геометрическим телом, как его рассматривали Роме Делиль или Гаюи, его нельзя оторвать от той обстановки, в которой протекал его рост; он органически связан с бесконечным количеством факторов и явлений, окружавших его в период кристаллизации, и все эти факторы налагают на его поверхность свой отпечаток. Кристалл неизбежно несет на себе следы предыдущих моментов своего существования и по его форме, по скульптуре его граней, мелочам и деталям его поверхности мы можем читать его прошлое» [22, с. 15].

Но изучать только природные готовые кристаллы, чтобы познать их историю, недостаточно. В одной из работ [22] А. Е. Ферсмана находим следующие слова: «Изучение свойств камня во всей сложности и разнообразии их — не только истории его образования и роста в земной коре, а сама природа камня, его внутренняя структура, различные свойства, используемые промышленностью, наконец его синтез — такова одна из важнейших проблем современной минералогии» [21, с. 55].

А. Е. Ферсман — крупнейший организатор советской науки. По его инициативе создан Ломоносовский институт, где минералогия, кристаллография и геохимия слились в единый комплекс наук. Там же разрабатывались проблемы искусственного получения кристаллов, которым А. Е. Ферсман и А. В. Шубников придавали огромное значение. Роль А. Е. в работах по синтезу кристаллов прекрасно охарактеризовал В. П. Бутузов — организатор и руководитель Всесоюзного научно-исследовательского института синтеза минерального сырья (ВНИИСИМС) на Научном чтении им. А. Е. Ферсмана в 1972 г. [6].

Мы рассмотрим здесь синтез кристаллов в более широком, не только в минералогическом смысле. Синтез технически ценных, почти совершенных монокристаллов, существующих или не существующих в природе, стал главным содержанием той кристаллографии, которую можно назвать технической. Она создает дефицитные монокристаллы минералов, улучшает их свойства; вводя присадки, создает кристаллы отличного состава, которым нет аналогов в природе. Место природных процессов в ней занимают процессы технологические, поддающиеся управлению. Она открывает и многие тайны образования минералов в природе.

Слова А. Е. о необходимости читать летопись, начертанную на поверхности кристалла, остаются полностью в силе. Выращивая кристаллы, всегда приходится устанавливать морфологические признаки развития в них неоднородностей, выяснять их сущ-

ность и причины образования, определять генетическую связь между ними и условиями роста, вещественным и динамическим состоянием среды. На основе такого изучения вырабатываются меры, предупреждающие появление дефектов. Эта огромная, многообразная работа — главное в технической кристаллографии.

Посмотрим же, чего удалось достичь кристаллографии на этом поле деятельности, не забывая и еще одного завета А. Е., а именно: «Научный процесс заканчивается лишь после внедрения выводов в жизнь» [20, с. 34]. В работах по синтезу это означает в первую очередь создание и внедрение промышленных методов получения монокристаллов.

При жизни А. Е. работы по синтезу монокристаллов только начинались. Методом Вернейля получали в форме буль рубин для часовых камней [14]. Из растворов выращивали монокристаллы сегнетовой соли для изготовления чувствительных ультразвуковых и пьезоэлектрических приборов, широко применявшихся в Великой Отечественной войне [23]. Только начинались работы по синтезу пьезокварца гидротермальным методом [24], фторфлогопитовой слюды из расплава [10].

С 1946 г. в Институте кристаллографии АН СССР разрабатывались методы получения рубина в виде тонких стержней. Позднее они были использованы в качестве «вечных» (по аналогии с часовыми камнями, не нуждающимися в смазке), самополирующихся нитеводителей и нитепроводников при производстве искусственного волокна взамен стеклянных, портящихся за 2—3 дня и повреждающих нити [14].

В 50-х годах А. А. Штернбергом был разработан промышленный метод синтеза пьезокварца [5] и широко развернулись работы по выращиванию этих кристаллов. Тем самым был ликвидирован дефицит этого важнейшего природного сырья, играющего огромную роль в радиотехнике, ультраакустике и пьезотехнике. Стоимость его пластинок во время второй мировой войны превышала стоимость золота. Существенно, что кварц выращивается путем, весьма близким к природному, и это позволило в ходе многолетних исследований раскрыть и уточнить многие закономерности его образования в природе. Параллельно были решены задачи получения кварцевого стекла высокой чистоты для световодов, раскрыты условия образования окрашенных, полудрагоценных разновидностей кварца, и разработаны методы их искусственного получения.

Велики успехи и в искусственном получении кристаллов алмаза. Кристаллы величиной до 2 мм выращиваются сейчас при давлении порядка 50 кбар и температуре примерно 1300° С за время, измеряемое часами [4, 16].

Важную роль играют синтетические поликристаллические алмазные материалы и их заменители. Институтом физической химии АН СССР разработан метод получения тонких алмазных слоев при давлении меньше атмосферного при температурах от

750 до 1200° С [8, 9, 18]. Метод имеет многочисленные применения в полупроводниковой технике, а также в создании абразивных и режущих материалов.

В Институте кристаллографии АН СССР разработаны методы получения гигантских лазерных цилиндрических монокристаллов рубина и сапфира (длиной от 0,5 до 1 м и диаметром от 20 до 80 мм), а также крупных пластинчатых монокристаллов (размером 15×30 см при толщине до 3 см) и изометрических кристаллов весом от 2 до 20 кг [3]. Все это решило проблему советского лазера.

В том же Институте раствор-расплавным методом, а позднее и из расплава получены монокристаллы гранатов, используемых в ювелирной и электронной промышленности [19]. Гидротермальным методом выращены монокристаллы цинкита (ZnO), используемые в качестве пьезоэлектрического и люминесцентного материала и для изготовления ультрафиолетовых лазеров [17]. Некоторые из полученных монокристаллов ниобатов, танталатов и сульфидов обладают уникальными пьезо-, пиро- и сегнетоэлектрическими свойствами.

Большая и результативная работа проведена Физическим институтом АН СССР по искусственному получению монокристаллов наиболее тугоплавких (температура плавления до 2900° С) соединений на основе окислов циркония и гафния со стабилизирующими неустойчивую кубическую структуру и свойства присадками, в основном окиси иттрия [1]. Воспроизводимо получены прозрачные кристаллы новых, не представленных в природе драгоценных камней, названных фианитами. Они обладают широким ассортиментом физических свойств. Советские лицензии и патенты по этим монокристаллам, а также методам получения лазерных кристаллов приобретены капиталистическими странами [1]. Велико число родственных им по составу, искусственно полученных поликристаллических материалов и стекол.

Наряду с созданием новых материалов достигнуты большие успехи и в промышленном получении фторфлогопитовой слюды, впервые детально изученной Д. П. Григорьевым [27], и оптического кальцита [2, 10], а также и в выращивании технически важных монокристаллов водорастворимых веществ — триглицинсульфата, дигидрофосфата калия, иодата калия и других солей. Особенно большой размах приобрело выращивание полупроводниковых кристаллов. В сверхчистых средах выращиваются гигантские монокристаллы кремния (наиболее чистого вещества, получаемого промышленностью), германия, а также монокристаллы других полупроводниковых соединений — арсенида и фосфида галлия, фосфида индия, арсенида и антимонида индия и др. [15]. Большая работа ведется и по выращиванию монокристаллов цветных и редких металлов [12].

В коротком очерке нельзя охватить весь широкий фронт «ростовых» работ, на котором занята целая армия советских кристаллографов — минералогов, физиков, химиков, физико-хими-

ков, инженеров, технологов и даже биологов (выращиваются и исследуются и кристаллы белков). Каждый день приносит новые сведения о закономерностях роста кристаллов, о связи их морфологии и свойств с условиями кристаллизации. Новый этап синтеза монокристаллов — получение монокристальных пленок, на основе которых создана микроэлектроника.

Метод их получения разработан в 1954 г. Это тонкие (менее 0,1 мм) автоэпитаксиальные слои на монокристаллах кремния и германия. Медленность кристаллизации из газовой фазы позволила изменять состав слоя в соответствии с требованиями конструкторов электронных устройств. Так были получены впервые простейшие интегральные схемы [26]. На автоэпитаксиальных пленках выросли микроэлектроника и миниатюризация электронных приборов, позволившие, в свою очередь, осуществить автоматизацию рабочих процессов и в промышленности, и в управлении. За 1980 г. мировое производство (без СССР) кремния для интегральных схем превысило 3000 т, что больше количества других искусственных монокристаллов.

Нашла применение и гетероэпитаксия. В микроэлектронике используются определенным образом вырезанные из монокристаллов сапфира подложки, на которых наращивают тонкие кремниевые слои. Используются также подложки из гадолиниево-галлиевого и из иттриевого граната, на которые наращивают феррогранатовые пленки с редкоземельными компонентами, служащие в качестве элементов памяти в счетно-решающих устройствах.

Несмотря на большую роль, которую сыграла эпитаксия в производстве интегральных схем и в развитии автоматики, необходимость структурного соответствия слоя и подложки часто была почти неодолимым препятствием для расширения ее применения. Подходящие друг к другу слои и подложки редки, кроме того, существующие подложки дороги и ограничены по размерам. Эти трудности устранила «искусственная эпитаксия» [11, 25]. Она позволяет нанести любое кристаллическое вещество в виде монокристаллического слоя на любую подложку не только монокристальную, но даже и на аморфную или поликристаллическую.

Таков сжатый обзор некоторых достижений по выращиванию технических кристаллов и пленок. Количество синтезированных кристаллов очень велико. С 1945 г. в мире опубликована не одна тысяча исследований тончайшей морфологии кристаллов. В них отыскиваются признаки зарождения и развития неоднородностей — включений, двойников, дислокаций, дефектов упаковки и подобных образований. Большинству авторов зарубежных исследований вряд ли известно, что еще в начале века А. Е. Ферсман определил направление и перспективу их работ. Многим ученым, знавшим работы А. Е., его идеи казались фантастическими, но жизнь их реализовала с огромным избытком. Главное же в том, что эти «мечты» послужили мощным стимулом к ускоренному развитию этих работ.

Кристаллографы часто указывают на связь кристаллографии с другими науками. Эта связь за последние четверть века материализовалась полностью в виде технической кристаллографии разного профиля. Ее роль в научно-техническом прогрессе чрезвычайно возросла в связи с возросшим значением синтетических монокристаллов, особенно для создания сверхчувствительных приборов и автоматизированных систем управления. Президент АН СССР академик А. П. Александров, открывая в сентябре 1980 г. в Москве VI Международную конференцию по росту кристаллов, отметил, что работы по росту кристаллов превосходят по своей актуальности работы по атомной энергии [28].

В. И. Вернадский в 1928 г. писал: «Кристаллография не отделилась от минералогии, но охватила ее по-новому, проникая в самые основные ее построения, коренным образом ее изменила» [7].

Сейчас можно сказать, что техническая кристаллография сделала более мощным воздействие на прогресс не только минералогии, но и всех наук, занятых изучением кристаллического вещества. У истоков этой огромной работы стоял и А. Е. Ферсман.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Александров В. И., Осико В. В., Прохоров А. М., Татаринцев В. М.* Получение монокристаллов, поликристаллических материалов и стекол методом прямого высокочастотного плавления в холодном контейнере.— Успехи химии, 1978, № 3, с. 385—426.
2. *Аникин И. Н., Багдасаров Х. С.* Получение крупных монокристаллов слюды — фторофлогопита.— В кн.: VI Междунар. конф. по росту кристаллов: Тез. докл. М., 1980, т. 3, с. 79—80.
3. *Багдасаров Х. С.* Проблемы синтеза тугоплавких оптических монокристаллов.—В кн.: Рост кристаллов. Ереван: Ереван. ун-т, 1977, т. 12, с. 179—195.
4. *Безруков Г. Н., Бутузов В. П., Самойлович М. И.* Синтетический алмаз. М.: Недра, 1976. 119 с.
5. *Бутузов В. П.* Искусственный кварц.— Тр. ВНИИП, 1962, 6, с. 5—11.
6. *Бутузов В. П.* Предсказания академика А. Е. Ферсмана осуществились.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М.: Наука, 1975, с. 133—140.
7. *Вернадский В. И.* Задачи минералогии в нашей стране.— Природа, 1928, № 1, с. 21—40.
8. *Дерягин Б. В., Спицын Б. В.* Химическая кристаллизация алмаза.— В кн.: Рост кристаллов. Ереван: Ереван. ун-т, 1977, т. 12, с. 28—32.
9. *Дерягин Б. В., Федосеев Д. В.* Рост алмаза и графита из газовой фазы. М.: Наука, 1977. 116 с.
10. *Каправлов К. В., Корицкий Ю. В., Шефталь Н. Н.* Первые опыты выращивания крупных кристаллов слюды.— В кн.: Рост кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1957, т. 1, с. 273—228.
11. *Клыков В. И., Шефталь Н. Н., Шефталь Р. Н.* Ориентированная кристаллизация на аморфных и поликристаллических подложках (искусственная эпитаксия).— В кн.: Процессы реального кристаллообразования/Под ред. Н. В. Белова. М.: Наука, 1977, с. 144—150.
12. Металлические монокристаллы: Получение и исследование свойств: (Материалы совещ.)/Под ред. Е. М. Савицкого. М.: Наука, 1976. 263 с.
13. *Погодин Ю. В., Сергеев Б. М.* Некоторые вопросы морфологии и оптические свойства монокристаллов искусственного кальцита.— В кн.: Рост кристаллов. М.: Наука, 1967, т. 7, с. 190—196.

14. *Попов С. К.* Выращивание и некоторые применения кристаллов драгоценного корунда.— В кн.: Рост кристаллов. М.: Изд-во АН СССР, 1957, т. 2, с. 140—210.
15. Процессы роста и синтеза полупроводниковых кристаллов и пленок. Новосибирск: Наука, 1975. Ч. 1. 268 с.; Ч. 2. 438 с.
16. *Рич В. И., Чередненко М. Б.* Неоконченная история искусственных алмазов. М.: Наука, 1976. 137 с.
17. Рост кристаллов из высокотемпературных водных растворов/Под ред. А. Н. Лобачева. М.: Наука, 1977. 232 с.
18. *Спицын Б. В.* Рост кристаллов в условиях термодинамической метастабильности.— В кн.: Рост кристаллов. М.: Наука, 1980, т. 13, с. 55—62.
19. *Тимофеева В. А.* Рост кристаллов из растворов в расплавах. М.: Наука, 1978. 297 с.
20. *Ферсман А. Е.* Основные вопросы организации научной работы.— Вестн. АН СССР, 1936, № 10, с. 27—42.
21. *Ферсман А. Е.* Из истории культуры камня в России. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. 55 с.
22. *Ферсман А. Е.* Кристаллография алмаза/Ред. и комментарии Д. С. Белянкина, И. И. Шафрановского. Л.: Изд-во АН СССР, 1955. 566 с.
23. *Шефталь Н. Н.* Статический метод выращивания монокристаллов из растворов (научные и практические итоги).— Тр. Ин-та кристал. АН СССР, 1948, вып. 4, с. 231—233.
24. *Шефталь Н. Н.* Первые советские опыты выращивания кварца. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 85 с.
25. *Шефталь Н. Н.* Закономерности реального кристаллообразования и некоторые принципы выращивания монокристаллов.— В кн.: Рост кристаллов. М.: Наука, 1974, т. 10, с. 195—220.
26. *Шефталь Н. Н., Кокориш Н. П., Красилов А. В.* Кристаллизация монокристаллических слоев кремния и германия из газовой фазы.— Изв. АН СССР. Сер. физ., 1957, **21**, с. 140—152.
27. *Ямзин И. И.* Искусственная слюда (обзор литературы).— Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1952, ч. 81, № 3, с. 224—231.
28. *Chernov A. A.* A view on ICCG-6.— In: Crystal Growth 1980. Amsterdam: North-Holland, 1981, p. XII.

УДК 549.6 : 552.33

Б. Е. БОРУЦКИЙ

ИДЕИ АКАДЕМИКА А. Е. ФЕРСМАНА И СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ХИБИН

Огромной творческой энергии и энтузиазму академика А. Е. Ферсмана мы обязаны открытием на Кольском полуострове уникальных месторождений апатита и нефелина, медно-никелевых и редкометальных руд, других ценных полезных ископаемых. Хибины в созвездии кольских месторождений сверкают звездой первой величины. Именно отсюда началось наступление на богатства недр полуострова. В Хибинах многое связано с именем А. Е. Ферсмана: река Ферсмана, перевал Ферсмана, ущелье Ферсмана. Здесь поднялся первенец советских пятилеток — Хибиногорск, носящий сейчас имя С. М. Кирова, внесшего неоценимый вклад в освоение хибинских апатитовых месторождений. В г. Апатиты отпраздновал свое 50-летие оплот советской науки

в Заполярье — Кольский филиал АН СССР им. С. М. Кирова. В честь А. Е. Ферсмана назван один из интереснейших хибинских минералов — ферсманит, минерал удивительный, с не разгаданной еще структурой, известный пока только в Хибинах.

Академик А. Е. Ферсман много времени и сил отдал изучению минералогии, геохимии и полезных ископаемых Хибинского щелочного массива. Хибины по праву можно назвать его любимым детищем. Здесь в полную силу проявился и яркий педагогический и организаторский талант А. Е. Ферсмана, увлекшего в бескрайнюю холодную тундру молодых ученых — А. Н. Лабунцова, Б. М. Куплетского, Е. Е. Костылеву, Э. М. Бонштедт и др., сплотившего их в великолепный творческий ансамбль, работами которого гордится отечественная наука. Руководящими в этих работах были идеи А. Е. Ферсмана. И через полвека, оглядываясь назад, сопоставляя их с проблемами, волнующими хибинских исследователей в настоящее время, мы поражаемся мощью поставленных им в свое время задач, гениальной интуицией его научного предвидения. И хотя наши представления о геологии Кольского полуострова и Хибинского массива, вещественном составе и генезисе пород и минералов, конечно же, существенным образом изменились, мы очень часто вновь и вновь возвращаемся к первоначальным гипотезам А. Е. Ферсмана и его сотрудников, убеждаясь в их справедливости.

Исследуя закономерности формирования щелочных пород, А. Е. Ферсман особое значение придавал гипотезе о возникновении всех щелочных интрузивов Кольского полуострова в процессе единого тектоно-магматического цикла, проявившегося в палеозое [35]. Подтверждение этого А. Е. Ферсман видел в приуроченности их к одной системе разломов. Предполагался и литолого-стратиграфический контроль — внедрение интрузий в участки фундамента, сложенные легко разложимыми под воздействием магмы известняками или доломитами (в вопросе о «механизме» образования щелочных пород, как известно, в то время господствующими были взгляды Р. Дэли). Этот вывод А. Е. Ферсмана имеет огромное значение для разработки проблемы минерагенических эпох, эволюции магматизма во времени, в частности щелочного, с которым на Кольском полуострове связано наибольшее число полезных ископаемых.

Согласно современным представлениям, сложное блоковое строение Кольского региона обусловлено проявлением глубоких разломов северо-западного простирания, унаследовавших ориентацию древних протерозойских складчатых структур, и разрывных нарушений северо-восточного простирания, возникших в результате палеозойской активизации. При этом предполагается, что для области активизации характерен многофазовый магматизм, проявившийся в три стадии внедрения: 1) протерозойские интрузии щелочно-габброидной формации (Гремяха-Вырмес); 2) синхронные с каледонскими движениями многочисленные интрузии щелочно-ультраосновных пород центрального типа

с карбонатитами (Ковдор, Африканда и др.); 3) поздние, синхронные с герцинскими движениями крупнейшие в мире интрузивы нефелин-сиенитовой формации (Хибины, Ловозеро). Отступления от представлений А. Е. Ферсмана основываются на геохронологических данных: 1600—1675 млн. лет для Гремяха-Вырмес, 344—426 млн. лет для щелочно-ультраосновных каледонид и 290—300 млн. лет для герцинских нефелиновых сиенитов [27]. Существует и тектоническое обоснование — проникновение герцинских интрузий стали связывать с зонами разломов более глубокого заложения, достигающих поверхности Мохоровичича [8].

Вывод о герцинском возрасте Хибин и Ловозера был сделан на основании определения А. Н. Криштофовичем отпечатков флоры в ксенолитах вулканогенно-осадочных пород в ловозерских нефелиновых сиенитах (D_3—C_1) и следующих определений: 286 млн. лет — $^{232}Th/^{208}Pb$ методом и 290 млн. лет — $^{238}U/^{206}Pb$ методом по ловчорриту [20] и 300 млн. лет — $^{40}K/^{40}Ar$ методом по полевому шпату [27]. Средняя цифра в 290±10 млн. лет как наиболее вероятная с тех пор воспроизводится во всех публикациях о Хибинском и Ловозерском массивах.

Однако в настоящее время имеются уже и другие данные. Так, В. А. Кононовой и Л. Л. Шаниным [41] для серии нефелинов из мельтейгит-уртитов Хибин получены цифры 386—430 млн. лет. Нами [24] тем же $^{40}K/^{40}Ar$ методом в той же лаборатории ИГЕМ АН СССР для серий сосуществующих породообразующих минералов из разных типов хибинских пород и пегматитов найден еще больший разброс значений возраста 250—550 млн. лет. Учитывая, что обычно (но далеко не всегда) по полевому шпату возраст несколько занижен, а по нефелину — завышен из-за перераспределения аргона в породе, мы приняли за основу данные, полученные по биотитам: 364—414 (в среднем 390) млн. лет, т. е. на 100 млн. лет древнее. Недавно эта цифра была подтверждена Л. Н. Когарко с соавторами [19] $^{87}Rb/^{86}Sr$ методом, получившими для серии образцов пород из Хибинского массива цифру 365±13 млн. лет. Поскольку аналогичные значения были ими установлены и для пород щелочно-ультраосновных массивов Африканды (363 млн. лет) и Хабозера (365 млн. лет), то можно считать доказанным, что представления о формировании палеозойских щелочных интрузий на Кольском полуострове в две стадии (два цикла) не соответствуют действительности.

Представления о едином цикле формирования палеозойских щелочных интрузий не противоречат и новым данным о тектонике Кольского региона. Подавляющее большинство их сосредоточено в пределах Главного Кольского горста, ограниченного Туломской и Хибинской зонами глубинных разломов, причем к последней в равной степени приурочены как щелочно-ультраосновные массивы — Салланлатвинский, Вуориярвинский, Африкандский, Хабозерский, Лесная Варака, Салмогорский, Кургинский и Контозерский, так и массивы нефелин-сиенитовой форма-

ции — Хибинский, Ловозерский, Соустова [25]. В Хибинах, как известно, развиты не только нефелиновые сиениты, но и ультраосновные щелочные породы мельтейгит-уртитового ряда, а в последние годы здесь обнаружены и карбонатиты [23]. Все это позволяет рассматривать Хибинский массив как промежуточное звено между интрузивами, принадлежащими к двум различным формациям — щелочно-ультраосновной и нефелин-сиенитовой.

Что можно сказать о литолого-стратиграфическом контроле? Хотя прослои доломитов и отмечаются в толщах протерозойских и палеозойских вулканогенно-осадочных пород Кольского региона, они, конечно, не могли сыграть той роли в формировании щелочных пород, какую им отводил А. Е. Ферсман. Особенности химического состава пород, изотопные отношения в них с большой определенностью указывают на подкоровый, мантийный источник щелочных магм. Однако это не исключает возможности взаимодействия внедренной щелочной магмы и отщепленных от нее растворов с окружающими породами архейского основания, протерозойского складчатого комплекса и палеозойского платформенного чехла, что выражается в их ороговиковании, сиенитизации и фенитизации. Изучение состава и фациальной принадлежности ксенолитов вмещающих пород рамы в щелочных породах может помочь при реставрации структурно-геологических и физико-химических условий формирования интрузивов, выяснению их внутренней структуры. Кроме того, контактово-измененные породы могут стать дополнительным источником разнообразных полезных ископаемых.

Парадоксально, но породы палеозойской толщи (D_3—G_1) в Кольском регионе сохранились только в виде реликтов в кровле ряда щелочных интрузивов — Контозерского, Ловозерского и Хибинского (?). Все эти интрузивы находятся в пределах Главного Кольского горста, поднятого относительно соседних блоков на 4—5 и 8—10 км и сильно денудированного, в связи с чем на его поверхности обнажаются породы архейского фундамента, самые древние на Кольском полуострове. Сохранению здесь палеозойских осадков, полностью уничтоженных на остальной территории региона, вероятно, способствовало возникновение над указанными нефелин-сиенитовыми интрузивами гигантских кальдер проседания, подобных наиболее хорошо сохранившейся в настоящее время кальдере Контозерского массива. Одновременно это указывает на относительно небольшую глубину формирования нефелин-сиенитовых массивов (субвулканическую их природу). С другой стороны, ни в Ловозерском, ни в Хибинском массивах, даже в прикровлевых их частях, не обнаружены стекловатые разности нефелиновых сиенитов, что указывает на формирование интрузивов на глубине не менее 4—7 км [6]. Это несоответствие, естественно, вызывает ряд вопросов. Могли ли существовать столь мощные платформенные отложения палеозоя, а если да, то почему они так бесследно исчезли в Кольском регионе? Может быть, кровлей нефелин-сиенитовых интрузивов служили не

палеозойские, а более древние мощные отложения нижнего или верхнего протерозоя? Все это выливается в проблему достоверной идентификации ксенолитов, захваченных щелочными интрузиями, с метаморфическими породами разных структурно-формационных комплексов Кольского региона, детального изучения их химического и минерального состава, а также тщательного картирования.

В Ловозерском массиве к палеозойским образованиям (так называемой ловозерской свите) достоверно относят только слабо метаморфизованные осадочные породы (глинистые и мергелистые сланцы, филлиты, кварциты и аркозовые песчаники), в которых была обнаружена девонская флора, переслаивающиеся с основными эффузивами (пикрит-, авгит- и эссексит-порфиритами), их туфами и туфогенными сланцами. В отношении ассоциирующей с ними большой группы щелочных эффузивов (нефелиновые и щелочные сиенит-порфиры, щелочные овоидофиры, псевдолейцитовые фонолит- и ромбен-порфиры) существуют разногласия — одни исследователи отождествляют их с породами ловозерской свиты [10], другие [6] выделяют в самостоятельную раннюю интрузивную фазу Ловозерского плутона.

В Хибинском массиве, в западной (гора Юмъечорр) и юго-восточной (гора Китчепахк) его частях, обнаружены филлиты и пикрит-порфириты, аналогичные породам ловозерской свиты [11]. К этой свите некоторые исследователи [14, 34] относят также ромбен-порфиры и ассоциирующие с ними туфовые сланцы и туфы пикрит-порфиритов с ксенолитами авгит-порфиритов, обнажающиеся в контакте грубо- и среднезернистых трахитоидных хибинитов в западной части массива. Крупный раздробленный и сиенитизированный останец этих пород прослежен здесь на 10 км (отроги гор Юдичвумчорр и Часночорр). Однако другие исследователи [8] склонны выделять ромбен-порфиры в самостоятельную раннюю интрузивную фазу Хибинского массива.

В то же время другие ксенолиты надежно отождествляются с кристаллическими породами архея и протерозоя. Кварциты и сланцы на горе Китчепахк — с рижгубской свитой, а углисто-глинистые сланцы Саамского перевала — с сейдореченской свитой протерозоя. Крупный ксенолит (мощностью более 600 м) кордиерит-андалузитовых, силлиманит- и амфибол-плагиоклазовых роговиков подсечен скважинами в контакте среднезернистых трахитоидных хибинитов с мельтейгит-уртитами и рисчорритами в районе оз. Малый Вудьявр (Маловудьяврский блок). Близкие к ним по составу кордиеритовые, андалузитовые и силлиманитовые роговики с корундом и мусковитом, а также кварциты прослежены почти на 20 км в фойяитах на удалении 1—2 км от их контакта с рисчорритами (горы Эвеслогчорр и Кукисвумчорр). Наконец, в последнее время ксенолиты роговиков установлены бурением в северо-западной части рудовмещающей толщи мельтейгит-уртитов. Обращает на себя внимание, что ксенолиты ороговикованных сланцев протерозоя распространены только в се-

веро-западной, юго-западной и южной частях массива, в то время как ксенолиты архейских гнейсов — на севере и юго-востоке, что соответствует их залеганию за пределами Хибин и позволило сделать вывод о сохранении палеоконтура развития кристаллических толщ архея и нижнего протерозоя, проследить положение древнего их контакта [29]. Вместе с тем до сих пор остается неясным возраст вулканогенно-осадочных пород, слагающих кровлю Хибинского интрузива: являются ли они действительно платформенными отложениями девона—карбона или слабо метаморфизованными отложениями нижнего—среднего протерозоя или, может быть, их следует относить к не известным еще в этом районе Кольского полуострова породам венда—рифея, развитым на о-ве Кильдин и Терском берегу.

В связи с обсуждаемой проблемой необходимо упомянуть также о находках в хибинских щелочных породах (горы Маннепахк и Китчепахк) реликтов необычных форстерит-диопсидовых пироксенитов и перидотитов с флогопитом, мелилитом, монтичеллитом, меланитом и перовскитом, аналогичных по составу породам щелочно-ультраосновных интрузий Кольского полуострова и относимых А. В. Галаховым [8] к продуктам дохибинского раннекаледонского щелочного магматизма.

Заключая этот раздел, отметим, что пристальное изучение реликтов древних кристаллических пород в нефелиновых сиенитах Хибин и Ловозера имеет не только научное, но и практическое значение. Контактовое взаимодействие щелочной магмы с разными по составу осадочно-метаморфическими породами приводит к образованию специфических комплексов минералов, среди которых установлены ловенит и титаноловенит, чевкинит, бритолит, тундрит, виллемит, волластонит, корунд, шпинель (герцинит), гранат, топаз и др. [40]. В последнее время особое внимание привлекли сиенитизированные роговики в фойяитах Хибин со своеобразными, выделенными в свое время А. Е. Ферсманом пегматитами «линии скрещения», с которыми связаны значительные концентрации сапфира [22, 5].

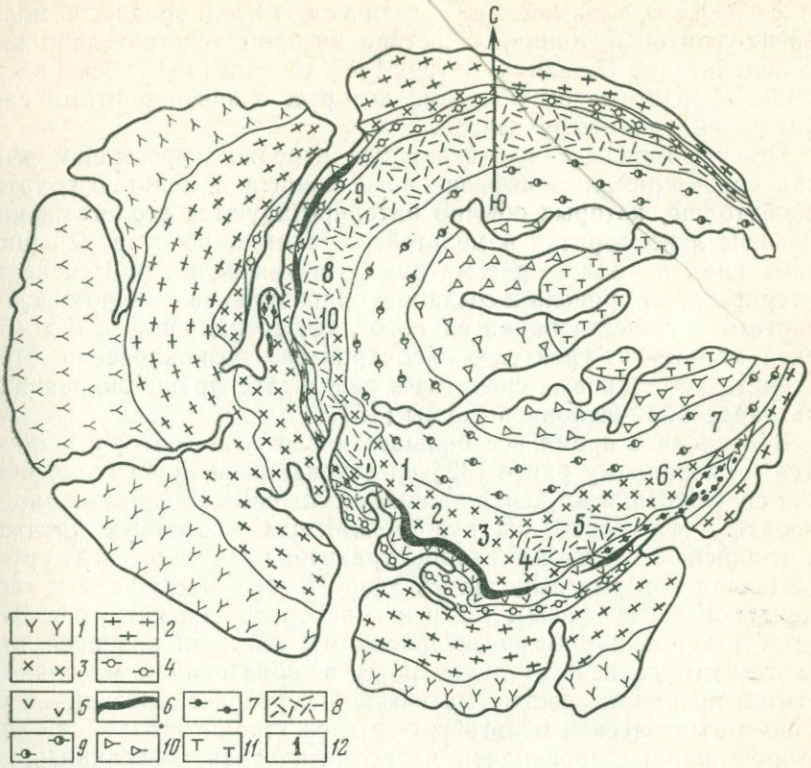
Как и прежде, узловой продолжает оставаться проблема выяснения возрастных соотношений самих щелочных пород Хибинского массива, а также их генезиса. Однозначное решение этой проблемы имеет важное научное и практическое значение, поскольку призвано объяснить условия формирования уникального комплекса щелочных пород и единственных в своем роде месторождений апатита, дать правильную оценку запасов фосфатного сырья, перспективы выявления новых апатитовых залежей, разработать научные критерии их поиска.

При разработке этой проблемы определяющее значение имеют идеи А. Е. Ферсмана о кольцевом строении Хибинского плутона. «Эта идея сделалась руководящей для всего анализа Хибинского плутона. Выяснение его структуры, происхождения и хода дифференциации, проблемы рассеяния и концентрации химических элементов в Хибинских тундрах — все это зависит от

применения и уточнения этой идеи» [35, с. 183]. Кольцевое строение Хибин и Ловозера было выявлено А. Е. Ферсманом и его сотрудниками впервые и поражало своей неожиданностью. Сопоставление с аналогичными интрузивами Финляндии, Норвегии, Шотландии, Америки и Африки сделало эту закономерность всеобщей для подобных образований, известных нам сегодня как массивы центрального типа. «Мы имеем дело с широко распространенным явлением, до сих пор недостаточно изученным. В частности, вопрос о кольцевом строении Хибин мы должны сейчас подвергнуть детальному петрографическому, геохимическому и геологическому анализу и попытаться выявить его черты и генезис» [37, с. 756].

Казалось бы, детальные геолого-петрологические исследования, выполненные под руководством А. Е. Ферсмана [26], а также Н. А. Елисеевым с сотрудниками [13], А. В. Галаховым [8] и другими исследователями, геологическая съемка массива и мельтейгит-уртитовой его дуги, выполненная в 60-х годах геологами Северо-Западного геологического управления [14, 38], результаты глубокого поисково-разведочного бурения, проводившегося в 70-е годы геологами Хибиногорской ГРП, дали в руки исследователей достаточный фактический материал для решения рассматриваемой проблемы. Однако даже по самым кардинальным вопросам и по сей день существуют противоречивые выводы разных исследователей, что определяется чрезвычайной сложностью объекта. Хибины — это своеобразный «затерянный мир» минералогических парадоксов и несуразностей, вобравший в себя черты многих щелочных интрузивов мира.

Один из главных вопросов — возрастные соотношения между нефелиновыми сиенитами массива (хибинитами, лявочорритами, фойяитами) и породами Центральной дуги (рисчорритами, мельтейгит-уртитами) (фиг. 1). Действительно ли в восточной части Хибин сформировался второй субвулкан, сложенный лявочорритами и фойяитами, срезающий более древние хибиниты, рисчорриты и мельтейгит-уртиты, или справедлива первоначальная гипотеза Б. М. Куплетского — А. Е. Ферсмана о близкоодновременном образовании всех нефелиновых сиенитов массива и позднем внедрении мельтейгит-уртитовой дуги с локализованными в ее пределах апатитовыми залежами? От правильного решения этого вопроса зависит многое. Если второй субвулкан существует, то апатитсодержащие породы на глубине все уничтожены и запасы фосфора в Хибинах ограничиваются уже известными месторождениями в приповерхностной части мельтейгит-уртитовой интрузии. Однозначным решением этого вопроса была бы проходка сверхглубокой структурной скважины. Эту задачу предвидел А. Е. Ферсман, когда писал следующие строки: «Имеется еще задача, представляющая большой интерес, к которой надо готовиться. Речь идет о глубоком бурении в верховьях Тулиока, с целью пересечения основных дуг, падающих к центру под углом в 30°. Такое бурение во много сотен метров должно



Фиг. 1. Схематическая геологическая карта Хибинского массива

1—2 — трахитоидные хибиниты: *1* — грубозернистые, *2* — среднезернистые; *3* — рисчорриты; *4* — трахитоидные ийолиты; *5* — массивные уртиты; *6* — апатитовые рудные тела; *7* — малиньит-луявриты; *8* — лявочорриты; *9—10* — трахитоидные фойяиты; *9* — арфведсонитовые, *10* — эгирин-арфведсонитовые; *11* — массивные пироксеновые фойяиты; *12* — апатитовые месторождения (цифры на схеме): 1 — Кукисвумчорр, 2 — Юкспор, 3 — Апатитовый цирк, 4 — Плато Расвумчорр, 5 — Коашва, 6 — Суолуайв, 7 — Ньоркпахк, 8 — Куэльпор, 9 — Кунийок—Лявойок, 10 — Партомчорр

подсечь апатито-нефелиновую дугу на большой глубине и этим путем дать глубинный разрез той последовательности пород, которую мы наблюдаем по долине р. Лопарской» [37, с. 763].

Пока такая скважина не пробурена, мы опираемся на геофизические и геолого-петрологические данные, которые во многом противоречивы. Так, более крутые контакты лявочорритовой интрузии по отношению к падению трахитоидности мельтейгит-уртитов, пересечение трахитоидных мельтейгит-уртитов жилами нефелин-сиенитовых пегматитов со стороны контакта с лявочорритами указывают на более молодой возраст лявочорритов. Однако отмечаются случаи и постепенного перехода некоторых разностей мельтейгит-уртитов (луявритов) в лявочорриты. Массивные же, рудовмещающие уртиты «инъецируют» лявочорриты.

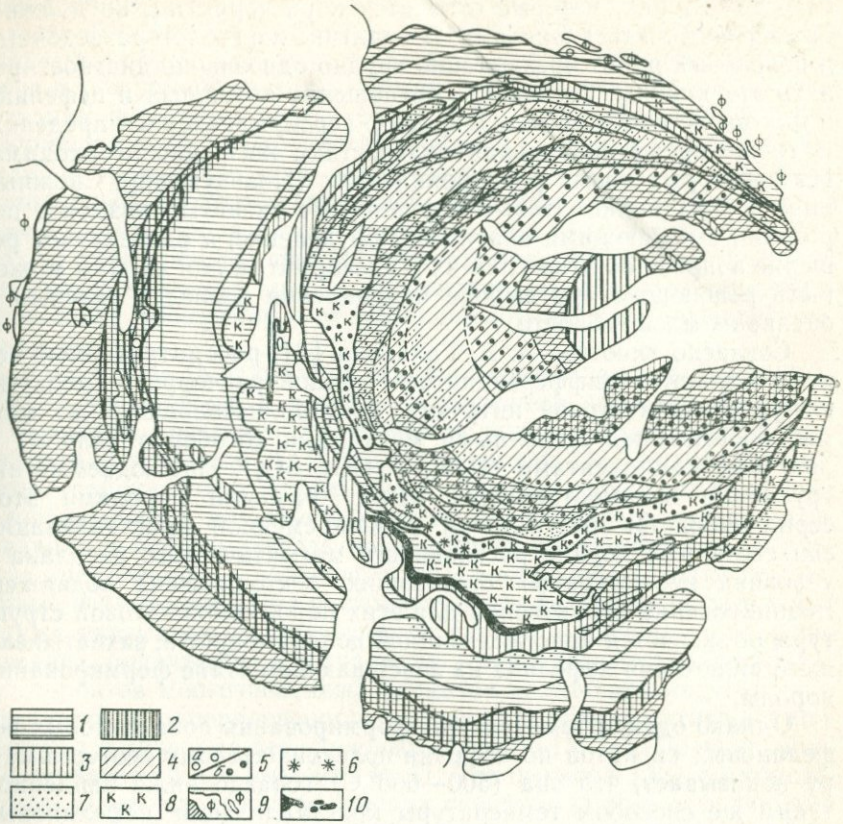
Это, очевидно, указывает на генетическую неоднородность мельтейгит-уртитовой толщи, в составе которой действительно ряд исследователей выделяют от трех [38] до пяти [15] субфаз внедрения, возрастные соотношения которых с лявочорритами следует рассматривать раздельно.

Поисково-разведочные скважины нередко пересекают участки грубозернистого нефелинового сиенита в мельтейгит-уртитовой толще, которые обычно интерпретируются геологами как апофизы лявочорритов в мельтейгит-уртитах, но с не меньшим основанием их можно рассматривать и как реликты. Неясность интерпретации привела к созданию оригинальной компромиссной гипотезы о существовании единого дифференцированного комплекса мельтейгит-уртитов — лявочорритов, возникновении этой разности нефелиновых сиенитов в результате фракционирования ультраосновной щелочной магмы [16].

В последнее время все большее число геологов присоединяются к сделанному ранее [32] на основании анализа геологических соотношений на действующих апатитовых рудниках выводу о позднем формировании рудовмещающих массивных уртитов по отношению как ко всей толще трахитоидных мельтейгит-уртитов (среди которых выделялись «дорудные» — 1 субфазы и «пострудные» — 3 субфазы), так и к лявочорритовой интрузии. Это соответствует и нашим представлениям с той лишь разницей, что мы отводим главенствующую роль в образовании массивных уртитов процессам постмагматической перекристаллизации первично-магматических мельтейгит-уртитов (трахитоидных), в ходе которой широко проявилась метасоматическая нефелинизация пород [2, 24].

Для решения генетических вопросов могут быть полезными и собственно минералогические методы. Так, исследуя типоморфные особенности минералов Хибинского массива, мы выявили определенные различия в составе породообразующих минералов (полевого шпата, нефелина, пироксена) нефелиновых сиенитов и мельтейгит-уртитов и провели на этой основе первое минералогическое картирование [4] (фиг. 2). Используя данные о типоморфизме минералов, можно однозначно показать, что лявочорриты не могут быть дифференциатами мельтейгит-уртитовой магмы, так как содержат не свойственные мельтейгит-уртитам калиево-натриевый полевой шпат (пертит), обогащенный натрием нефелин и эгирин-салит. В то же время отчетливые признаки процессов калишпатизации и Si/Al разупорядочения пертитового полевого шпата в приконтактовых частях лявочорритовой интрузии и лявочорритовых обособлениях в мельтейгит-уртитовой толще указывают на явления преобразования этих пород, по-видимому, синхронные с постмагматическими преобразованиями в мельтейгит-уртитах.

Не менее важным является вопрос о возрасте и природе своеобразных пойкилитовых нефелиновых сиенитов Хибинского массива. Еще А. Е. Ферсман обращал внимание на огромное геохи-



Фиг. 2. Схематическая карта распространения минеральных ассоциаций породообразующих минералов в Хибинском массиве, по Б. Е. Боруцкому и др. [4]

1 — эгирин; *2* — эгирин-салит; *3* — эгирин-диопсид; *4* — арфведсонит; *5* — слюды (*а* — флогопит, *б* — биотит, лепидомелан); *6* — астрофиллит; *7* — альбит (зоны альбитизации); *8* — существенно калиевый полевой шпат: микроклин, адуляровидный ортоклаз; *9* — фениты; *10* — апатит-нефелиновые залежи. Кроме *7*, *8*, в области остальных контуров — K-Na полевой шпат — микропертит

мическое значение этих пород. В настоящее время геологи различают две их разности: рисчорриты, существенно обогащенные пойкилитическим ортоклазом, и ювиты, обогащенные нефелином. Первые рассматриваются как предшествующие образованию мельтейгит-уртитов (поскольку присутствуют в них в виде ксенолитов), вторые — как завершающие формирование мельтейгит-уртитов, последняя их субфаза. Однако и те и другие считаются более древними по отношению к лявочорритовой интрузии.

Вопрос о возрасте и природе пойкилитовых нефелиновых сиенитов не лишен также и практического значения. Согласно сказанному выше, апатит-нефелиновые породы могли формировать-

ся в тех из них, которые относятся к рисчорритам, но должны были уничтожаться ювитами. В практике же геологоразведочных и поисковых работ чрезвычайно трудно однозначно диагностировать эти породы, поскольку соотношение ортоклаза и нефелина в них варьирует в весьма широких, перекрывающихся пределах. В то же время правильная диагностика жизненно необходима. На некоторых новых рудопроявлениях (Поачвумчорр, Снежный цирк и др.) пойкилитовые нефелиновые сиениты оказались породами, вмещающими апатитовое оруденение, и однозначное решение вопроса об отнесении их к рисчорритам или ювитам может быть решающим при выборе направления разведки залежей и оценке их масштабности.

Согласно гипотезе А. В. Галахова [8], рассматриваемые породы являются дифференциатами единой рисчоррит — мельтейгит-уртит—апатитовой интрузии, кристаллизовавшейся из магмы, обогащенной щелочными металлами (особенно калием) и летучими компонентами (P_2O_5, F, CO_2, SO_3). Наблюдаемые интрузивные взаимоотношения между разными породами этой серии являются результатом разновременной кристаллизации сингенетичных порций расслоенного магматического расплава в условиях неоднократно оживавших тектонических подвижек. Возникновение характерной для этих пород пойкилитовой структуры объясняется кристаллизацией полевого шпата, захватывающего включения нефелина на завершающем этапе формирования породы.

Однако оценка температуры формирования пойкилитовых нефелиновых сиенитов по нефелин-полевошпатовому геотермометру показывает, что она (500—600° С) гораздо ниже найденной таким же способом температуры кристаллизации нефелиновых сиенитов Хибинского массива (800—1000° С). При изучении типоморфизма минералов пойкилитовых нефелиновых сиенитов выявилась резкая обогащенность их калием — богатый калием нефелин, кальсилит, почти чисто калиевый полевой шпат [4, 24]. На основе экспериментальных данных о фазовом соответствии между нефелином и полевым шпатом [42] было показано, что столь высококалиевые составы этих минералов не могли возникнуть из равновесного с ними расплава, соответствующего составу рисчоррита или ювита и тем более в большей степени обогащенного натрием мельтейгита или уртита; для их образования необходима среда, более обогащенная калием [1]. Изучение структурных особенностей калиевых полевых шпатов в пойкилитовых нефелиновых сиенитах также указывает на относительно низкотемпературные (550° С) условия их формирования, поскольку в этих удивительных породах сосуществуют весьма неупорядоченный адуляровидный ортоклаз (79—83% Al в T_1, т. е. 36—42% в t_10, $\Delta p=0$) и максимально упорядоченный микроклин (92—100% Al в t_10, $\Delta p=0{,}83$—$1{,}00$).

Широкое развитие в пойкилитовых нефелиновых сиенитах лепидомелана, позднего лучистого эгирина и своеобразного комп-

лекса акцессорных, преимущественно калиевых минералов, многие из которых содержат воду и другие летучие компоненты, по нашему мнению [2], свидетельствует о том, что формирование этих пород явилось результатом постмагматической перекристаллизации первично-магматических пород под действием богатых калием растворов. Перекристаллизация сопровождалась частичными метасоматическими замещениями: калишпатизацией, нефелинизацией, лепидомеланизацией, эгиринизацией, цеолитизацией как в самих породах, так и в захваченных вместе с ней пегматитах, а также выделением по системе многочисленных трещинок гидротермальных жилок и прожилков весьма разнообразного комплекса минералов — от ультращелочных до умеренной щелочности.

Отсутствие (в отличие от остальных пород массива) жильных фаций рисчорритов и ювитов, постепенные, нечеткие контакты с породами мельтейгит-уртитовой толщи позволяют нам присоединиться к выводу Л. Л. Солодовниковой [31] о том, что развитие пойкилитовых нефелиновых сиенитов происходило за счет преобразования мельтейгит-уртитов. По-видимому, перекристаллизации в первую очередь подвергались их разности, обогащенные кремнеземом,— полевошпатовые малиньиты. Однако контактовые взаимоотношения рисчорритов с нефелиновыми сиенитами также указывают на интенсивные процессы преобразования последних, приводящие к сохранению в эндоконтактовых разностях рисчорритов многочисленных реликтов калишпатизированного и частично разупорядоченного микроклин-микропертита — типоморфного минерала нефелиновых сиенитов [2, 24]. Поэтому можно согласиться и с выводом И. П. Тихоненкова [33] об образовании пойкилитовых нефелиновых сиенитов за счет нефелиновых сиенитов массива — как хибинитов, так и лявочорритов и фойяитов. Таким образом, хотя все пойкилитовые нефелиновые сиениты формировались в результате единого процесса, рисчорриты и ювиты можно различать, но не по возрасту, а по характеру замещаемого субстрата: ювиты — по мельтейгит-уртитам, рисчорриты — по нефелиновым сиенитам.

Узловым моментом рассматриваемой проблемы является выяснение источника богатых калием и летучими компонентами растворов. Мы не склонны отрывать их от процессов становления Хибинского плутона, в частности от эволюции щелочно-ультраосновной магмы, приведшей к формированию мельтейгит-уртитовой дуги, а на заключительном этапе — карбонатитового ядра. Магма, способная к обособлению таких уникальных апатитовых залежей и карбонатитовых образований, могла отщепить и ультращелочные растворы, богатые редкими и летучими компонентами. Реакционная способность растворов в щелочно-ультраосновных интрузивах с карбонатитами общеизвестна. Уникальность хибинского варианта заключается в том, что замещению подверглись не просто основные и ультраосновные породы, а их высокощелочные разности — мельтейгиты, ийолиты, малиньиты,

что и привело к формированию таких своеобразных пород, как хибинские массивные уртиты и рисчорриты.

Тектоническая активизация в области Центральной дуги Хибинского массива доказывается уже внедрением гигантской кольцевой дайки мельтейгит-уртитов с неоднократными более поздними подвижками (образование второй, западной дуги мельтейгит-уртитов, даек луявритов и т. п.), разгнейсованием и катаклазом окружающих нефелиновых сиенитов (Эвеслогчоррская зона смятия), доапатитовыми и постапатитовыми разломами, которые могли служить подводящими каналами для растворов. Кроме того, нельзя исключать возможной роли в формировании рассматриваемых пород трансмагматических флюидов. Обращает на себя внимание и метасоматическая зональность в этой части массива, замеченная еще И. П. Тихоненковым [33]: проявление нефелинизации и ортоклазизации в породах центральной дуги и зон альбитизации в контактирующих с ними с обеих сторон нефелиновых сиенитах. В дополнение отметим, что ортоклазизация и частичная рисчорритизация нефелиновых сиенитов (лявочорритов) установлена нами в области их контакта с мельтейгит-уртитовой толщей, что еще раз подтверждает наложенный характер этих явлений.

Рассматривая концентрическое строение Хибин, нельзя пройти мимо замечательной работы А. Е. Ферсмана о «геохимических дугах» Хибинского массива: «Геохимически массив состоит из значительного количества дуг, протянутых на различное количество километров, гораздо более многочисленных и более сложных по своей морфологии, по своему составу, по роду химических соединений и, наконец, по своему генезису, чем выше описанные петрографические пояса» [37, с. 757]. Эта же тема развивалась и в другой его работе [35]. А. Е. Ферсман с сотрудниками впервые подчеркнули закономерную смену характера акцессорной минерализации в центральных частях массива (в фойяитах) от красного эвдиалита и энигматита к бурому эвколиту, сфену и астрофиллиту. Однако самое интересное — выделение дугообразных зон, к которым приурочены проявления пегматитовых и гидротермальных жил со сходной минерализацией. По направлению с востока — на запад: внутренние дуги — 1) пирротиновая с сульфидами цинка, свинца и молибдена, 2) ловчоррит-ринколитовая с ферсманитом и карбоцером, 3) цеолитовая с флюоритом и цирконом, 4) юкспоритовая; Центральная дуга Хибинского массива — 5) апатит-нефелиновых месторождений; внешние дуги — 6) альбит-цеолитовая с графитом, апатитом, флюоритом и сульфидами молибдена, цинка и железа, 7) апатитовая с редкоземельно-стронциевым апатитом — саамитом, 8) ловчоррит-ринколитовая, 9) эвдиалит-энигматитовая. Разработка этих проявлений дала в руки исследователей прекраснейшие минералогические образцы, украшающие сейчас многие музеи СССР и мира.

Объясняя происхождение подобного распределения минерализации в массиве, А. Е. Ферсман писал: «Для анализа самой природы этих дуг мы должны прежде всего установить, что имеем ряд довольно разнообразных по генезису явлений, которые, тем не менее, все связаны с особенностями механической и химической системы, характеризующей массивы подобного типа, зажатые между сравнительно небольшим покровом пород и менее жестким основанием гнейсовых и сланцевых древних свит... Последовательность горных пород Хибинского комплекса представляет собой результат последовательных этапов постепенного охлаждения этого магматического бассейна, охлаждения, которое началось по периферии и затем постепенно перемещалось к центру, все время несколько отодвигаясь к востоку... Но самое интересное явление и самое, может быть, геохимически и практически важное связано с группой дуговых процессов, с теми расколами и разломами, которые испытал этот массив как с начала своего остывания, так и в его последующей геологической истории... В эти зоны и пояса разломов внедрялись летучие газообразные соединения из более глубоких частей массива; таковым является главнейший пояс разломов, охватывающий огромную часть современной долины Кукисвума... Эти же концентрические разломы могли заполняться остатками пегматитовых расплавов, а когда в значительной степени закончилось остывание верхней части массива, тогда в эти трещины охлаждения поднялись из глубины остаточные магмы, положив начало крупным магматическим образованиям. Такова основная трещина разлома, которая определяет основной рудный комплекс Хибинских тундр, заполненная выделившейся снизу апатито-нефелиновой породой» [37, с.760—762].

С позиций сегодняшнего дня совершенно очевидно научное и практическое значение выдвинутых идей А. Е. Ферсмана о «геохимических дугах» Хибинского массива. Вывод о целесообразности проведения поисковых работ на апатит в пределах центральной дуги массива блестяще оправдался: в дополнение к известным ранее месторождениям центральной группы (Кукисвумчорр, Юкспор, Апатитовый цирк) открыт целый ряд новых месторождений, как выходящих на поверхность (Плато Расвумчорр, Коашва, Суолуайв, Ньоркпахк, Куэльпор, Лявойок, Партомчорр), так и скрытых (Эвеслогчорр). Пространственная связь апатитового оруденения с мельтейгит-уртитами сейчас не вызывает уже сомнений. Неясно, однако, в какой мере является она генетической. Чем объясняется постоянное сонахождение массивных уртитов с апатитовыми залежами? Сингенетичны ли эти породы — возникают в процессе раскристаллизации единой апатит-нефелиновой «магмы» или являются своего рода околорудным изменением?

Говоря о генезисе хибинского апатита, А. Е. Ферсман сравнивал его с процессами флотации на обогатительной фабрике в г. Хибиногорске: «Совокупность всех процессов флотации апати-

та и очистки нефелина приводит к образованию как раз обоих крайних членов ряда: обогащенной апатитовой руды в верхних горизонтах и уртитовой породы — в нижних. Для меня несомненно, что в этом случае мы имеем не простую аналогию и что природный процесс разделения отдельных составных частей огромного апатит-нефелинового тела, очевидно, идет в подвижной расплавленной флюидной системе, богатой летучими компонентами, образовавшими пенистые массы наподобие флотационных установок» [37, с. 758—759]. Показательно, что почти через полвека после этого на основе детальных физико-химических экспериментов и построений к аналогичному выводу о гравитационно-кинетической модели образования апатит-нефелиновых месторождений Хибин пришла Л. Н. Когарко [17]. Эта модель, дополняющая и осложняющая гипотезу о кристаллизационной дифференциации мальтейгит-уртитовой магмы, предполагает разделение минералов в магматической камере конвективными тепловыми потоками в магме в зависимости от соотношения размеров зерен минералов, их плотности, вязкости расплава и градиента температур в камере, объясняя, таким образом, обособление апатитовой руды от подстилающих массивных уртитов. Эта изящная гипотеза весьма привлекательна, хотя и не разрешает всех трудностей и противоречий проблемы генезиса апатитовых месторождений — главной проблемы Хибин.

Накопленные за время изучения Хибин структурно-геологические материалы (фиг. 3), а также данные по составу и структурно-текстурным особенностям пород и слагающих их минералов указывают на значительно большую сложность рассматриваемой проблемы. Хотя массивные уртиты и сопутствуют апатитовой руде, они распространены гораздо шире и встречаются вне связи с апатитовыми залежами. В свою очередь, апатитовые тела обнаружены не только в висячем боку толщи массивных уртитов, но и внутри них (месторождение Коашва) и не только в массивных уртитах, но и в других породах, например трахитоидных ийолитах (месторождение Ньоркпахк) [9]. Как справедливо указывает О. Б. Дудкин [12], основным типом апатитовых руд в Хибинах являются линзовидно-полосчатые, с линзочками существенно обогащенного апатитом (до 7—12%) мелкозернистого ийолита. Очень трудно объяснить обособление таких линзочек от апатитовой массы с помощью конвективных потоков. И еще труднее объяснить с этих позиций возникновение точно таких же линзочек мелкозернистого ийолита внутри массивных уртитов (так называемые линзовидно-полосчатые ийолит-уртиты), кстати, нередко и за пределами апатит-нефелиновых месторождений. Необъяснимо образование крупноблоковых апатитовых руд — с крупными (до 10 см) вкрапленниками нефелина, обтекаемыми слойками мелкозернистого ийолита и уртита в апатитовой массе. Обращает на себя внимание также общая лейкократовость апатит-нефелиновых пород, отсутствие в них поздних апатит-нефелин-пироксеновых образований.

Наконец, согласно Г. М. Вировлянскому и Ю. Н. Благодетелевой [7], в пределах мельтейгит-уртитовой дуги установлена единая долгоживущая крутопадающая тектоническая зона (Главный рудоконтролирующий разлом), в которой массивные уртиты приурочены к одной, наиболее ранней системе разломов, а апатитовые залежи — к другой, более поздней.

Таким образом, вопрос о возможности проникновения в толщу мельтейгит-уртитов самостоятельной фосфатной или силикат-фосфатной субстанции продолжает оставаться на повестке дня и с неизбежностью влечет за собой еще более сложный вопрос о способе отщепления подобной субстанции от ультращелочной магмы (причем неясно: магма какого состава была рудогенерирующей — уртитового, мельтейгит-уртитового или мельтейгит-уртит-рисчорритового?). С начала изучения хибинских апатитовых месторождений и по сей день конкурируют в основном три гипотезы относительно их формирования: магматическая — отделение фосфатной части расплава вследствие кристаллизационной дифференциации [13], ликвационно-магматическая — вследствие ликвации магмы на силикатную и фосфатную жидкости [21] и гидротермально-метасоматическая — вследствие отщепления флюидной фазы в постмагматических условиях [28, 31, 33].

Успехи в области физико-химического эксперимента, к сожалению, пока не дают возможности сделать однозначный выбор между этими гипотезами. Так, в изученной Л. Н. Когарко [17] системе фторапатит—карнегиит—диопсид поле ликвации находится в области слишком высоких температур (свыше 1500° С), в обширном поле существования силикофосфата и далеко отстоит от предполагаемого состава апатитгенерирующей магмы. Это должно было бы привести к кристаллизации из отликвированной жидкости силикофосфата, который не известен в щелочных породах.

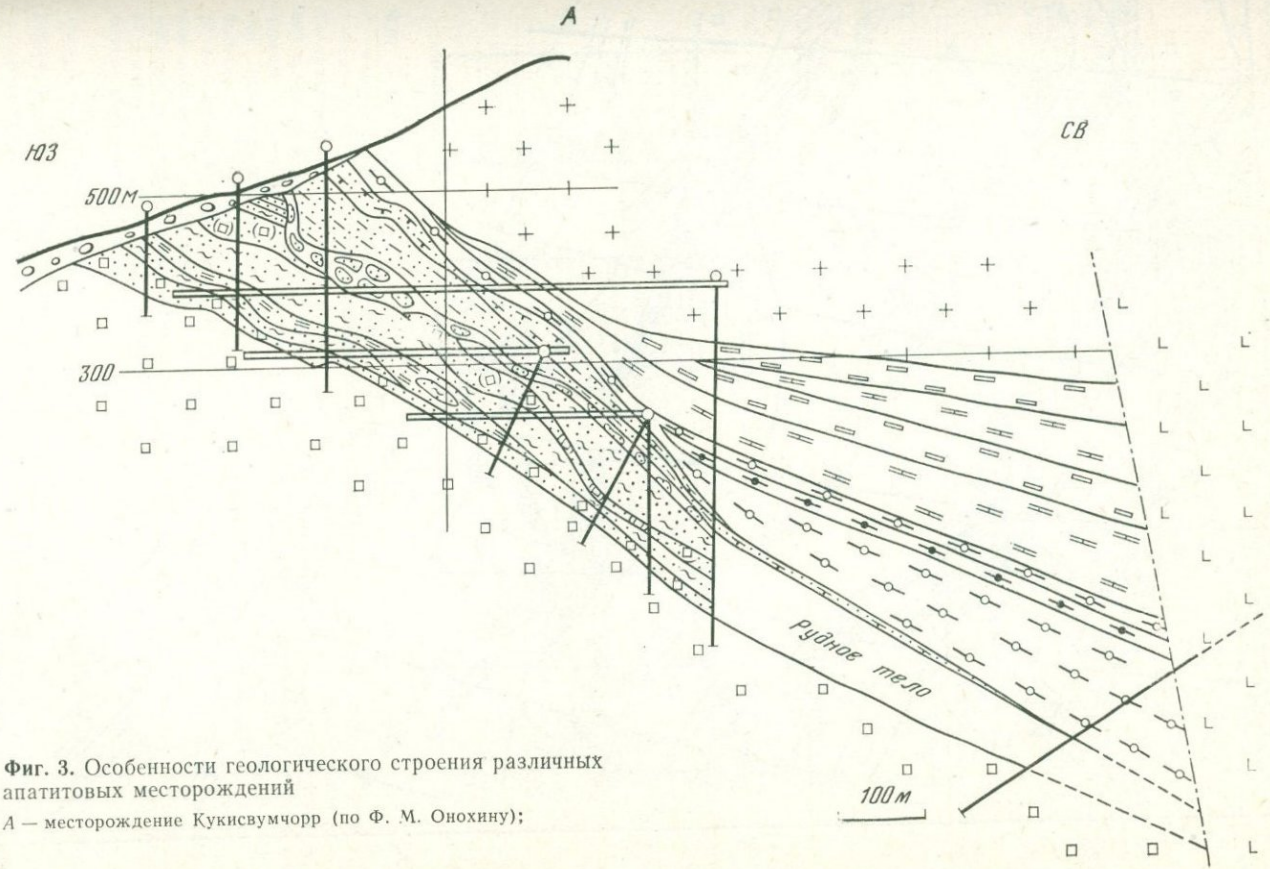
Отсюда делается вывод о малой вероятности существования в условиях земной коры фосфатных магм или ликвационного их отщепления от силикатных расплавов [17].

Однако указанная система является весьма упрощенной. Кристаллизация в ней силикофосфата, мелилита и оливина (составы которых не лежат в плоскости рассматриваемого треугольника) свидетельствует о том, что она представляет собой лишь часть общей шестикомпонентной системы, детально не изученной. Если можно пренебречь полем кристаллизации оливина (занимающим по температуре всего 10° С), то для того, чтобы «избавиться» от мелилита (отсутствущего, как и оливин, в мельтейгит-уртитах Хибинского массива), необходимо, согласно Л. Н. Когарко, допустить содержание в расплаве нормативного калиевого полевого шпата, при реакции с которым мелилит исчезает, расширяя поле кристаллизации диопсида. Однако в таком случае необходимо рассматривать уже четырехкомпонентную систему: апатит—нефелин—диопсид—К-полевой шпат. Рас-

смотренная система — сухая. Как скажется на положении полей кристаллизации и ликвации введение в систему воды и других летучих, избытка щелочных металлов, солевых компонентов? Ведь изучение Л. Н. Когарко совместно с Б. Б. Лебедевым [18] системы апатит—нефелин—вода при $P_{H_2O}=2000$ атм (кстати, с природными, а не с гипотетическими составами минералов) показало полное исчезновение поля силикофосфата и непосредственные эвтектические соотношения между апатитом и нефелином на 150° С ниже, чем положение тройной эвтектики в сухой системе апатит—нефелин—диопсид. Это говорится не столько в защиту ликвационной гипотезы образования апатитовых руд, сколько для того, чтобы подчеркнуть необходимость перехода к физико-химическим экспериментам в условиях, максимально приближенных к природе.

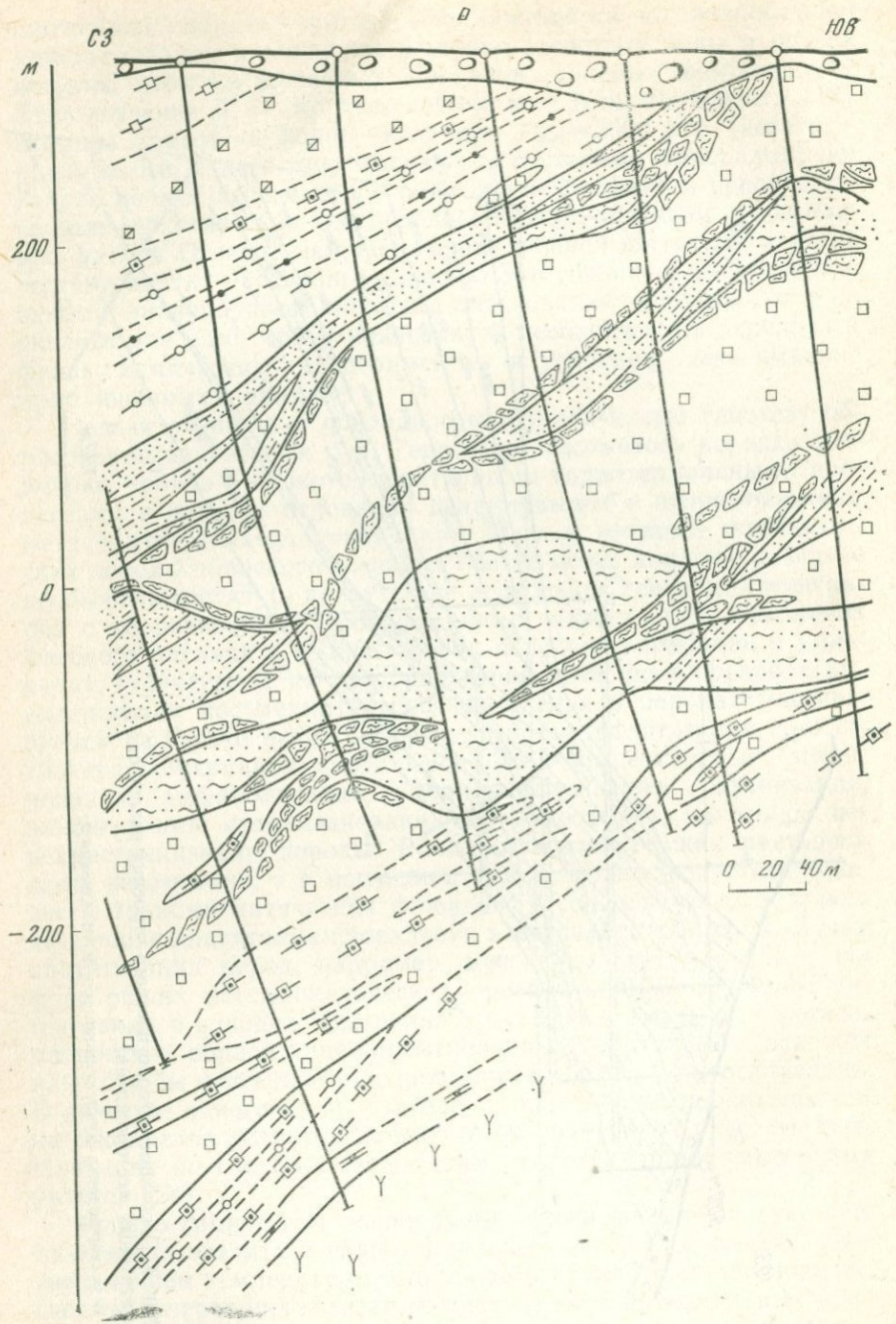
Нельзя отрицать и флюидно-метасоматическую гипотезу образования апатитовых руд. Термин «метасоматоз» нередко связывают только с низкотемпературными гидротермальными процессами и на этом основании делают вывод о неприменимости метасоматических концепций при анализе генезиса магматических пород Хибинского массива. Тем не менее широкое развитие необычных структур, присутствие нескольких генераций минералов с коррозионными соотношениями между ними, признаков фазового распада и собирательной перекристаллизации в минералах, структурные их преобразования позволяют предполагать интенсивные постмагматические изменения в породах массива, причем не только низкотемпературные (натролитизация, содалитизация, канкринитизация), но и высокотемпературные (эгиринизация, амфиболизация, лепидомеланизация, сфенизация, альбитизация, ортоклазизация, нефелинизация), вплоть до перекристаллизации породы. Роль постмагматических растворов здесь несомненна, а в последнем случае можно допустить участие и трансмагматических флюидов. Исследователи, детально изучавшие апатитовые проявления в массиве, отмечали и случаи апатитизации пород, например массивных уртитов [12]. На фоне общих постмагматических преобразований, наиболее интенсивных в породах Центральной дуги, не исключено и метасоматическое образование промышленных апатитовых залежей или хотя бы частичное их переотложение и перекристаллизация. В качестве одного из доказательств такого замещения укажем на сохранение реликтов пегматитов в апатитовой руде, соответствующих по составу пегматитам подстилающих массивных уртитов [24].

Физико-химические эксперименты показывают низкую растворимость апатита в гидротермальных растворах, падающую с увеличением температуры, что вроде бы исключает растворение, перенос и перекристаллизацию апатита в гидротермальных условиях [17]. Однако изучение люминесценции апатита в пределах апатитовых залежей [12] свидетельствует о присутствии в них апатита как высоко-, так и низкотемпературных генетических



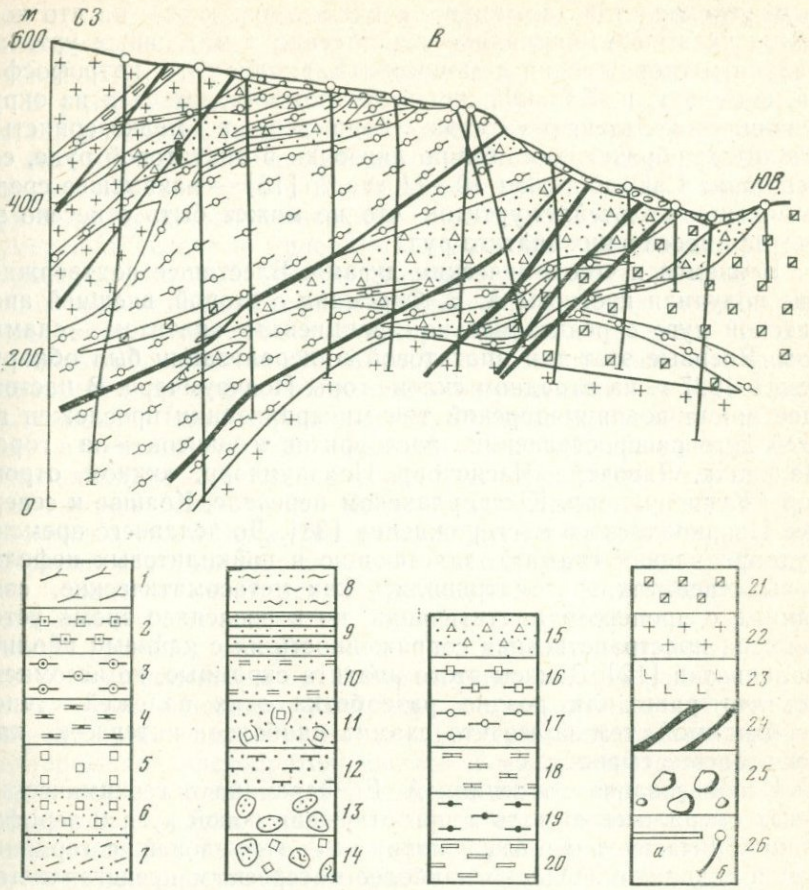
Фиг. 3. Особенности геологического строения различных апатитовых месторождений

А — месторождение Кукисвумчорр (по Ф. М. Онохину);



Фиг. 3. Продолжение

Б — месторождение Коашва (по Е. А. Каменеву);



Фиг. 3. Окончание

В — месторождение Ньюркпахк (по Е. А. Каменеву)

1 — хибиниты; *2—4* — мельтейгит-уртиты дорудной субфазы: *2* — трахитоидные уртиты, *3* — трахитоидные ийолиты, *4* — трахитоидные малиньиты; *5—6* — мельтейгит-уртиты рудной субфазы: *5* — массивные уртиты, *6* — уртиты с апатитом; *7—12* — апатит-нефелиновые породы: *7* — пятнистые и пятнисто-полосчатые, *8* — линзовидно-полосчатые, *9* — полосчатые, *10* — сетчатые, *11* — крупноблоковые, *12* — сфен-апатитовые; *13—15* — апатитовая брекчия: *13* — внутрирудная, *14* — с уртитовым цементом, *15* — с ийолитовым цементом; *16—20* — мельтейгит-уртиты пострудной фазы: *16* — трахитоидные уртиты, *17* — трахитоидные ийолиты, *18* — трахитоидные малиньиты, *19* — мельтейгиты, *20* — луявриты; *21—22* — пойкилитовые нефелиновые сиениты: *21* — массивные юиты, *22* — массивные рисчорриты; *23* — лявочорриты; *24* — дайки лампрофиров; *25* — четвертичные отложения (морена); *26* — горные выработки (*а* — штольни, *б* — буровые скважины)

типов, что указывает на длительную и многогранную историю этих, казалось бы, однородных образований.

Учитывая, что перенос фосфора и кальция растворами в эквивалентных количествах затруднен, можно допустить, что геохимические пути этих элементов раздельны. Фосфор может переноситься высокощелочными растворами вместе с натрием, фто-

ром, углекислотой (возможно, в виде комплексов), на что косвенно указывает постоянное присутствие в массивных уртитах района месторождений ломоносовита, виллиомита, натрофосфата, соды и т. п. Кальций же может заимствоваться и из окружающих мельтейгит-уртитов; например, в мелкозернистых ийолитах, образующих обычно линзочки в апатитовой руде, содержание CaO достигает 10—11 вес.% [15] — наивысшее среди хибинских мельтейгит-уртитов, что не может быть отнесено за счет примесей в них апатита руд.

Вернемся к «геохимическим дугам». Блестящее подтверждение получили прогнозы А. Е. Ферсмана о второй, внешней апатитовой дуге с редкоземельно-стронциевым апатитом — саамитом. Впервые этот тип апатитовой минерализации был обнаружен в 1927 г. на западном склоне горы Поачвумчорр. В настоящее время поачвумчоррский тип минерализации прослежен по всей дуге распространения рисчорритов и ювитов — на горах Валепахк, Лявочорр, Часночорр, Поачвумчорр, южном отроге горы Кукисвумчорр, Юкспорлакском перевале, Коашве и севернее Ньоркпахкского месторождения [38]. До недавнего времени рудопроявления саамита, залегающие в пойкилитовых нефелиновых сиенитах, рассматривались как метасоматические, связанные с процессом апатитизации, но в последнее время установлена пространственная сопряженность их с дайками ийолит-малиньитов [12]. Запасы этого апатита скромные, но несомненно, что рано или поздно разработка этих залежей станет необходимой, тем более что саамит наиболее интересен как комплексное сырье.

Использование концепции А. Е. Ферсмана о геохимических дугах сыграло свою роль и при открытии новой дуги в периферической части фойяитовой интрузии — корундовой, с герцинитом и содалитом. Однако наиболее интересным представляется вывод А. Е. Ферсмана о приуроченности подавляющего большинства геохимических дуг и, следовательно, большинства пегматитовых образований к зоне Центральной дуги Хибинского массива. Действительно, пегматиты в нефелиновых сиенитах вдали от Центральной дуги встречаются весьма редко. С другой стороны, в результате интенсивных горных работ на эксплуатируемых месторождениях и поисково-разведочными скважинами вскрыто громадное количество пегматитов, гидротермальных жил и отдельных богато минерализованных участков в породах Центральной дуги — мельтейгит-уртитах, пойкилитовых нефелиновых сиенитах и приконтактовых частях интрузий среднезернистых трахитоидных хибинитов, лявочорритов и фойяитов. Многие из них выделяются чрезвычайно высоким содержанием натрия, калия, летучих компонентов и содержат специфический комплекс весьма редких минералов щелочного комплекса: ломоносовит, беталомоносовит, илимаусит, тинаксит, канасит, фенаксит, дельхайелит, пектолит, гакманит, щербаковит, вадеит, вуоннемит, фосинаит, ловозерит; своеобразные калийсодержа-

щие сульфиды — джерфишерит и расвумит, натрофосфат, соду, виллиомит, чкаловит и другие минералы, в том числе ряд новых минеральных видов, недавно описанных А. П. Хомяковым [39].

В результате изучения этого богатого материала нами был сделан ряд общих выводов о закономерностях распространения и типах минерализации Хибинского массива, типоморфизме минералов и их генетических особенностях [4, 24]. Были выделены три типа ассоциаций минералов по их щелочности: миаскитовый (умеренно щелочные минералы), агпаитовый (высокощелочные) и ультраагпаитовый (ультращелочные), распространенные в породах разной щелочности и основности, которые можно использовать в качестве индикатора щелочно-основных условий минералообразования [3]. Комплекс миаскитовых минералов характерен для нефелиновых сиенитов, удаленных от зоны Центральной дуги (грубозернистых трахитоидных хибинитов и фойяитов), в меньшей мере для мельтейгит-уртитов и их пегматитов, отличающихся при том же уровне щелочности значительно более высокой основностью. Ореал распространения агпаитовых минералов уже — зона Центральной дуги и прилегающих к ней интрузий нефелиновых сиенитов (среднезернистые трахитоидные хибиниты, лявочорриты), зато гораздо многообразнее их разновидности — энигматит, эвдиалит, астрофиллит, лампрофиллит, ринкит, лопарит, нептунит, рамзаит, пектолит, лабунцовит, ненадкевичит и др. Ультраагпаитовые минералы установлены только в породах Центральной дуги, обогащая отдельные их участки или пегматитовые и гидротермальные жилы; они характерны для рисчорритов, ювитов и массивных уртитов — пород с пойкилитовой или пойкилитоподобной структурой, отличающихся от своих типично магматических эквивалентов одновременным сочетанием как наивысшей щелочности, так и высокой основности. Многообразие этих минералов еще больше. При этом четко проявляется чрезвычайно важная их особенность, отличающая хибинский комплекс ультращелочных минералов от ловозерского,— существенная обогащенность калием [1, 30].

Формирование указанных комплексов минералов мы связываем с последовательной эволюцией пород Хибинского плутона: миаскитовые минералы — результат магматической кристаллизации, агпаитовые и ультраагпаитовые — возникли в ходе последующих процессов. Генезис агпаитовых минералов имеет двойственный характер — с одной стороны, в результате преобразований в породе на позднемагматической или постмагматической стадии (автометасоматических), с другой — в ходе постмагматических преобразований в зоне Центральной дуги (наложенных), но в обоих случаях под влиянием растворов существенно натриевого характера. Ультраагпаитовые минералы обязаны своим происхождением постмагматическим преобразованиям в зонах поздней активизации Центральной дуги, в условиях относительно высоких температур и наивысшей щелочно-

сти, под влиянием растворов, обогащенных калием и летучими компонентами. Таким образом, предполагается, что агпаитовая и ультраагпаитовая минерализация, определяющая лицо Хибинского массива, сформировалась не в ходе кристаллизации специфической, обогащенной щелочами и летучими «агпаитовой» магмы, а в результате воздействия на нефелиновые сиениты и мельтейгит-уртиты умеренной щелочности отщепленных от магмы высокощелочных растворов на постмагматическом этапе.

Широко известны работы А. Е. Ферсмана о происхождении пегматитов — гранитных и щелочных, пегматитов линии скрещения. Эти исследования имеют непосредственное отношение и к Хибинскому массиву, но детальный их разбор, по-видимому, должен быть предметом специальной статьи. Отметим только, что важнейшим обобщением А. Е. Ферсмана являются представления о геофазах, постулирующие, что главным, определяющим фактором минералообразования является температура и что в ходе различных геологических процессов могут создаваться условия для возникновения одних и тех же ассоциаций минералов. Сравнивая породы Хибинского массива с гранитами и щелочными породами миаскитового типа, А. Е. Ферсман [36, 35] отмечал, что основные различия между ними приходятся главным образом на геофазы магматической стадии (до точки Q, которая отбивается по появлению зеленого лучистого эгирина, замещающего темноцветные породообразующие минералы) из-за того, что агпаитовые нефелиновые сиениты имеют «обратный» порядок кристаллизации. В последующие же геофазы процесс идет одинаково.

Наши данные [24] показывают, что и для пород, и для залегающих в них пегматитов характерны одни и те же ассоциации минералов и одинаковые взаимоотношения между ними, и свидетельствуют о тождественности процессов эволюции этих геологических образований. Пегматитовый процесс представляется нам как частный случай формирования магматических пород в постмагматическую стадию, как развитие единой с ними системы. Пегматитовые «расплавы—растворы» — это, таким образом, не что иное, как обособившиеся остаточные магматические растворы, которые или кристаллизовались в трещинах, или перекристаллизовывали окружающие породы, вызывали по мере снижения температуры и изменения щелочности замещения или переотложения ранних минералов. «Пегматитовым очагом», следовательно, являлись сами окружающие породы. Общими для пород и пегматитов были и наложенные процессы замещений.

А. Е. Ферсман видел практическое значение выдвинутой концепции о геофазах в объяснении общих закономерностей минерализации Хибинского массива, причем не только хронологических, но и пространственных: «Каждая минеральная ассоциация получает в общей схеме хибинских дуг свое место ... создается... возможность устанавливать комплекс минералов более ранних,

т. е. подстилающих частей какого-либо месторождения, и комплекс позднейший ... подсказывать не только минеральную ассоциацию, но и самый характер ассоциации, т. е. время выделения одних минералов по отношению к другим того же комплекса, что имеет большое технологическое значение» [36, с. 753].

Не менее важным, чем температура, фактором минералообразования для минералов щелочного комплекса является щелочность. Именно необычно высокий уровень щелочности растворов сделал возможным кристаллизацию минералов, неустойчивых и быстро разрушающихся в иных условиях, а ее широкие вариации — образование целой гаммы соединений постоянного и переменного состава со сложнейшими кристаллическими структурами, в которых щелочные металлы связывают воедино несовместимые в других соединениях литофильные, сидерофильные и халькофильные элементы, занимают (по типу цеолитов) места в полостях и каналах, входят в состав темноцветных породообразующих силикатов и даже в сульфиды. Именно колебаниями щелочности, очевидно, вызваны многообразные типы взаимозамещений титано- и цирконосиликатов щелочного комплекса, в том числе и таких, когда кристаллическая структура продолжает оставаться устойчивой при замещении фосфатных группировок на воду (ломоносовит — мурманит), с переменным содержанием щелочных металлов (эвдиалит, ловозерит), с различными сочетаниями щелочей и анионных группировок (содалит, канкринит) и т. п. Изложенное заставляет нас с большой осторожностью относиться к выделению парагенетических ассоциаций минералов в щелочных комплексах, поскольку наблюдаемые соотношения заставляют предполагать широкое развитие неравновесных (метастабильных) процессов кристаллизации, достижения равновесности только в отдельных точках системы (разных участках породы, отдельных жилах и частях одних и тех же жил, раздувах, пережимах, полостях и т. п.), проявление многоэтапности и многостадийности замещений в минералах.

Еще 40 лет назад А. Е. Ферсман писал: «Особо приходится отметить необходимость охраны на Кольском полуострове некоторых памятников геологического и геохимического характера. Вследствие усиленной эксплуатации различных месторождений и неправильно ведущихся разведок не сохранился для дальнейшего научного исследования ряд классических жил и месторождений, которые, однако, не имели большого практического значения. Следовало бы наиболее характерные, типичные жильные образования, являющиеся единственными по своему своеобразию и минералогической ценности, охранять, создавая вокруг них специальные районы охраны, и превращать их в заповедники» [35, с. 230]. Минералы Хибин чарующе красивы. Но дело не только в этом. Хибины и Ловозеро — уникальные щелочные провинции, минералогические сокровищницы. Мы должны всемерно

их беречь и охранять. А, кроме того, минералы эти неповторимы. И не только те, которые найдены в единственном кристалле или друзе (образец которых в Минералогическом музее — все, что есть на свете). Они неповторимы, потому что раздробленный ковшом экскаватора минерал безвозвратно погибнет, превратившись в труху, покрытую налетом «сезонных» новообразований,— и никогда не будет новых открытий или повторных находок. Если бы у минералогов была своя «Красная книга», то все хибинские и ловозерские минералы попали бы на ее страницы. Неживая природа не способна воспроизводиться. Охрана минералов района — лучший памятник А. Е. Ферсману и тем идеям, которые он проводил в жизнь.

В результате многолетних фундаментальных исследований минералов, пород и руд Хибинского массива получены существенные результаты, имеющие важное значение для практики и геологической науки в целом, но, как и прежде, актуальны слова А. Е. Ферсмана: «Как ни значительны научные исследования, проведенные за последние годы на щелочных породах Кольского полуострова, все же основные проблемы их генезиса еще не решены, и мы по-прежнему стоим перед огромным количеством научных вопросов, от разрешения которых будет зависеть и правильная поисковая работа, и настоящие продуктивные промышленные разведки, и, наконец, нахождение новых полезных ископаемых, столь богатых и разнообразных в этих геохимических образованиях» [35, с. 178].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Боруцкий Б. Е.* Типоморфизм породообразующих минералов Хибинского массива.— В кн.: Новые данные о типоморфизме минералов. М.: Наука, 1980, с. 165—177.
2. *Боруцкий Б. Е., Боруцкая В. Л., Некрасова Л. П.* Щелочные полевые шпаты пойкилитовых нефелиновых сиенитов Хибинского массива.— В кн.: Изоморфизм в минералах. М.: Наука, 1975, с. 246—273.
3. *Боруцкий Б. Е., Забавникова Н. И., Соколова М. Н.* Типы минеральных ассоциаций как показатели основности среды минералообразования пород щелочного комплекса.— В кн.: Геохимия. Минералогия: (Междунар. геол. конгр. XXVI сес. Докл. сов. геологов). М.: Наука, 1980, с. 191—199.
4. *Боруцкий Б. Е., Соколова М. Н., Шлюкова З. В.* Типоморфизм и условия образования минералов и минеральных ассоциаций в щелочных породах Хибинского массива.— В кн.: Состав и структуры минералов как показатели их генезиса. М.: Наука, 1978, с. 76—108.
5. *Буканов В. В., Липовский Ю. О.* Новые находки благородного корунда в восточной части Балтийского щита.— В кн.: Самоцветы: (Материалы XI съезда ММА. Новосибирск, 4—10 сентября 1978 г.). Л.: Наука, 1980, с. 110—116.
6. *Буссен И. В., Сахаров А. С.* Петрология Ловозерского щелочного массива. Л.: Наука, 1972. 296 с.
7. *Вировлянский Г. М., Благодетелева Ю. Н.* Главный рудоконтролирующий разлом Хибин.— В кн.: Условия образования и закономерности размещения полезных ископаемых. Л.: Ленингр. горн. ин-т, 1971, с. 45—53.
8. *Галахов А. В.* Петрология Хибинского щелочного массива. Л.: Наука, 1975. 256 с.

9. Геология месторождений апатита, методика их прогнозирования и поисков/Под ред. А. С. Зверева и Р. М. Файзуллина. М.: Недра, 1980. 267 с.
10. Геохимия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1966. 395 с./ /В. И. Герасимовский, В. П. Волков, Л. Н. Когарко и др.
11. *Горстка В. Н.* Ксенолиты палеозойских пород в Хибинском массиве.— В кн.: Щелочные породы Кольского полуострова. М.; Л.: Наука, 1966, с. 24—28.
12. *Дудкин О. Б.* Геохимия и закономерности концентрации фосфора в щелочных массивах Кольского п-ова. Л.: Наука, 1977. 207 с.
13. *Елисеев Н. А., Ожинский И. С., Володин Е. Н.* Геолого-петрографический очерк Хибинских тундр. Геологическая карта Хибин. Л.: Изд-во ЛГУ, 1939. 68 с. (Тр. ЛГУ; Вып. 19).
14. *Зак С. И., Каменев Е. А.* Новые данные о геологии Хибинского щелочного массива.— Сов. геология, 1964, № 7, с. 42—51.
15. Ийолит-уртиты Хибинского массива. Л.: Наука, 1970. 179 с./Т. Н. Иванова, О. Б. Дудкин, Л. В. Козырева, К. И. Поляков.
16. *Калинкин М. М.* О соотношениях продуктивных ийолитов и лявочорритов в Хибинском массиве.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1974, № 10, с. 70—77.
17. *Когарко Л. Н.* Проблемы генезиса агпаитовых магм. М.: Наука, 1977.
18. *Когарко Л. Н., Лебедев Б. Б.* Равновесия в системе нефелин — апатит — вода.— Геохимия, 1968, № 3, с. 375—377.
19. *Когарко Л. Н., Крамм У., Блексланд А.* и др. Возраст и происхождение щелочных пород Хибинского массива (изотопия рубидия и стронция).— Докл. АН СССР, 1981, **260**, № 4, с. 1001—1004.
20. *Комлев Л. В., Михалевская А. Д., Данилевич С. И.* О возрасте щелочных интрузий Хибинских и Ловозерских тундр (Кольский полустров).— Докл. АН СССР, 1961, **136**, № 1, с. 172—174.
21. *Мелентьев Б. Н., Ольшанский Я. И.* Равновесие несмешивающихся жидкостей в системе $Na_2O—Al_2O_3—SiO_2—Ca_3(PO_4)_2$.— Докл. АН СССР, 1952, **86**, № 6, с. 1110—1113.
22. *Меньшиков Ю. П.* Корундовая минерализация в Хибинском щелочном массиве.— Докл. АН СССР, 1978, **243**, № 5, с. 1247—1249.
23. *Минаков Ф. В., Дудкин О. Б., Каменев Е. А.* О карбонатитовом комплексе Хибин.— Докл. АН СССР, 1981, **259**, № 3, с. 672—675.
24. Минералогия Хибинского массива/Под ред. Ф. В. Чухрова. М.: Наука, 1978. Т. 1. 228 с.; Т. 2. 586 с./Е. Е. Костылева-Лабунцова, Б. Е. Боруцкий, М. Н. Соколова и др.
25. Минеральные месторождения Кольского полуострова/Под ред. Г. И. Горбунова. Л.: Наука, 1981. 272 с./Г. И. Горбунов, И. В. Бельков, С. И. Мокиевский и др.
26. Минералы Хибинских и Ловозерских тундр/Под ред. А. Е. Ферсмана, Н. А. Смолянинова, Э. М. Бонштедт. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 563 с./Э. М. Бонштедт, И. Д. Борнеман-Старынкевич, Н. И. Влодавец, О. А. Воробьева и др.
27. *Полканов А. А., Герлинг Э. Г.* Геохронология и геологическая эволюция Балтийского щита и его складчатого обрамления.— В кн.: Вопросы геохронологии и геологии. М.: Наука, 1961, с. 63—66. (Тр. ЛАГЕД; Вып. 12).
28. *Руденко С. А.* К генезису апатитовых месторождений Хибинского массива.— Зап. Ленингр. горн. ин-та, 1964, **47**, вып. 2, с. 49—70.
29. *Симон А. К., Шлюкова З. В.* Ксенолиты Хибинского массива в связи с его геологической позицией.— В кн.: Авторефераты работ сотрудников ИГЕМ за 1971 г. М.: ИГЕМ АН СССР, 1972, с. 42—43.
30. *Соколова М. Н., Боруцкий Б. Е.* Ультраагпаитовый тип минеральных ассоциаций в щелочных породах.— В кн.: Новые данные о типоморфизме минералов. М. Наука, 1980, с. 195—204.
31. *Солодовникова Л. Л.* Полевые шпаты Кукисвумчоррского месторождения.— В кн.: К минералогии постмагматических процессов. Л.: Изд-во ЛГУ, 1959, с. 7—72.
32. *Титов В. Н., Руденко С. А., Козловский А. Д., Кузнецов Ж. М.* О происхождении уртитов Хибинского массива.— Зап. ЛГУ, 1971, **60**, вып. 2, с. 19—25.

33. *Тихоненков И. П.* Нефелиновые сиениты и пегматиты северо-восточной части Хибинского массива и роль постмагматических явлений в их формировании. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 246 с.
34. *Тихоненкова Р. П.* Фениты Хибинского щелочного массива.— В кн.: Редкометальные метасоматиты щелочных массивов. М.: Наука, 1967, с. 5—94.
35. *Ферсман А. Е.* Полезные ископаемые Кольского полуострова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 245 с.
36. *Ферсман А. Е.* Геохимическая диаграмма Хибинских тундр.— В кн.: Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1959, т. 5, с. 749—754.
37. *Ферсман А. Е.* Геохимические дуги Хибинских тундр.— В кн.: Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1959, т. 5, с. 755—763.
38. Хибинский щелочной массив: (Материалы по геологии и полезным ископаемым Северо-Запада РСФСР)/Под ред. Н. А. Волотовской. Л.: Недра, 1972. 175 с./С. И. Зак, Е. А. Каменев, Ф. В. Минаков и др.
39. *Хомяков А. П.* Новые минералы глубинных зон Ловозерского и Хибинского массивов.— В кн.: Геохимия. Минералогия: (Междунар. геол. конгр. XXVI сес. Докл. сов. геологов). М.: Наука, 1980, с. 164—170.
40. *Шлюкова З. В.* Минеральные ассоциации как индикаторы процессов взаимодействия щелочной магмы с разными типами вмещающих пород.— В кн.: Новые данные о типоморфизме минералов. М.: Наука, 1980, с. 219—224.
41. *Kononova V. A., Shanin L. L.* On possible application of nepheline for alkaline rock dating.— Bull. volcanol., 1971, **35**, pt 1, p. 251—264.
42. *Zyrianov V. N., Perchuk L. L., Podlesskii K. K.* Nepheline — alkali feldspar equilibria. I. Experimental data and thermodynamic calculations.— J. Petrol., 1978, **19**, pt 1, p. 1—44.

УДК 549.6 : 552.33

А. П. ХОМЯКОВ

МИНЕРАЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЩЕЛОЧНЫХ ПЕГМАТИТОВ ХИБИНО-ЛОВОЗЕРСКОЙ ПРОВИНЦИИ

Общеизвестен огромный интерес А. Е. Ферсмана к изучению щелочных пегматитов Хибино-Ловозерской провинции — одного из главных объектов работ организованных им в 1920—1935 гг. северных экспедиций Академии наук СССР [12]. В результате работ этих и многочисленных последующих экспедиций в пределах Хибинского и Ловозерского массивов нефелиновых сиенитов был выявлен ряд крупных полей и тел пегматитовых и гидротермальных дериватов, в которых обнаружено большое число новых и редких минералов. Существенный вклад в изучение пегматитов провинции за послевоенный период внесли экспедиции, возглавлявшиеся учеником и последователем А. Е. Ферсмана, основателем ИМГРЭ К. А. Власовым [1, 4, 14, 16, 18]. Работами коллектива этого института только в Ловозерском массиве список минералов и минеральных разновидностей был удвоен и достиг 300 наименований — больше, чем в любом другом массиве или месторождении мира. Итоги полувекового планомерного минералогического изучения рассматриваемых объектов подве-

дены в монографии Е. И. Семенова «Минералогия Ловозерского щелочного массива» [14] и капитальном двухтомном труде «Минералогия Хибинского массива» [11], составленном коллективом авторов (Б. Е. Боруцкий, М. Н. Соколова, З. В. Шлюкова, М. Д. Дорфман, О. Б. Дудкин, Л. В. Козырева, С. В. Икорский) во главе с Е. Е. Костылевой-Лабунцовой — ученицей и соратником А. Е. Ферсмана.

В последние годы в глубоких частях Хибинского и Ловозерского массивов, ниже зоны выветривания, буровыми скважинами и горными выработками были вскрыты многочисленные тела весьма необычных, пересыщенных щелочными, летучими и редкими элементами пегматоидных образований (уссингитовых, гакманитовых и др.), рассматриваемых как ультраагпаитовые (ультращелочные) пегматиты и гидротермалиты [2, 3, 20—22]. В этих телах сотрудниками ИМГРЭ и других организаций (Кольский филиал АН СССР, ИГЕМ АН СССР, ВИМС, МГРИ, Минералогический музей им. А. Е. Ферсмана АН СССР) за период с 1970 по 1982 г. дополнительно установлены около 50 не известных науке минералов, а также большое число минералов, ранее не отмечавшихся на территории СССР (табл. 1). Среди них 19 фосфорных, 13 титано-ниобиевых, 10 циркониевых минералов и TR, Th, Sr, Ba, B, Be минералы, находки которых значительно расширяют представления о минеральных формах концентрации фосфора и редких элементов, вносят существенные изменения в понимание природы и минералогических особенностей конечных дифференциатов щелочных магм. За тот же период установлены около 40 минералов, ранее не отмечавшихся в Хибинах[1] (баритокальцит*, бербанкит, беталомоносовит, виллемит, гейлюссит*, гоннардит, давсонит, жисмондин*, кальсилит, келдышит*, лейфит, натисит* натросилит*, нахколит, пиролюзит*, пиросмалит*, псиломелан*, тинаксит, троилит, тугтупит, чкаловит*, эдингтонит, эльпидит и др.), в Ловозере (вуоннемит*, лейкосфенит, натрофосфат*, расвумит*, сидерит*, троилит*, цирсиналит*), в обоих массивах (джерфишерит, нейборит*, нордстрандит*, тенардит*).

Более 20 минералов, перечисленных в табл. 1, встречены как в Ловозерском, так и в Хибинском массивах; несомненно, что дальнейшие исследования приведут к расширению списка минералов, общих для этих массивов. Если исключить из рассмотрения высококалиевые минералы, найденные только в одной из зон Хибин, и некоторые минералы Ловозера, представленные единичной находкой в уникальном пегматитовом теле (залежь Юбилейная), то минералогическое родство ультраагпаитовых пегматитов и гидротермалитов двух массивов выступит еще более отчетливо. Это тесное родство поздне- и послемагматических образований соседних массивов, контрастирующее с их резко

[1] Звездочкой здесь и в табл. 1 отмечены минералы, установленные и изученные при участии автора.

Таблица 1

Минералы Хибинского и Ловозерского массивов, описанные в 1970—1982 гг.

№ п/п	Минерал	Формула	Массив	
			Хибинский	Ловозерский
		Новые минеральные виды		
1	Арктит *	$Na_2(Ca, Ba)_4(PO_4)_3F$	+	—
2	Бонштедтит *	$Na_3Fe(PO_4)(CO_3)$	+	—
3	Борнеманит *	$Na_7BaTi_2NbPSi_4O_{21}F$	—	+
4	Витусит *	$Na_3Ce(PO_4)_2$	+	+
5	Вуоннемит	$Na_{11}TiNb_2P_2Si_4O_{25}F$	+	+
6	Гидродельхайелит	$KCa_2Si_7AlO_{17}(OH)_2 \cdot 6H_2O$	+	—
7	Дорфманит	$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$	+	+
8	Захаровит *	$Na_4Mn_5Si_{10}O_{24}(OH)_6 \cdot 6H_2O$	+	+
9	Зорит	$Na_2(Ti, Nb)Si_3O_9 \cdot 3H_2O$	—	+
10	Ильмайокит	$Na_2TiSi_3O_9 \cdot 6H_2O$	—	+
11	Имандрит *	$Na_{12}Ca_3Fe_2(Si_6O_{18})_2$	+	—
12	Казаковит *	$Na_6MnTiSi_6O_{18}$	+	+
13	Кальборсит *	$K_6[Al_4Si_6O_{20}][B(OH)_4]Cl$	+	—
14	Клинофосинаит *	$Na_3Ca(SiO_3)(PO_4)$	+	—
15	Коашвит	$Na_6CaTiSi_6O_{18}$	+	—
16	Комаровит	$CaMnNb_4Si_4O_{20} \cdot 7H_2O$	—	+
17	Костылевит *	$K_4Zr_2[Si_6O_{18}] \cdot 2H_2O$	+	—
18	Лапландит *	$Na_4CeTiPSi_7O_{22} \cdot 5H_2O$	—	+
19	Литосит *	$K_6Al_4Si_8O_{25} \cdot nH_2O$	+	—
20	Ловдарит	$Na_3KBe_2Si_6O_{16} \cdot 4H_2O$	—	+
21	Набафит *	$NaBaPO_4 \cdot 9H_2O$	+	—
22	Накафит *	Na_2CaPO_4F	+	—
23	Настрофит *	$Na(Sr, Ba)PO_4 \cdot 9H_2O$	—	+
24	Натисит	Na_2TiSiO_5	+	+
25	Натрит *	Na_2CO_3	+	+
26	Натросилит	$Na_2Si_2O_5$	+	+
27	Натрофосфат	$Na_7(PO_4)_2F \cdot 19H_2O$	+	+
28	Нахпоит *	Na_2HPO_4	+	+
29	Нефедовит *	$Na_5Ca_4(PO_4)_4F$	+	—
30	Олимпит *	Na_3PO_4	+	+
31	Ольгит *	$Na(Sr, Ba)PO_4$	+	+
32	Паракелдышит *	$Na_2ZrSi_2O_7$	+	+
33	Параумбит *	$K_3HZr_2[Si_3O_9]_2 \cdot nH_2O$	+	—
34	Пенквилксит *	$Na_4Ti_2Si_8O_{22} \cdot 5H_2O$	—	+
35	Раит	$Na_4Mn_3Si_8(O, OH)_{24} \cdot 9H_2O$	+	+
36	Расвумит	KFe_2S_3	+	+
37	Ревдит *	$Na_2Si_2O_5 \cdot 5H_2O$	—	+
38	Сажинит *	$Na_3CeSi_6O_{15} \cdot 6H_2O$	—	+
39	Сидоренкит *	$Na_3Mn(PO_4)(CO_3)$	+	+
40	Соболевит *	$Na_{14}Ca_2Mn(Ti, Nb)_3Si_4P_4O_{34}$	—	+

Таблица 1 (окончание)

№ п/п	Минерал	Формула	Массив	
			Хибинский	Ловозерский
41	Терскит *	$Na_4ZrSi_6O_{15}(OH)_2 \cdot nH_2O$	—	+
42	Тисиналит (гидроказаковит) *	$Na_3MnTiSi_6O_{15}(OH)_3$	+	+
43	Умбит *	$K_2ZrSi_3O_9 \cdot H_2O$	+	—
44	Умбозерит *	$Na_3Sr_4Th(Fe, Mn, Zn)Si_8O_{24}(OH)$	—	+
45	Ферротихит *	$Na_6Fe(SO_4)(CO_3)_4$	+	—
46	Фосинаит *	$Na_3(Ca, Ce)(SiO_3)(PO_4)$	+	+
47	Хибинскит *	$K_2ZrSi_2O_7$	+	—
48	Цирсиналит	$Na_6CaZrSi_6O_{18}$	+	+
49	Шафрановскит*	$Na_2H_2MnSi_3O_9 \cdot H_2O$	+	+
	Первые находки минералов в СССР			
50	Амичит *	$K_2Na_2(Al_4Si_4O_{16}) \cdot 5H_2O$	+	—
51	Гейдоннеит *	$Na_2ZrSi_3O_9 \cdot 2H_2O$	+	+
52	Доннейит *	$Sr(Na, TR)(CO_3)_2 \cdot H_2O$	+	—
53	Илерит *	$Na_2ZrSi_3O_9 \cdot 3H_2O$	—	+
54	Макатит *	$Na_2Si_4O_9 \cdot 5H_2O$	—	+
55	Маунтинит	$KNa_3Ca_2Si_8O_{20} \cdot 8H_2O$	—	+
56	Мерлиноит *	$(K, Ba)_2(Al_3Si_5O_{16}) \cdot 5H_2O$	+	—
57	Петарасит *	$Na_5Zr_2Si_6O_{18}Cl \cdot 2H_2O$	+	—
58	Пирссонит *	$Na_2Ca(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$	+	—
59	Прайдерит	$K_2Fe_2Ti_6O_{16}$	+	—
60	Тетранатролит	$Na_2Al_2Si_3O_{10} \cdot 2H_2O$	+	+
61	Шортит *	$Na_2Ca_2(CO_3)_3$	+	+
62	Эвальдит *	$Ba(Na, Ca, TR)(CO_3)_2$	+	—
63	Fe-эйтелит *	$Na_2(Mg, Fe)(CO_3)_2$	+	—
64	Эрдит *	$NaFeS_2 \cdot 2H_2O$	—	+

различной геохимической специализацией — фосфатной для Хибин и редкометальной для Ловозера — обращало на себя внимание всех исследователей провинции, но еще не нашло удовлетворительного объяснения.

От известных типов дериватов нефелиновых сиенитов ультраагпаитовые пегматиты и гидротермалиты (ультраагпаиты) отличаются присутствием ряда характерных второстепенных минералов, прежде всего большой группы малостойких и водорастворимых силикатов, фосфатов, карбонатов, сульфатов, галогенидов, сульфидов и комплексных солей (табл. 2), в которых содержание натрия и других сильных оснований (K, Sr, Ba) достигает предельно высоких значений. В зонах эпитермального и гипергенного изменения многие из этих минералов растворяются или

Таблица 2

Водорастворимые и малостойкие минералы ультраагпаитов

Минерал	Формула	Минерал	Формула
	Силикаты		Карбонаты
Ломоносовит	$Na_{10}Ti_4P_2Si_4O_{26}$	Натрит *	Na_2CO_3
Вуоннемит	$Na_{11}TiNb_2P_2Si_4O_{25}F$	Термонатрит *	$Na_2CO_3 \cdot H_2O$
Цирсиналит	$Na_6CaZrSi_6O_{18}$	Трона *	$Na_3H(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$
Казаковит	$Na_6MnTiSi_6O_{18}$	Сода *	$Na_2CO_3 \cdot 10H_2O$
Паракелдышит	$Na_2ZrSi_2O_7$	Нахколит *	$NaHCO_3$
Келдышит	$Na_3HZr_2(Si_2O_7)_2$	Шортит	$Na_2Ca_2(CO_3)_3$
Шафрановскит	$Na_2H_2MnSi_3O_9 \cdot H_2O$	Пирссонит	$Na_2Ca(CO_3)_2 \cdot 2H_2O$
Ильмайокит	$Na_2TiSi_3O_9 \cdot 6H_2O$	Гейлюссит	$Na_2Ca(CO_3)_2 \cdot 5H_2O$
Натросилит *	$Na_2Si_2O_5$	Fe-эйтелит *	$Na_2(Mg, Fe)(CO_3)_2$
Ревдит *	$Na_2Si_2O_5 \cdot 5H_2O$	Ферротихит *	$Na_6Fe_2(SO_4)(CO_3)_4$
	Фосфаты		Сульфаты
Натрофосфат *	$Na_7(PO_4)_2F \cdot 19H_2O$	Тенардит *	Na_2SO_4
Олимпит *	Na_3PO_4	Когаркоит *	Na_3SO_4F
Сидоренкит	$Na_3Mn(PO_4)(CO_3)$		
Бонштедтит	$Na_3Fe(PO_4)(CO_3)$		Сульфиды
Фосинаит	$Na_3(Ca, Ce)(SiO_3)(PO_4)$	Расвумит	KFe_2S_3
Настрофит	$Na(Sr, Ba)PO_4 \cdot 9H_2O$	Эрдит	$NaFeS_2 \cdot 2H_2O$
Набафит	$NaBaPO_4 \cdot 9H_2O$		
Нахпоит *	Na_2HPO_4		Галогениды
Дорфманит *	$Na_2HPO_4 \cdot 2H_2O$	Виллиомит *	NaF
		Галит *	NaCl

Примечание. Звездочкой отмечены минералы, растворяющиеся в воде при комнатной температуре.

замещаются гидратными аналогами, обедненными щелочами, по следующим реакциям:

$$\underset{Na_6CaZrSi_6O_{18}}{\text{цирсиналит}} + 3\,H_2O \rightarrow \underset{Na_3CaZrSi_6O_{15}(OH)_3}{\text{ловозерит}} + 3\,NaOH;$$

$$\underset{Na_6MnTiSi_6O_{18}}{\text{казаковит}} + 3\,H_2O \rightarrow \underset{Na_3MnTiSi_6O_{15}(OH)_3}{\text{гидроказаковит}} + 3\,NaOH;$$

$$\underset{Na_4Ti_4Si_4O_{18} \cdot 2Na_3PO_4}{\text{ломоносовит}} + 4\,H_2O \rightarrow \underset{Na_4Ti_4Si_4O_{18} \cdot 4H_2O}{\text{мурманит}} + 2\,Na_3PO_4;$$

$$\underset{Na_5TiNb_2Si_4O_{17}F \cdot 2Na_3PO_4}{\text{вуоннемит}} + 4\,H_2O \rightarrow \underset{Na_5TiNb_2Si_4O_{17}F \cdot 4H_2O}{\text{эпистолит}} + 2\,Na_3PO_4;$$

$$\underset{Na_4Zr_2(Si_2O_7)_2}{\text{паракелдышит}} + H_2O \rightarrow \underset{Na_3HZr_2(Si_2O_7)_2}{\text{келдышит}} + NaOH;$$

$$\underset{Na_3HZr_2(Si_2O_7)_2}{\text{келдышит}} + 3\,H_2O \rightarrow \underset{2[NaHZrSi_2O_7 \cdot H_2O]}{\text{гидрокелдышит}} + NaOH.$$

Приведенные реакции необратимы и характеризуются чрезвычайно высокими скоростями [25]. В результате таких реакций образуется особый класс псевдоморфоз замещения, в которых каждый вторичный минерал наследует от первичного не только основные химические компоненты, но и их пространственное расположение в кристалле, возникают эволюционные ряды минералов (цирсиналит→ловозерит, ломоносовит→мурманит, паракелдышит→келдышит→гидрокелдышит), в которых каждому вторичному минералу соответствует вполне определенный протоминерал. Особенность рассматриваемых вторичных минералов состоит в том, что они образуются исключительно путем изменения соответствующих протофаз. Ни один из этих минералов не удалось получить в результате прямого синтеза, и можно предположить, что подобные минералы возникают только через стадию кристаллизации соответствующей протофазы. В то же время гидратные аналоги протофаз развиваются с исключительной легкостью, что приводит к полной псевдоморфизации цирсиналита и других богатых щелочными элементами минералов в значительных объемах изменяемых пород, прежде всего в верхней зоне массивов. Имеющиеся данные позволяют в настоящее время отказаться от представления о первичном образовании ловозерита, мурманита, эпистолита, келдышита, которые предложено выделить в особую генетическую группу [24]. Породы и дериваты, содержащие указанные минералы, необходимо рассматривать как измененные ультраагпаиты, первоначально содержавшие цирсиналит, ломоносовит, вуоннемит и паракелдышит.

Палеоминералогические реконструкции, основанные на выявленных закономерностях, приводят к заключению об исключительно широком распространении ультраагпаитовых образований в Ловозерском, Хибинском и Илимаусакском массивах. К ним принадлежат не только вскрытые на глубине, но и бóльшая часть хорошо изученных и наиболее интересных в минералогическом отношении пегматитовых тел, выходящих на поверхность. Однако поскольку у поверхности эти тела сильно изменены и лишены значительной части высокощелочных минералов, на ранней стадии исследований их не удавалось выделить в особый тип и противопоставить слабо минерализованным агпаитовым пегматитам умеренной щелочности.

Ультраагпаитовая минерализация развивается не только в пегматитовых телах, но и непосредственно в породах главных интрузивных комплексов. В Ловозерском массиве она особенно характерна для пород дифференцированного комплекса (ломоносовит—мурманит), пойкилитовых содалитовых сиенитов (вуоннемит—эпистолит), порфировидных луявритов (ломоносовит—мурманит, цирсиналит—ловозерит). По данным [4], обогащенные ломоносовитом и мурманитом фойяиты верхней части дифференцированного комплекса слагают несколько горизонтов, протягивающихся по всей площади массива. Ловозерит-мурманитовые порфировидные луявриты, залегающие вдоль контакта диффе-

ренцированного комплекса и эвдиалитовых луявритов, образуют протяженные жилы, пласты, а также штоки и дайки. Отметим, что для Илимаусакского массива характерно постоянное присутствие эпистолита и ловозерита в пойкилитовых эгирин-содалитовых сиенитах и эгирин-арфведсонитовых луявритах.

Кратко остановимся на характеристике наиболее интересных проявлений ультраагпаитовой минерализации, установленных в последние годы в глубоких зонах Ловозерского и Хибинского массивов.

В Ловозерском массиве эти проявления приурочены в основном к верхней части дифференцированного комплекса, к горизонтам фойяитов, луявритов и малиньитов, также весьма богатых щелочными и летучими элементами. Наиболее хорошо изучена пегматитовая залежь Юбилейная на горе Карнасурт, в которой обнаружены 10 новых минералов — борнеманит, витусит, вуоннемит, зорит, ильмайокит, лапландит, ловдарит, пенквилксит, раит, сажинит. Всего же в ней установлены около 50 минералов, включая такие редкие, как беловит, лейкосфенит, маунтинит, нарсарсукит, нордит, чкаловит и др. [3] [1]. Залежь представлена почти горизонтальным асимметрично-зональным телом мощностью 1—1,5 м, прослеженным на 26 м по контакту фойяитов (вверху) и луявритов. Непосредственно по границе с луявритами проходит тонкая полевошпатовая оторочка, выше которой расположена зона мощностью около 0,5 м, сложенная крупнокристаллическим агрегатом микроклина, содалита, арфведсонита, эвдиалита. Ближе к осевой части тела в этой зоне появляются натролит, крупные почки светлого радиально-волокнистого эгирина, конкреции пенквилксита, пластинки ломоносовита, нептунит, серандит, стенструпин. Центральная зона и крупная апофиза (1,2×2,7 м) состоят в основном из белого и розового кавернозного натролита, в массе которого заключены блоки катаклазированного микроклина, желвакообразные выделения полилитионита и кристаллы чкаловита, частично замещенного ловдаритом. Верхняя зона сложена микроклином, эвдиалитом, рамзаитом, эгирином. Новые и редкие минералы, установленные в этой залежи, в основном приурочены к центральной натролитовой зоне.

Носителями однотипной ультраагпаитовой минерализации в Ловозерском массиве являются также приуроченные к определенным частям разреза дифференцированного комплекса пегматитовые горизонты, которые прослеживаются с перерывами по всей площади массива. Подобная же минерализация связана с многочисленными маломощными (1—3, реже до 15 см) прожилками в луяврит-фойяит-уртитах, сложенными уссингитом, содалитом, анальцимом, канкринитом или натролитом, реже силикатами и карбонатами натрия.

---

[1] Решением Мурманского облисполкома залежь Юбилейная объявлена минералогическим заповедником.

Протяженный пегматитовый горизонт мощностью до 0,5—1 м, вскрытый горной выработкой на горе Карнасурт под горизонтом малиньитов, минералогически весьма своеобразен. На отдельных участках он содержит в качестве породообразующего минерала водорастворимый силикат натрия — натросилит $Na_2Si_2O_5$, который первоначально был отмечен как минералогическая редкость (17). Натросилит — твердый, бесцветный, водяно-прозрачный минерал со слюдоподобной спайностью. В одних участках он выполняет интерстиции между кристаллами и зернами различных минералов пегматита, в других слагает крупные (более 20—30 см) монокристальные блоки с пойкилитовыми включениями микроклина, игольчатого эгирина, анальцима, канкринита, гакманита, натролита, виллиомита, натрофосфата, термонатрита, новых и редких минералов — витусита, вуоннемита, казаковита, ольгита, фосинаита, цирсиналита, ломоносовита, расвумита и др. Следует особо отметить, что в присутствии натросилита эвдиалит неустойчив и обычно замещен цирсиналитом (ловозеритом) или другими высокощелочными цирконосиликатами.

Развитые в луявритах, фойяитах, уртитах и особенно в малиньитах маломощные прожилки уссингита и других светлых алюмосиликатов с небольшим количеством эгирина и рибекита почти постоянно содержат вкрапленность разнообразных высоконатриевых (в том числе редкометальных) минералов: беловита, вуоннемита, ильмайокита, казаковита, настрофита, натисита, нордита, ольгита, расвумита, стенструпина, умбозерита, фосинаита, чкаловита, эрдита. Кроме того, в составе некоторых прожилков важную роль играют виллиомит, макатит, натросилит, ревдит, натрит, термонатрит, а также натрофосфат и олимпит с развивающимися по ним вторичными фосфатами — дорфманитом и нахпоитом.

Своеобразная минерализация, отличающаяся несколько пониженной ролью щелочных металлов, вскрыта горными выработками на горе Аллуайв Ловозерского массива. Она связана с пегматитами, залегающими в виде жил, прожилков и шлировидных обособлений среди пойкилитовых вишневитовых и нозеановых сиенитов нижней части дифференцированного комплекса. Главные минералы пегматитов — калиевый полевой шпат, нефелин, гакманит, натродавин, щелочные амфибол и пироксен; менее широко распространены анальцим, вуоннемит, ломоносовит—мурманит, натролит, альбит, уссингит, серандит, рамзаит, ламфиллит, астрофиллит, нептунит, катаплеит, илерит, гейдоннеит, эвдиалит, паракелдышит, апатит, сфен, ильменит, пирофанит, пирротин, троилит, молибденит и клейофан; еще более редки лопарит, лейфит, эпидидимит, нейборит, натрофосфат, стенструпин. Наиболее поздняя ассоциация минералов приурочена к осевой части пегматитовых тел и представлена вилиомитом, когаркоитом, термонатритом, тонкоигольчатым и волокнис-

тым эгирином, а также новыми минералами—сидоренкитом и настрофитом.

На территории Хибинского массива тела ультраагпаитов сосредоточены в кольцевой зоне ийолит-уртитов и рисчорритов, отличающихся от пород других комплексов массива обогащенностью натрием, калием и летучими элементами. Тело с наибольшим разнообразием малостойких и водорастворимых минералов с высоким содержанием Na и K вскрыто глубокой горной выработкой на горе Расвумчорр. Это крутопадающее жилообразное пегматитовое тело залегает в ийолит-уртитах, имеет мощность 2—3 м и сложено грубозернистым агрегатом нефелина, гакманита, калиевого полевого шпата, щелочного амфибола, эгирин-диопсида, энигматита, эвдиалита. Спорадически в интерстициях между зернами указанных минералов и в виде псевдоморфоз по ним, а также гнездообразных обособлений обнаруживаются скопления поздних минералов: волокнистого и игольчатого эгирина, лампрофилита, ломоносовита, щербаковита, фосинаита, дельхайелита, натролита, пектолита, виллиомита, натрита, термонатрита, натрофосфата, накафита, олимпита, шафрановскита, сидоренкита, расвумита, джерфишерита, пирротина, молибденита, сфалерита, галенита. В участках развития поздних минералов интенсивно проявилось замещение эвдиалита цирсиналитом и ловозеритом. Зерна олимпита и натрофосфата покрыты порошковатой корочкой дорфманита, возможно, гипергенного. Для поздних минералов характерно крайне неравномерное распределение в пегматитовом теле. Ассоциация шафрановскита, сидоренкита и олимпита установлена лишь в одном гнезде.

Кроме крупных пегматитовых тел, подобных описанному выше, носителями ультраагпаитовой минерализации в Хибинском массиве являются многочисленные мелкие пегматитовые прожилки, секущие рисчорриты, ийолит-уртиты и вмещающие их нефелиновые сиениты. Прожилки слагаются адуляровидным ортоклазом, нефелином, содалитом, волокнистым и игольчатым эгирином, пектолитом, натролитом, ломоносовитом, бариевым лампрофиллитом, щербаковитом, вадеитом, катаплеитом, цирсиналитом (ловозеритом) по эвдиалиту, фосинаитом, коашвитом, казаковитом, вуоннемитом, калийсодержащими сульфидами, поздними водорастворимыми виллиомитом, натрофосфатом, натритом, термонатритом и др. Распространены также прожилки, сложенные в основном виллиомитом или карбонатами натрия (натрит, термонатит, трона). Минерализация этих прожилков часто носит низкотемпературный характер. Вместо цирконосиликатов с щелочными металлами в них обычен циркон, наблюдаются такие необычные для нефелин-сиенитовых дериватов минералы, как шортит, пирссонит и гейлюссит.

К охарактеризованным образованиям близок необычный тип первичной содовой минерализации, широко представленный в Хибинском массиве. Здесь в пределах апатитоносной ийолит-уртитовой дуги, ниже зоны выветривания буровыми скважинами

вскрыты блоки пород мощностью в десятки и сотни метров с интенсивной содовой минерализацией прожилково-вкрапленного типа. Содовые минералы представлены термонатритом, троной, а также впервые установленным в природе безводным карбонатом натрия — натритом [23]. Все они образуют водяно-прозрачные, бесцветные, розовые, реже желтовато-оранжевые зерна или плотные зернистые массы и находятся в тесной ассоциации с другими высокощелочными карбонатами (шортитом, пирссонитом, гейлюсситом, бонштедтитом, ферротихитом), фосфатами (Sr-апатитом, накафитом), галогенидами (виллиомитом, нейборитом), сульфидами (расвумитом, джерфишеритом), силикатами и алюмосиликатами (калиевым полевым шпатом, анальцимом, альбитом, канкринитом, натролитом, эгирином, биотитом и др.). Керн пород с подобной минерализацией под действием атмосферной воды через несколько месяцев хранения в естественных условиях превращается в мелкую крошку или тонкощебенчатую дресву. При циркуляции в таких породах грунтовые воды приобретают высокую щелочность (pH до 12); такие воды фонтанируют из ряда разведочных скважин в восточной части массива.

Проявления ультраагпаитов в каждом из рассматриваемых массивов характеризуются рядом особенностей, отвечающих различной степени агпаитности пород. В Хибинском массиве, породы которого менее агпаитны, эти проявления распространены на сравнительно ограниченной площади (район центральной дуги) и часто наложены на пегматитовые тела, в которых отсутствуют богатые щелочными элементами первичные минералы, или образуют гидротермальные жилы и прожилки в различных породах. В Ловозерском массиве ультраагпаитовая минерализация развита практически повсеместно, причем не только в пегматитах и гидротермалитах, но и в породах главных интрузивных фаз. Если тесная генетическая связь ультраагпаитовой минерализации с пегматитами в Ловозерском массиве не вызывает сомнений, то в Хибинском массиве эта связь довольно проблематична. Некоторые исследователи [2] ее отрицают и подчеркивают преимущественную приуроченность ультраагпаитовых ассоциаций минералов к эпигенетическим жилам, которые рассматриваются как имеющие совершенно иную, нежели пегматиты, природу. Однако существование такой связи вполне вероятно, поскольку, по данным других исследователей [1, 7, 8, и др.], образование пегматитов и эпигенетических жил Хибинского массива отвечает последовательным этапам развития единого послемагматического процесса.

Особенностью состава ультраагпаитов в Ловозерском массиве является повышенная роль Sr, TR и Nb, в Хибинском — K, Ba и Ti. В Хибинском массиве установлено значительное число очень редких калиевых и калийсодержащих минералов (вадеит, хибинскит, умбит, щербаковит, ферсманит, дельхайелит, канасит и др.), что указывает на принадлежность хибинских ультраагпаитов к специфической калиевой ветви агпаитовых образований

в противоположность натриевой ветви, характерной для Ловозерского массива. Однако и в Хибинском массиве преобладающая часть богатых щелочными металлами минералов представлена соединениями натрия, общими для двух массивов; таковы натросилит, натисит и натрофосфат, ломоносовит, вуоннемит, цирсиналит, казаковит, паракелдышит и их гидратные аналоги, фосинаит, витусит, ольгит, сидоренкит, натрит, термонатрит и др. Резко выраженная натриевая специфика минералов ультраагпаитов согласуется с общим характером распределения щелочных металлов в породах с соотношением $(Na+K)/Al>1$ [9, с. 143].

В строении сложных пегматитовых тел провинции, как правило, участвуют несколько разновременных минеральных ассоциаций, различающихся по степени агпаитности и свидетельствующих о значительном диапазоне изменения щелочности минералообразующего раствора в процессе развития пегматитовых систем. Кривая изменения щелочности имеет характер высокой волны и делит весь послемагматический этап на три последовательные стадии: I—стадия возрастающей щелочности; II — стадия максимальной щелочности; III — стадия понижающейся щелочности.

Продукты I стадии обычно слагают краевые зоны сложных пегматитов или целиком тела незональных простых пегматитов, а продукты II и III стадий локализуются преимущественно в центральных частях тел или накладываются на более ранние минеральные ассоциации пород и пегматитов по системе трещин с образованием эпигенетических жил. По особенностям минерального состава продукты I стадии обычно довольно близки к вмещающим материнским породам, а продукты II и III стадий значительно от них отличаются. Минералогическое своеобразие дериватов нефелиновых сиенитов в основном определяется характером наиболее агпаитовых ассоциаций II стадии, отражающих высшую ступень эволюции конкретной пегматитовой системы, степень максимального обогащения минералообразующего раствора щелочными металлами, летучими и редкими элементами. Стадия III по содержанию щелочных элементов примерно соответствует стадии I, но является более низкотемпературной, существенно гидротермальной. В дериватах ультраагпаитов на этой стадии развиваются цеолиты, образуются различные продукты изменения обогащенных щелочными металлами титано-, ниобо- и цирконосиликатов, происходит отложение акцессорных минералов лития и бериллия — весьма дефицитных элементов нефелин-сиенитовых магм. Вместе с ними из остаточного раствора часто выделяются необычные для более высокотемпературных ассоциаций минералы свободного кремнезема (кварц, халцедон).

Вопросы типоморфизма минералов нефелиновых сиенитов и их дериватов разработаны еще недостаточно. Традиционное выделение агпаитовых и миаскитовых формаций в современном понимании границы между ними, фиксируемой коэффициентом аг-

паитности (Na+K)/Al, равным единице [19], по-прежнему сохраняет значение, объясняя существование двух неравноценных по распространенности групп массивов, резко различающихся составом второстепенных и акцессорных минералов, металлогенической и рудной специализацией [5, 10]. Однако в массивах агпаитовой формации, составляющих лишь около 1% общего числа нефелин-сиенитовых комплексов, разнообразие минералов и минеральных ассоциаций оказалось настолько значительным, что для выделения типов внутри данной группы требуется привлечение дополнительных критериев. К тому же в этой группе основная часть характерных минералов связана не с магматическими породами, к которым обычно применяется термин «агпаитовые» (по Н. Уссингу), а с их поздне- и послемагматическими дериватами, в которых алюмосиликаты играют подчиненную роль и величина отношения (Na+K)/Al утрачивает индикаторное значение. В подобных случаях индикатором степени агпаитности пород может служить отношение (Na+K+Ca+Sr)/(Al+Fe^{3+}+ +Ti), на основе которого А. И. Гинзбургом и А. М. Портновым [6] выделена минеральная ассоциация, занимающая промежуточное положение между типичными агпаитовыми и типичными миаскитовыми ассоциациями.

Более универсальный подход к рассматриваемой проблеме предложен Е. И. Семеновым [13—15]. Здесь учитывается влияние на формирующиеся минеральные ассоциации активностей как Na, K и Ca, так и летучих компонентов (F, OH). Весьма чувствительным индикатором поведения этих компонентов является состав темноцветных породообразующих минералов, прежде всего амфиболов. По характеру амфибола и отношению F/Ca в его формуле Е. И. Семеновым выделены пять типов нефелиновых сиенитов, из которых три относятся к промежуточным между типичными агпаитовыми (1 тип) и типичными миаскитовыми (5 тип): 1) арфведсонитовый, или илимаусакский (F/Ca≈10); 2) Mg-арфведсонитовый, или ловозерский (≈5); 3) Al-арфведсонитовый, или хибинский (≈2); 4) катафоритовый, или лангезундский (≈1); 5) гастингситовый, или ильменский (≈0,1).

Главнейшие типоморфные минералы дериватов нефелиновых сиенитов перечислены в табл. 3, которая составлена с учетом новых данных по минералогии ультраагпаитов Хибино-Ловозерской провинции. Границы между дериватами различной агпаитности условны. Однако в ряде случаев они надежно устанавливаются по смене минералов-индикаторов или по наличию реакционных взаимоотношений между определенными минералами.

Весьма надежным индикатором принадлежности минеральных комплексов к ультраагпаитовому типу является наличие в их составе цирсиналита. Это наиболее богатое натрием соединение циркония из всех известных в природе. Установлено, что цирсиналит в основной массе не является первичным, а представляет собой продукт изменения менее богатого натрием цирконо-

Таблица 3

Типоморфные минералы нефелин-сиенитовых дериватов (с учетом данных В. И. Герасимовского, Е. И. Семенова, Х. Соренсена, А. И. Гинзбурга и А. М. Портнова)

Тип дериватов	Редкометальные и акцессорные минералы		Породообразующие минералы	
			темноцветные	светлоцветные
Агпаитовые 1. Ультраагпаитовые	Цирсиналит (ловозерит) * Казаковит (тисиналит) Вуоннемит (эпистолит) Ломоносовит (мурманит) Баритолампрофиллит Витусит, фосинаит, стенструпин, ольгит, сидоренкит, олимпит Полилитионит Чкаловит (тугтупит) Расвумит, эрдит		F-арфведсонит Рибекит Эгирин	Гакманит Уссингит Натродавин Натросилит Натрофосфат Виллиомит
2. Высокоагпаитовые	Паракелдышит (келдышит, гидрокелдышит) Лейфит	Эвдиалит Лампрофиллит Лопарит Рамзаит Сейдозерит Власовит Апатит Сфен Астрофиллит Ринколит	F-арфведсонит Эгирин Энигматит	Содалит Нефелин Анальцим Канкринит Виллиомит КПШ
3. Среднеагпаитовые	Гейдоннеит Илерит Эпididимит		Mg-арфведсонит Эгирин-авгит Биотит	Нефелин КПШ Содалит Анальцим Канкринит Нозеан Виллиомит
4. Низкоагпаитовые (промежуточные)	Эвдиалит Ловенит Бритолит Чевкинит Лейкофан	Апатит Сфен Пирохлор Циркон Ильменит Флюорит Кальцит	Al-арфведсонит Катафорит Баркевикит Эгирин-авгит Биотит	
5. Миаскитовые	Магнетит Ортит Эшинит Корунд Меланит		Гастингсит Авгит Биотит	Нефелин КПШ Альбит Плагиоклаз Канкринит Содалит Нозеан

* В скобках — вторичные минералы унаследованного состава.

силиката — эвдиалита, по которому он развивается с образованием каемок или полных псевдоморфоз [20]. Развитие бесцветного или бледноокрашенного цирсиналита по кристаллам и зернам ярко-красного эвдиалита — легко запоминающийся признак, указывающий на резко повышенную щелочность среды, при которой существование эвдиалита невозможно. Равноценное индикаторное значение имеют псевдоморфозы ловозерита по эвдиалиту [20, 21].

Неустойчивость эвдиалита в ультраагпаитовых дериватах — одна из их замечательных особенностей. Эвдиалит является концентратором почти половины элементов таблицы Менделеева, в том числе Na, K, Ca, Sr, Ba, Fe, Mn, Mg, Al, TR_{Ce}, TR_{Y}, Si, Zr, Hf, Ti, Th, U, Nb, Ta, Cl, F, S, B. При замещении эвдиалита цирсиналитом и другими более простыми по составу цирконосиликатами (вадеитом, катаплеитом) все эти химические элементы переотлагаются с образованием большого числа различных по составу, обогащенных щелочными металлами минералов, в том числе таких специфических для ультраагпаитов, как казаковит, имандрит, ольгит, кальборсит.

Очень важную группу типоморфных минералов ультраагпаитов составляет семейство ломоносовита, включающее наиболее щелочные из всех известных в природе соединения титана и ниобия. Их роль определяется сравнительно широкой распространенностью в ультраагпаитовых породах при отсутствии в породах других типов, легкостью визуальной диагностики, однозначностью связи между щелочными и гидратными аналогами, сравнительно высокой устойчивостью последних в зонах эпитермального и гипергенного изменения пород.

Породообразующие минералы ультраагпаитов предельно обогащены щелочными и летучими элементами. В составе светлоцветных минералов заметную роль играют наименее кислотные адденды —S^{-} (в гакманите), CO_3^{2-} (в натродавине). Специфическими для данной ассоциации являются уссингит — алюмосиликат с самой высокой агпаитностью (Na/Al=2) и натросилит — самый богатый натрием природный силикат. Второй из этих минералов особенно интересен тем, что в его присутствии эвдиалит и другие соединения Zr, Ti, Nb, P с умеренным содержанием щелочных металлов теряют свою устойчивость и разлагаются с образованием цирсиналита и других высокощелочных соединений тех же элементов.

Таким образом, по наличию широкого круга характерных минералов, по типоморфным признакам минералов и взаимоотношениям пересыщенных щелочными металлами цирконосиликатов с эвдиалитом ультраагпаиты выделяются в резко обособленную группу нефелин-сиенитовых дериватов (см. табл. 3, тип 1).

Дериваты 2 высокоагпаитового типа содержат в качестве наиболее богатых щелочными элементами типоморфных редкометальных минералов паракелдышит и эвдиалит. Для этих цирконосиликатов, часто образующих совместные выделения в породах и пегматитах, реакционные взаимоотношения не характерны. Оба они представлены совершенно свежими зернами или частично замещены катаплеитом, гейдоннеитом, илеритом и другими цирконосиликатами с умеренным содержанием щелочных металлов. Паракелдышит обычно частично или полностью гидратирован и замещен келдышитом (Ловозеро) или гидрокелдышитом (Хибины).

В дериватах 3 и 4 типов эвдиалит сосуществует или находится в реакционных взаимоотношениях с менее богатыми щелочными металлами цирконосиликатами, чем паракелдышит. Эти типы связаны постепенными взаимопереходами и различаются менее отчетливо, чем типы 1 и 2. Столь же неотчетлива граница между типами 4 (низкоагпаитовым) и 5 (миаскитовым). Принято считать, что миаскиты характеризуются развитием циркона вместо свойственных агпаитам щелочных цирконосиликатов. Однако этот признак недостаточен для разграничения указанных образований, так как область устойчивости циркона при понижении температуры резко расширяется, что делает возможной его кристаллизацию в низкотемпературных дериватах агпаитовых типов вплоть до ультраагпаитового.

Распространенность минералов, перечисленных в табл. 3, резко уменьшается при переходе от дериватов нижней части таблицы к дериватам ее верхней части, указывая на то, что чем выше эволюционная ступень в процессе дифференциации щелочной магмы, тем реже она достигается. Действительно, если массивы с агпаитовой минерализацией типов 4 и 3 весьма редки по сравнению с миаскитовыми, то массивы с агпаитовой минерализацией типов 2 и 1 исключительно редки, но именно с последними типами, а не со всеми массивами агпаитовых пород обычно связаны наиболее крупные месторождения фосфора, ниобия, циркония, тантала, редких земель. Ультраагпаитовые пегматиты и гидротермалиты непосредственно сопровождают такие месторождения или слагают в массивах нефелиновых сиенитов самостоятельные штоки и пластообразные тела с повышенными концентрациями Ta, Nb, TR, Zr. Эти тела возникают при кристаллизации резко пересыщенных щелочными и летучими элементами остаточных силикатно-солевых жидкостей и являются индикаторами особых условий дифференциации щелочной магмы, обеспечивающих свободную миграцию и концентрацию громадных масс наиболее инертных рудных компонентов, которые при более низкой агпаитности не образуют подобных концентраций.

На резкую пересыщенность остаточных жидкостей щелочными и летучими элементами наряду с другими признаками указывает наличие в составе ультраагпаитов обильных скоплений водорастворимых и малостойких минералов (см. табл. 2), в том числе карбонатов натрия, находки которых в глубоких зонах Хибин и Ловозера приводят к пересмотру представлений [5, 27 и др.] о нехарактерности минералов, содержащих CO_2, для агпаитовых комплексов.

Еще большее петрогенетическое значение имеют находки в ультраагпаитах натросилита, который легко растворяется в воде с образованием «жидкого стекла» — своеобразного ультращелочного водно-силикатного раствора, смешивающегося с водой в любых пропорциях. Обнаружение природных скоплений этого минерала подтверждает правомерность петрологических выводов из результатов изучения модельных систем агпаитового ти-

па с участием в качестве реагента соединения $Na_2Si_2O_5$ и окончательно решает длительный спор о характере перехода высокощелочных алюмосиликатных расплавов в гидротермальный раствор в пользу непрерывности этого процесса. Широкая область непрерывной растворимости воды в расплавах и непрерывный переход расплавов в гидротермальный раствор без отделения воды в газовую фазу зафиксированы в модельной системе альбит—натросилит—вода [26]. По мнению Л. Н. Когарко [9, с. 112], такой вариант фазовых соотношений с водой еще более вероятен для нефелинсодержащих пород, вследствие чего на поздних стадиях кристаллизации этих пород должны возникать остаточные жидкости, состав которых отклоняется от эвтектического в сторону резкого обогащения летучими компонентами и редкими элементами. Широкое развитие пегматоидных образований, связанных с агпаитовыми нефелиновыми сиенитами, рассматривается Л. Н. Когарко как результат подобной дифференциации; следствием непрерывного перехода расплавов в растворы является трудность проведения четкой грани между магматической и гидротермальной стадиями минералообразования в агпаитовых нефелиновых сиенитах.

Подводя итоги проведенных исследований, можно прийти к заключению о том, что уникальное минералогическое разнообразие Ловозерского и Хибинского массивов в решающей степени определяется широким распространением в их пределах пород, пересыщенных щелочными, летучими и редкими элементами. С особой яркостью это разнообразие отразилось в минеральном составе ультраагпаитовых пегматитов и гидротермалитов — нового типа нефелин-сиенитовых дериватов, результаты изучения которых освещают до сих пор почти неизвестную область щелочного петрогенезиса. Своеобразие изученных дериватов подчеркивается обнаружением в них за весьма короткий период около 50 новых минералов различных классов, в том числе 19 соединений фосфора, что вдвое превышает количество фосфатов, установленных в данной провинции за всю предшествующую историю ее изучения.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бородин Л. С.* Основные особенности строения и состава жильных образований Хибинского массива (пегматитов) в связи с вопросами их генезиса и классификации.— Тр. ИМГРЭ, 1957, вып. 1, с. 123—137.
2. *Боруцкий Б. Е., Соколова М. Н., Шлюкова З. В.* Типоморфизм и условия образования минералов и минеральных ассоциаций в щелочных породах Хибинского массива.— В кн.: Состав, структура минералов как показатели их генезиса. М.: Наука, 1978, с. 76—108.
3. *Буссен И. В., Еськова Е. М., Меньшиков Ю. П.* и др. Основные черты минералогии и геохимии ультращелочных пегматоидов и гидротермалитов.— В кн.: Материалы по минералогии и геохимии щелочных комплексов пород Кольского полуострова. Апатиты: Кол. фил. АН СССР, 1975, с. 102—117.
4. *Власов К. А., Кузьменко М. В., Еськова Е. М.* Ловозерский щелочной массив. М.: Изд-во АН СССР, 1959. 623 с.

5. *Герасимовский В. И.* Геохимия и минералогия нефелин-сиенитовых интрузий.— Геохимия, 1956, № 5, с. 61—74.
6. *Гинзбург А. И., Портнов А. М.* О минеральных ассоциациях щелочных пород.— Геохимия, 1966, № 4, с. 398—403.
7. *Дорфман М. Д.* К вопросу о генезисе пегматитовых жил Хибинского щелочного массива.— Тр. Минерал. музея АН СССР, 1972, вып. 21, с. 51—74.
8. *Дудкин О. Б.* Особенности строения гигантского пегматитового тела в ийолит-уртитах горы Юкспор (Хибины).— Материалы по минералогии Кольского полуострова, 1959, вып. 1, с. 14—19.
9. *Когарко Л. Н.* Проблемы генезиса агпаитовых магм. М.: Наука, 1977. 294 с.
10. *Кононова В. А., Андреева Е. Д., Свешникова Е. В., Яшина Р. М.* О некоторых факторах концентрации рудных компонентов в щелочных породах.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1976, № 12, с. 13—32.
11. Минералогия Хибинского массива/Под ред. Ф. В. Чухрова. М.: Наука, 1978. Т. 1. 228 с.; Т. 2. 585 с.
12. Минералы Хибинских и Ловозерских тундр/Под ред. А. Е. Ферсмана. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1937. 563 с.
13. *Семенов Е. И.* Минералого-геохимические типы нефелин-сиенитовых дериватов.— В кн.: Минералогия пегматитов и гидротермалитов щелочных массивов. М.: Наука, 1967, с. 52—71.
14. *Семенов Е. И.* Минералогия Ловозерского щелочного массива. М.: Наука, 1972. 307 с.
15. *Семенов Е. И.* Типоморфизм минералов щелочных массивов.— В кн.: Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов. М.: Наука, 1980, с. 102—108.
16. *Слепнев Ю. С.* Ловчоррит-ринколитовые пегматиты. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 115 с. (Тр. ИМГРЭ; Вып. 13).
17. *Тимошенков И. М., Меньшиков Ю. П., Ганнибал Л. Ф., Буссен И. В.* Природный силикат натрия — натросилит — из Ловозерского массива.— Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1975, ч. 104, вып. 3, с. 317—321.
18. *Тихоненков И. П.* Нефелиновые сиениты и пегматиты Хибинского массива. М.: Изд-во АН СССР, 1963. 247 с.
19. *Ферсман А. Е.* К геохимии щелочных магм.— В кн.: Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1958, т. 4, с. 413—419.
20. *Хомяков А. П.* Новое в минералогии группы ловозерита.— Докл. АН СССР, 1977, 237, № 1, с. 199—202.
21. *Хомяков А. П.* Типоморфизм минералов ультраагпаитовых пегматитов.— В кн.: Научные основы и практическое использование типоморфизма минералов. М.: Наука, 1980, с. 152—157.
22. *Хомяков А. П.* Новые минералы глубинных зон Ловозерского и Хибинского массивов.— В кн.: Геохимия. Минералогия: (Междунар. геол. конгр. XXVI сес. Докл. сов. геологов). М.: Наука, 1980, с. 164—169.
23. *Хомяков А. П.* Натрит Na_2CO_3 — новый минерал.— Зап. Всесоюз. минерал. о-ва, 1982, ч. 111, вып. 2, с. 220—225.
24. *Хомяков А. П., Юшкин Н. П.* Принцип наследования в кристаллогенезисе.— Докл. АН СССР, 1981, 256, № 5, с. 1229—1233.
25. *Хомяков А. П., Капцов В. В., Щепочкина Н. И.* и др. Явление сверхбыстрого гидролиза ультращелочных титано- и цирконосиликатов: Экспериментальная проверка.— Докл. АН СССР, 1978, 243, № 4, с. 1028—1031.
26. *Mustart D. A.* Phase relations in the peralkaline portion of the system Na_2O—Al_2O_3—SiO_2—H_2O: Ph. D. thesis/Stanford Univ., Dep. Geol., 1972.
27. *Sørensen H.* Alcali syenites, feldspathoidal syenites and related rocks.— In: The alkaline rocks/Ed. H. Sørensen. L.; N. Y.: J. Wiley a. Sons Publ., 1974, p. 22—52.

УДК 550.4

В. Л. БАРСУКОВ

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ ГЕОХИМИИ

Одним из решающих условий развития естественных производительных сил страны является дальнейшее укрепление ее минерально-сырьевой базы, обеспечение потребностей промышленности и сельского хозяйства всеми видами полезных ископаемых, расширение их запасов на месторождениях, выявление новых перспективных районов рудных тел и источников минерального сырья.

Огромная роль в решении этой задачи принадлежит геологическим наукам, в том числе и геохимии.

В наше время границы отдельных геологических дисциплин постепенно размываются, все чаще наблюдаются перекрытие и взаимопроникновение различных научных направлений; это — общая тенденция развития современного знания. Геохимия, оставаясь самостоятельной научной дисциплиной, все сильнее пронизывает другие направления геологической науки, способствуя развитию в них точного знания.

Изложить в краткой статье современные проблемы геохимии во всем их многообразии невозможно, поэтому в настоящей работе мы затронем только три главные проблемы. Это геохимия процессов рудообразования и связанная с ней прикладная геохимия, геохимия глубинных зон Земли, включая магматические процессы, и космохимия.

1. **Геохимия процессов рудообразования.** Основные исследования в этой области направлены на выявление источников рудного вещества, способов его поступления в субстраты, легко мигрирующие в земной коре, форм и условий переноса ими рудных элементов и, наконец, факторов, приводящих к отложению и накоплению рудных элементов.

Проблема источника рудного вещества включает две одинаково сложные, но и одинаково важные части: 1) источник в земной коре агентов переноса рудного вещества — расплавов, растворов; 2) источник перемещаемых этими агентами рудных компонентов.

Если об источниках расплавов у нас есть достаточно строгие представления, достоверность которых можно проверить экспериментально, то относительно источников растворов (собственно — источников воды этих растворов) у нас до сих пор полной ясности нет. Еще несколько десятилетий назад все решалось просто — внедряется магматический расплав, из него кристаллизуется изверженная порода, и при кристаллизации расплава освобождается то или иное количество растворенной в нем воды. Это явление реально, но масштаб его проявления гораздо меньше, чем предполагалось ранее, ибо в подавляющем большинстве слу-

чаев расплавы оказываются недосыщенными в отношении воды. Но теперь мы знаем, что термальные воды областей современного вулканизма, еще недавно твердо считавшиеся ювенильными, имеют поверхностное питание и что изотопный состав водорода указывает на участие поверхностных вод в формировании многих рудных месторождений. Мы стоим перед необходимостью критически осмыслить новые сведения и вытекающие из них геохимические следствия и должным образом оценить роль вод разного происхождения в формировании руд.

Исследования последних лет ясно показали бесперспективность поиска единого, универсального для всех типов месторождений источника рудного вещества. Если для собственно магматических месторождений, связанных с основной и ультраосновной магмой, магматический источник рудного вещества не вызывает сомнения (конечно, исключая наложенное оруденение), то для огромной группы гидротермальных месторождений по мере их изучения роль собственно магматического источника представляется все более ограниченной. Преобладающее значение начинает приобретать не магматический расплав, а уже закристаллизовавшаяся магматическая порода. Все чаще в качестве источника рудного вещества рассматриваются также метаморфические и осадочные породы. При этом способность породы служить источником рудных элементов, поступающих в воздействующий раствор, в подавляющем большинстве случаев определяется не столько исходной концентрацией рудного элемента в каком-то конкретном геологическом теле, т. е. так называемой металлогенической специализацией, сколько возможностью проявления процессов, приводящих к его мобилизации, наличием или отсутствием соответствующих форм рудных элементов в материнском теле.

Явная полигенность рудного вещества ставит перед геохимиками новые, все более усложняющиеся задачи. Изучение распределения рудных элементов и форм их нахождения в магматических, осадочных и метаморфических породах в сочетании с экспериментальным изучением распределения рудных элементов в ходе дифференциации и кристаллизации в различных магматических системах, их распределения между расплавом и кристаллическими фазами, расплавом и равновесной газово-паровой фазой, а также моделирование процессов мобилизации рудных элементов из пород является одним из актуальных направлений исследований.

Однако знание источника рудного вещества при формировании того или другого месторождения, несмотря на его огромное теоретическое и практическое значение, уже недостаточно. Рудообразование часто выступает как заключительный этап целой серии геологических процессов последовательного накопления рудного вещества, и в этом случае проблема его источника требует прослеживания всей цепи событий, приводящих к его накоплению. Такой подход к проблеме обусловливает необходи-

мость тесной увязки геохимии рудных элементов с геологической историей изучаемого региона, что в конечном итоге с помощью палеореконструкций создает новые подходы к расшифровке закономерностей размещения месторождений полезных ископаемых.

За последние годы существенно изменились наши представления и о формах переноса рудных компонентов. Успехи физико-химии растворов положили конец суждениям о переносе металлов в виде простых соединений. В сложных по составу природных растворах рудные компоненты, вступая в химическое взаимодействие с целым рядом ионов, определяющих геохимический фон гидротермальных растворов, образуют комплексные соединения, которые по свойствам и поведению существенно отличаются от простых ионов. Известно большое число комплексных соединений различных металлов, которые могут транспортироваться гидротермальными растворами, и задача состоит в том, чтобы систематизировать этот материал и на основе общих закономерностей эволюции химического состава гидротермальных растворов определить условия и преобладающие формы миграции разных рудных компонентов.

Накопление в последние десятилетия экспериментальных данных привело к пересмотру классических представлений и о причинах рудообразования и к признанию гораздо более сложной физико-химической природы этого процесса, чем представлялось ранее. Для образования магматических месторождений (ликвационного, кумулятивного или кристаллизационного происхождения), кроме специфики состава и условий кристаллизации, как правило, вполне достаточно действия присущих самому расплаву факторов его эволюции. Геохимическим критерием рудоносности ультрабазитов, базитов и щелочных пород, необходимым условием образования месторождений магматической стадии, если их возникновение обусловлено кристаллизационной дифференциацией, является «эвтектическая» насыщенность исходного расплава рудным компонентом [15]. Так, например, концентрация P_2O_5 в йолитовой магме, с которой связаны апатитовые месторождения, должна быть не менее 2,5%; агпаитовые магмы, являющиеся материнскими для эвдиалитовых месторождений, должны содержать не менее 1,5% ZrO_2; концентрация Cr_2O_3 в базальтовых расплавах, эвтектически насыщенных хромитом, не может быть ниже 0,02% и т. д. И чем шире поле кристаллизации рудного минерала в магме, тем выше вероятность появления месторождения на магматическом этапе. Это обусловливает важность изучения диаграмм состояния силикатных систем с рудными минералами, необходимость определения коэффициентов распределения рудных элементов между минеральными фазами пород и рудным минералом, между минеральными фазами и ликватами. Зная зависимость между содержанием рудных элементов в породообразующих минералах и их составом в условиях, отвечающих образованию кристаллизационных

или ликвационных магматических месторождений, мы по содержанию рудного элемента в любом породообразующем минерале сможем оценить рудоносность того или другого массива. Однако чтобы достичь этого, необходима постановка широких и целенаправленных экспериментальных исследований.

Что же касается наложенного оруденения, то при оценке массивов, несущих Cu-Ni минерализацию, удобнее всего использовать изотопные метки. Например, для этой цели может служить изотопное отношение $^{10}B/^{11}B$ [22]. При образовании же гидротермальных месторождений присущих гидротермальным системам внутренних факторов эволюции (изменение T, P и вызываемые этим химические следствия) часто оказывается уже недостаточно и необходимо дополнительное воздействие внешних физико-химических факторов. Более того, говоря о причинах гидротермального рудообразования, мы не можем рассматривать их просто как антитезу явления — поступления рудных элементов в раствор.

Как известно, причиной отложения из раствора любой твердой фазы, любого минерала является достижение концентраций слагающих его компонентов, превышающих соответствующее произведение растворимости. Но это — причина общая, не зависящая от того, образуется ли не представляющая интереса редкая вкрапленность рудного минерала или ценное месторождение. Знания этой причины уже недостаточно. Для образования руд и месторождений нужно не просто осаждение из растворов рудных элементов, а их концентрированное отложение в ограниченных объемах. Следовательно, необходимо не только анализировать общие химические факторы, вызывающие переход рудного элемента из раствора в твердую фазу, но и понять причины локального действия факторов осаждения, причины возникновения на пути движения рудоносных растворов своего рода «геохимических барьеров»; именно это является сейчас главной задачей изучения геохимии гидротермального рудообразования. Естественным результатом этих исследований, их конечным результатом является разработка новых, более эффективных геохимических методов поисков и оценки месторождений полезных ископаемых. Первостепенное значение приобретает создание методов, основанных на расшифровке условий переноса и отложения рудного вещества, раскрытии механизма действия «геохимических барьеров», значения сопряженных реакций, вызывающих и сопровождающих рудоотложение.

Какие же внешние факторы могут быть причиной концентрированного осаждения рудного вещества из гидротермальных растворов? Долгое время основной причиной рудоотложения считалось снижение температуры гидротермальных растворов. Конечно, растворимость тех или иных соединений металлов зависит от температуры, известны и повторяющиеся температурные интервалы кристаллизации тех или других рудных минералов [18]. Например, касситеритовые руды образуются при темпера-

туре только выше 300° С, а киноварь, наоборот, не может образоваться при температуре выше 200—250° С из растворов любого состава [20]. И все же в подавляющем большинстве случаев температура лишь косвенно влияет на рудоотложение и не может рассматриваться в качестве универсального фактора рудоотложения, тем более концентрированного. У большинства комплексных соединений металлов нет резких температурных пиков растворимости, нет резких перепадов температуры и у движущихся гидротермальных растворов, и в пределах одной-двух стадий рудообразования они часто оказываются практически изотермичными.

Анализируя роль различных факторов рудоотложения, необходимо отметить, что далеко не всегда механизм рудообразования, очевидный с позиций физической химии, в действительности реализуется в конкретной геологической обстановке. Так, еще совсем недавно в качестве одного из ведущих факторов рудоотложения часто рассматривалось связывание, вывод из раствора лигандов, обеспечивающих образование рудными элементами легко мигрирующих комплексных соединений. Действительно, зная формы миграции рудных элементов в гидротермальном растворе, можно написать не одну химическую реакцию, которая, казалось бы, описывает процесс рудообразования. Например:

$$\text{если } KAl_2[AlSi_3O_{10}](OH)_2 + 2HF \rightarrow KAl_2[AlSi_3O_{10}]F_2 + 2H_2O,$$
$$\text{то } Sn(OH)_2F_{2(aq)} \rightarrow \underline{SnO_2} + 2HF;$$

$$\text{если } FeSiO_3 + 0{,}25\,SO_4^{2-} + 0{,}5\,H^+ + 1{,}75\,H_2S \rightarrow \underline{FeS_2} + SiO_2 + 2H_2O$$

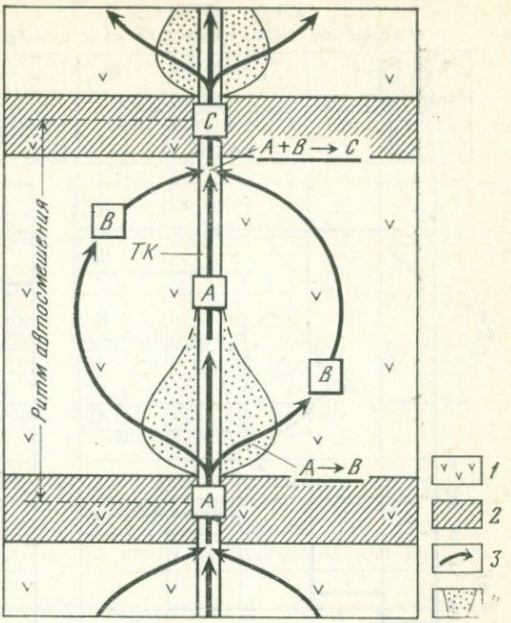
$$\text{то } 1{,}75\,Hg(HS)_{2(aq)} \rightarrow \underline{1{,}75\,HgS} + 1{,}75\,H_2S;$$

$$\text{если } 0{,}5\,Ca_2Mg_5[Si_4O_{11}]_2(OH)_2 + 2CO_2 \rightarrow CaMg(CO_3)_2 +$$
$$+ 0{,}5\,Mg_3[Si_4O_{10}](OH)_2 + 2SiO_2,$$
$$\text{то } UO_2(CO_3)_3^{2-} + 0{,}19\,S^{2-} + 2H^+ \rightarrow \underline{UO_{2,25}} + 2CO_2 +$$
$$+ 0{,}19\,SO_4^{2-} + H_2O.$$

Из реакций ясно, что для того чтобы сдвинуть равновесия вправо и осадить касситерит, киноварь или настуран, необходимо обеспечить связывание и вывод из сферы реакции образующихся одновременно с рудными минералами компонентов или элементов, которые служат лигандами в соединениях, являющихся формой их переноса. По реакциям для отложения касситерита необходимо связывание HF, киновари — H_2S, настурана — CO_2, которое, казалось бы, может быть обеспечено первыми реакциями. Однако нельзя забывать о соотношении масс компонентов гидротермального раствора. Так, при отложении касси-

терита действительно происходит связывание фтора в околожильных мусковитах, но для того чтобы это стало причиной рудоотложения, необходимо связать в 10^3 больше фтора, чем масса выпавшего в осадок олова, чего никогда не происходит. Их массы обычно либо сопоставимы, либо отличаются не более чем на порядок. Связывание фтора является не причиной, а следствием повышения pH гидротермального раствора и возрастания в этих условиях доли фтор-иона в растворе, и чем сильнее подщелачивание, тем больше откладывается касситерита и тем больше возрастает содержание фтор-иона. Именно на этом основан предложенный автором метод полуколичественного прогноза оловянного оруденения на глубину по содержанию фтора в околожильных кварц-серицитовых породах [4]. То же можно сказать и об остальных примерах, где разница в массах компонентов еще выше (10^5—10^6). Например, если образование кварц-кальцит-настурановой жилки мощностью 10 см с призальбандовыми зонками настурана мощностью 1 см объяснять связыванием углекислоты вмещающими породами, то мощность зон монокальцитовых пород в зальбандах должна достигать нескольких метров, чего, как известно, нет в природе. Таким образом, связывание вмещающими породами элементов или компонентов, являющихся лигандами в комплексных соединениях металлов при их миграции в гидротермальных растворах, также не может рассматриваться как ведущий фактор концентрированного отложения рудного вещества.

Наиболее эффективно действующим фактором рудоотложения оказывается изменение кислотности или щелочности гидротермальных растворов, а в некоторых случаях — изменение их окислительно-восстановительного потенциала. Еще в 70-е годы Д. С. Коржинский писал, что «изменение кислотности растворов ...несомненно является главной причиной эндогенного рудообразования» [16, с. 15], а Ч. Мейер и Д. Хемли отметили, что «наиболее существенные химические изменения гидротермальных растворов закономерно связаны с изменением кислотности-щелочности» [17, с. 152]. Действительно, есть очень четкая зависимость устойчивости комплексных соединений рудных элементов даже от небольших сдвигов pH и Eh растворов. Эти сдвиги могут вызываться разными причинами: взаимодействием растворов с вмещающими породами, особенно при встрече на пути их движения контрастных по составу пород (что обычно определяет литологический контроль оруденения), смешением гидротермальных растворов разного состава и происхождения или, на что теперь обращается особое внимание, растворов одного происхождения, но прошедших разные пути миграции и отличающихся в результате этого по составу. К этому явлению, рассмотренному в работах Викт. Л. Барсукова, Н. П. Лаверова и А. Пэка [7—9] и получившему название «автосмешение гидротерм», хотелось бы привлечь особое внимание. Суть его заключается в том, что движение гидротермального флюида в трещин-

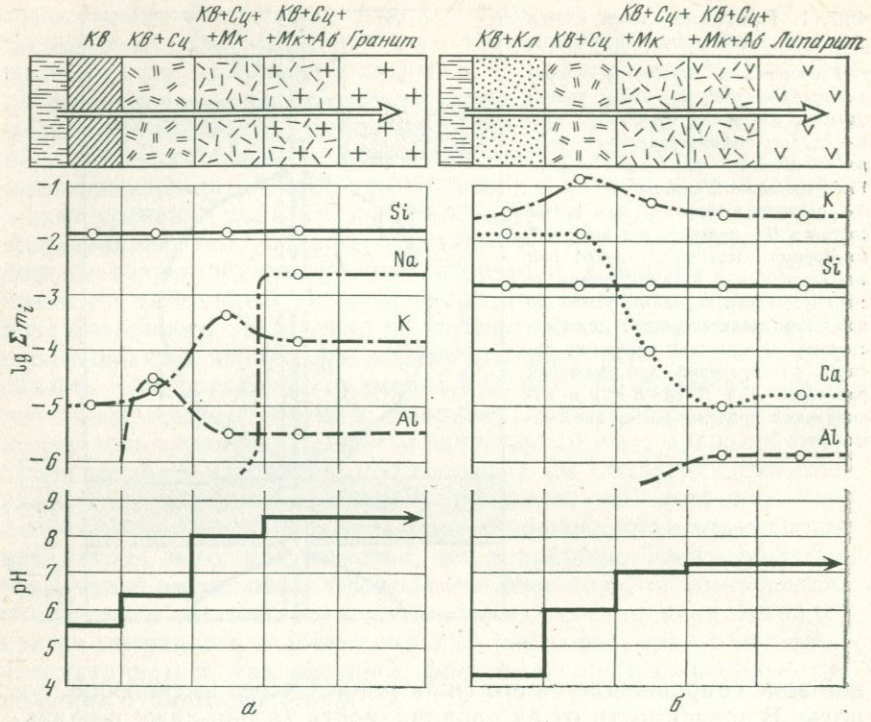


Фиг. 1. Принципиальная схема ритма автосмешения гидротерм

1—2 — вмещение породы: *1* — хорошо проницаемые, *2* — плохо проницаемые; *3* — линии тока гидротерм; *4* — ореолы инфильтрационного околотрещинного изменения пород; ТК — трещинный канал

A — раствор исходного для ритма состава; *B* — раствор, возникающий из порции раствора *A* (*A*→*B*) при инфильтрации и взаимодействии ее с вмешающими породами вплоть до получения равновесного с ними состояния; *C* — раствор конечного состава, возникающий при смешении растворов *A* и *B* (*A*+*B*→*C*) и покидающий пределы ритма автосмешения

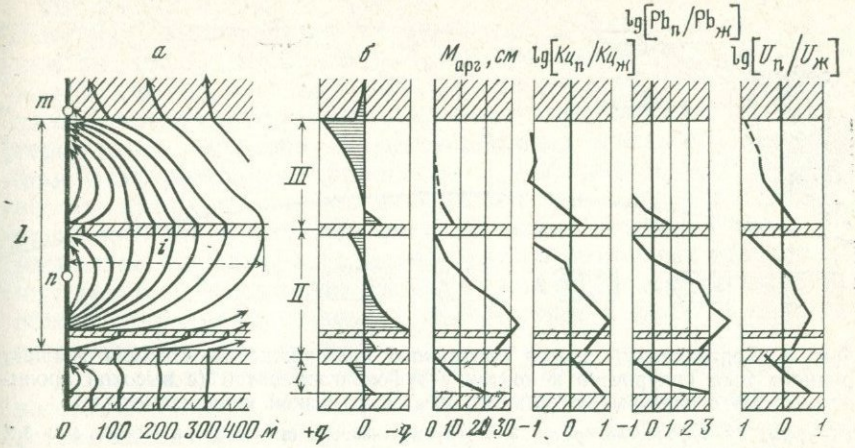
ной зоне сопровождается его фильтрацией через вмещающие породы. В зависимости от их проницаемости (а она даже в одинаковых по составу породах меняется на разных участках на 2—4 порядка) многократно происходит то растекание, то стягивание фильтрующегося через породы раствора к трещинной зоне (фиг. 1). При этом порция раствора, прошедшего через вмещающие породы, всегда ближе к равновесному состоянию с ними и будет существенно отличаться по химическому составу от флюида в трещинной зоне. При воздействии гидротермальных растворов на те или иные породы происходит значительное изменение не только химического состава пород, но при этом существенно изменяется и химический состав самих растворов. На фиг. 2 показаны результаты математического и экспериментального моделирования взаимодействия гидротермальных растворов с гранитом и липаритом [6, 13], в процессе этого взаимодействия раствор становится гораздо более щелочным по сравнению с раствором, движущимся по трещинной зоне. Следовательно, в участках стягивания раствора к трещинной зоне (например, под толщами малопроницаемых пород) в течение всего времени действия гидродинамической системы будет происходить «автосмешение» гидротермальных растворов, прошедших разные пути миграции, в результате неизбежно резко повысится щелочность гидротермального раствора в трещинах. А именно это и является обычно причиной концентрированного осаждения рудных элементов.



Фиг. 2. Изменение весовой концентрации ряда компонентов $\lg \Sigma m_i$ (моль$\times$ $\times 10^{-3}$) и pH в растворах, формирующих инфильтрационные колонки кислотного выщелачивания в граните и липарите при просачивании их от стенок трещинного канала до внешнего фронта. Построено по данным моделирования на ЭВМ процессов инфильтрационного метасоматоза при 300 (*а*) и 150° С (*б*)

Число ритмов растекания и стягивания к трещинной зоне фильтрующегося через вмещающие породы рудоносного гидротермального раствора, особенно в слоистых осадочно-вулканогенных толщах, может быть значительным. Это на первый взгляд чисто гидродинамическое явление имеет целый ряд следствий, знание которых необходимо для понимания причин возникновения на пути гидротермальных растворов так называемых геохимических барьеров, а следовательно, и определения места концентрированного рудоотложения.

На участках растекания потока проникающие во вмещающие породы растворы, будучи неравновесными с породами, энергично воздействуют на них с образованием мощных ореолов гидротермального изменения; при этом в результате быстрого подщелачивания образуются рудные и нерудные минералы, формируются вкрапленные руды. Там же, где встречаются и смешиваются прошедшие разные пути растворы, ореолы изменения пород, как правило, незначительны или практически отсутствуют, а все твердые продукты реакций подщелачивания трещинного потока



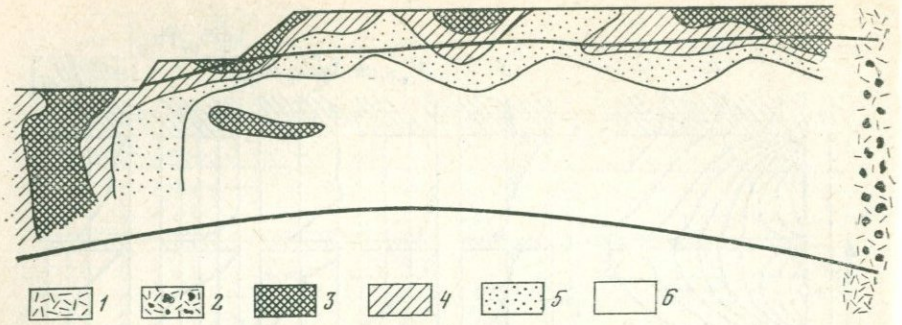
Фиг. 3. Ритмическое изменение по вертикали мощности ореолов околорудной аргиллизации ($M_{арг}$, см) и соотношений между количеством кальцита, галенита и настурана, отложившихся во вмещающих породах ($Кц_п$, $Pb_п$, $U_п$) и трещинных жилах ($Кц_ж$, $Pb_ж$, $U_ж$) на одном из месторождений уран-молибденовой формации

а — принципиальная структура восходящего потока растворов, формировавших месторождение; *б* — эпюр относительных масштабов растекания растворов из контролирующей поток трещинной зоны (—*q*) и возвращение их в эту зону из порового пространства пород (+*q*)

раствора осаждаются непосредственно в полостях зоны тектонического нарушения.

В качестве примера можно привести одно из уран-молибденовых месторождений. На фиг. 3 слева показана построенная методом электрогидродинамической аналогии (ЭГДА-метод) схема строения восходящего потока гидротерм, а правее — мощности околорудных ореолов аргиллизации липаритов и соотношение масс кальцита, галенита и настурана, отложившихся в жилах и вмещающих породах. Максимумы мощности аргиллизатов и развития во вмещающих породах вкрапленности кальцита, галенита и настурана совпадают с уровнями растекания восходящего потока гидротерм. Минимумы мощности аргиллизатов и максимумы концентрации кальцита, галенита и настурана в жильных трещинах строго отвечают уровням стягивания гидротермального потока, смешения его порций, идущих по трещинной зоне, с порциями, прореагировавшими с вмещающими породами.

Подобный же пример концентрированного рудоотложения на верхней границе ритма «автосмешения» можно привести и для оловянного месторождения, где нижняя граница рудного тела практически совпадает с экраном из перекрывающих разрез малопроницаемых пород (фиг. 4), где и происходит наиболее интенсивное смешение растворов, прошедших разные пути и оказавшихся разными по составу. Такое же распределение руд характерно и для многих Pb-Zn месторождений.



Фиг. 4. Вертикальный разрез оловянного месторождения. Нижняя граница рудного тела приурочена к контакту туфоконгломератов (с высокой проницаемостью) с перекрывающими их туфами (с низкой проницаемостью)

1 — туфы; *2* — туфоконгломераты; *3—6* — продуктивность (в мол.%): *3* — >3,5, *4*—2—3,5, *5*—1—2, *6*—<1

Все изложенное выше имеет прямое отношение к формированию и оценке первичных ореолов рассеяния рудных элементов. Область формирования первичных ореолов необходимо рассматривать не как область с разнонаправленной турбулентной фильтрацией рудообразующих растворов, а, исходя из законов гидродинамики и моделей структуры гидротермальных потоков, как область однонаправленного ритмично расширяющегося и сужающегося потока гидротерм вдоль контролирующих его тектонических нарушений. Концентрированное отложение рудного вещества в трещинных зонах будет всегда располагаться в зоне «автосмешения» и выше нее. У нижней же границы ритма «автосмешения» в зонах растекания растворов, по мере их подщелачивания, во вмещающих породах сначала будет формироваться рудная вкрапленность, а затем микровыделения рудных минералов — ореолы первичного рассеяния. Форма этих ореолов должна подчиняться структуре потоков раствора в породах, вмещающих рудоносные трещинные каналы.

При анализе и интерпретации обнаруженных литохимических аномалий мы должны учитывать эти особенности формирования первичных ореолов рассеяния. В работах Л. Н. Овчинникова и С. В. Григоряна [5, 19] охарактеризована закономерная смена металлов в вертикальном разрезе таких ореолов, которая, безусловно, справедлива; она сыграла большую роль в повышении эффективности геохимических методов поисков. Однако при изучении первичных ореолов чаще всего выявляется суммарный эффект распределения элементов, обусловленный наложением разновременных, а иногда и разных по своей природе процессов. В первичном ореоле распределение элементов может ритмично повторяться и изменяться по основному направлению движения растворов.

Очевидно, настала пора при исследованиях первичных ореолов рассеяния перейти от обобщений и генерализации к выяснению их тонкой структуры с учетом проницаемости пород, окружающих рудоконтролирующие трещинные зоны. При этом нельзя забывать, что изменение щелочности или кислотности гидротермальных растворов, оказывающееся во многих случаях ведущим фактором концентрированного рудоотложения, с неизбежностью приводит к изменению активности, а следовательно, и распределения в околожильных породах анионов и щелочных элементов. Изучение их распределения в первичных ореолах может привести к созданию надежных критериев для выявления в общем гидродинамическом потоке участков концентрированного отложения рудного вещества.

Если рудоотложение вызывается изменением окислительно-восстановительной обстановки, первостепенное значение приобретает знание механизма изменения Eh и его влияния на судьбу рудных элементов. Например, для благородных металлов (Au, Ag) в роли восстановителей и осадителей может выступать не только органическое вещество вмещающих пород, но и элементы переменной валентности (Mn, Cu, Fe), которые при определенном сочетании температуры и pH и состава растворов могут способствовать устойчивости комплексных соединений Au и Ag, а при изменении температуры и pH в случае низкого содержания в растворе органического вещества, сульфидной серы, частиц $H^0_{р\text{-}р}$, $CH^0_{4(р\text{-}р)}$ становятся восстановителями и осадителями этих элементов [14].

Об окислении органического вещества во время отложения сульфидов и благородных металлов свидетельствует изменение как элементного, так и группового состава рассеянных в минеральных ассоциациях битумоидов. Битумоиды из рудных ассоциаций по сравнению с битумоидами до- и послепродуктивной стадий отличаются бóльшим содержанием кислорода, меньшим содержанием углеводородов, исчезновением азота из состава органического вещества и появлением в растворах заметных количеств NH_4-иона.

В связи с тем, что органическое вещество является активным восстановителем благородных металлов в интервале pH, задаваемом буферной системой калиевый полевой шпат—слюда, в новообразованных гидрослюдах часть калия, видимо, должна замещаться NH_4-ионом. Поэтому обнаружение в гидрослюдах NH_4-иона может оказаться достаточно надежным критерием прошедшего на глубине интенсивного окисления органического вещества на уровне Eh, отвечающем восстановлению и осаждению золота. Окисление органического вещества при восстановлении золота сопровождается также большим выходом в раствор CO_2. При этом изотопный состав углерода углекислоты, образующейся при окислении органического вещества, отличается более низкими значениями $\delta^{13}C$ по сравнению с углекислотой другого происхождения [2].

Таким образом, изотопный состав углерода карбонатов продуктивной стадии может рассматриваться как второй геохимический критерий наличия на глубине золото-серебряного оруденения.

Известно, что люминесценция прозрачных минералов под действием ультрафиолетовых лучей с длиной волны 365 нм связана с присутствием в них рассеянного органического вещества, а цвет люминесценции определяется степенью конденсированности в молекуле ароматических ядер. Восстановление и осаждение цветных и благородных металлов сопровождается исчезновением из органического вещества ароматических соединений. Поэтому характер люминесценции прозрачных минералов (кварца, кальцита, адуляра и др.) является показателем степени окисленности органического вещества в гидротермальной системе и должен не только отличаться в минералах предрудной, рудной и пострудной стадий, но и меняться по мере удаления от рудной залежи. Проверка этого положения на золото-серебряных, свинцово-цинковых и ртутных месторождениях показала, что на периферии минерализованных зон (сотни метров от рудной залежи) прозрачные минералы обнаруживают желтовато-зеленое свечение, которое по мере приближения к рудным телам (десятки метров) сменяется бледно-голубым, а в непосредственной близости от них (первые метры) полностью исчезает. Очевидно, что это явление также может использоваться в поисковых целях.

Примеры, приведенные выше, достаточно наглядно подтверждают важнейшее значение для рудообразования изменения pH и Eh гидротермальных систем.

Из изложенного следует, что роль «геохимических барьеров», определяющих концентрированное рудоотложение, могут играть различные геологические ситуации в их сложном сочетании. Задача сейчас состоит в том, чтобы, используя методы системного анализа, экспериментального и математического моделирования, создать модели рудоотложения прежде всего для важнейших типов рудных месторождений; такие модели в их совокупности будут служить прочной основой теории рудообразования и могут быть использованы в прикладных целях. Поиск критериев, характеризующих действие определяющих факторов рудоотложения, представляет главное направление дальнейшего совершенствования существующих и создания новых геохимических методов поисков и оценки месторождений полезных ископаемых.

2. **Геохимия глубинных зон Земли.** Геологические процессы в глубинных зонах земной коры и в верхней мантии Земли в последнее время привлекают к себе все более пристальное внимание. Проблема изучения геохимии глубинных зон Земли заключается не только в накоплении новых фактических и экспериментальных данных, но и в попытке выявить сопряженность протекающих в глубинных зонах процессов, что позволит подойти к пониманию условий образования магматических пород, их закономерных ассоциаций, последовательности формирования, гео-

логической позиции и первичной рудоносности. Для решения этих задач необходимо усиление детального геохимического анализа условий и особенностей формирования комплексов магматических пород в разных геологоструктурных зонах земной коры, изучение баланса вещества при фазовых переходах в зонах ультраметаморфизма, нодулей в базальтах и кимберлитах, горизонтальной и вертикальной неоднородности состава мантии Земли. Вероятно, большего внимания требует и проблема первичного состава мантии с рассмотрением ее различных моделей, определяемых разным соотношением обыкновенных и углистых хондритов, роль которых в первичном составе планеты явно недооценивается. Все это должно сочетаться с дальнейшим развитием экспериментальных исследований фазовых диаграмм состояния, ликвационных явлений, вторичного плавления реститов и дифференциатов с особым упором на выяснение роли летучих компонентов в магматических процессах.

Раньше, еще по работам Н. Л. Боуэна, мы знали о существовании плагиоклазового эффекта, определяющего дифференциацию базальтов. Теперь мы знаем, что в соответствующих условиях определяющим при дифференциации базальтоидов становится пироксеновый эффект. В первом случае коэффициент распределения таких рудных элементов, как Sr и TR, в равновесии кристалл—расплав настолько высок, что в процессе дифференциации расплава происходит их преимущественное связывание плагиоклазом и соответственно обеднение ими конечных дифференциатов. Во втором же случае, когда первым начинает кристаллизоваться не плагиоклаз, а мелилит, наоборот, коэффициенты распределения многих редких элементов в системе кристалл—расплав очень низки, что обусловливает существенное накопление в конечных дифференциатах Nb, Zr, TR, Ti, Sr и определяет повышенную рудоносность пород ультраосновной—щелочной формации. Это лишний раз подчеркивает необходимость усиления экспериментальных исследований по изучению коэффициентов распределения рудных элементов для равновесий расплав—кристалл—флюид.

Несмотря на обычно «сухой» характер мантийных магм, их кристаллизация в условиях более высоких потенциалов воды может привести к заметному подкислению более поздних продуктов дифференциации. Эволюция магматических серий при высоких активностях CO_2, F, Cl, P_2O_5 вызывает обратный эффект и приводит к заметному подщелачиванию остаточных расплавов вплоть до перехода плагиоклазового температурного барьера, разделяющего несовместимые минеральные ассоциации с нефелином и кварцем. Благодаря этому возникают пересыщенные щелочами агпаитовые магмы, концентрирующие редкие и рассеянные элементы [15].

В настоящее время вновь встал вопрос о наличии в мантии Земли заметных количеств свободного углерода. На устойчивость элементарного углерода в мантийных условиях указывало

наличие алмазов в наиболее глубинных кимберлитовых магмах. Новые экспериментальные возможности изучения «внутренней» активности кислорода мантийных минералов с помощью электрохимических ячеек на основе твердых электролитов позволили показать, что это не какое-то редко возникающее в специфических условиях явление, а закономерность, характерная для всей мантии Земли [35]. Определение «внутренней» фугитивности кислорода оливиновых фенокристов из базальтов, гранатов и оливинов в нодулях ультраосновных пород указывает на гораздо более низкую фугитивность в них кислорода, чем в лавовых излияниях на поверхности Земли. Она оказалась близкой к фугитивности, характеризующей буфер железо—вюстит, и попадает в область устойчивости свободного углерода. Появились также экспериментальные данные о растворимости углерода при плавлении в окислах и силикатных соединениях (MgO, CaO, FeO, форстерит), в которых атомарный углерод занимает вакансии катионов. Обнаружено наличие субмикроскопических выделений графита в ряде минералов мантийных пород. Все это может привести к существенному уточнению наших представлений об окислительно-восстановительной обстановке при выплавлении в мантии базальтоидных магм и их подъеме к поверхности Земли, причинах различной водонасыщенности таких магм и разницы в составе флюидной фазы. Действительно, если частичное плавление мантии буферируется системой с графитом, то это должно приводить к образованию базальтов с низким отношением Fe^{3+}/Fe^{2+}. Кроме того, реакция углерода с растворенной в магме водой должна вплоть до исчерпания запасов углерода приводить к разложению воды, обезвоживанию расплава и накоплению в ее флюидной фазе CO_2, а, как известно, соотношением H_2O/CO_2 и определяется глубина начала дегазации расплава [14]. Ускоренная же диссипация выделяющегося при этом водорода будет способствовать постепенному окислению расплава. Здесь открываются новые подходы к решению и таких крупных проблем, как возможная латеральная неоднородность мантии, степень ее «отработанности» под континентальными и океаническими сегментами Земли, «андезитовая проблема», закономерная эволюция во времени островодужного магматизма и т. д.

Тесно связаны с изучением геохимии глубинных зон Земли и быстро развивающиеся исследования по петрохимии и геохимии коренных пород дна Мирового океана. Мы теперь знаем, что в его фундаменте залегают не только примитивные толеитовые базальты, но и базальтоиды с андезитовым и субщелочным трендом, анортозиты и разнообразные метаморфические породы. Более того, новейшие данные, основанные на статистическом анализе составов базальтовых стекол, показали, что даже среди примитивных толеитовых базальтов выделяются две группы пород, отвечающих разной глубине выплавления (соответствующих давлениям 5 и 10 кбар) [11, 12]. Усматривается и определенная пространственная закономерность в размещении по дну

океана базальтоидов разных групп. В рифтовых зонах встречаются наиболее малоглубинные толеиты, а в окружающих акваториях — более глубинные, с андезитовым и субщелочным трендом по периферии. На вулканических островах независимо от их местоположения широко проявился щелочной магматизм. Общеизвестны своеобразие и еще более сложный характер магматизма на островных дугах.

Из расчетных данных можно заключить, что обе группы толеитовых базальтов (как рифтовых зон, так и акваторий Мирового океана) могут быть выплавлены только из лерцолитов, без участия пироксенов. Видимо, не случайно нодули пироксенитов отсутствуют в толеитовых базальтах рифтовых зон и акваторий океанов, а встречаются только в базальтоидах вулканических островов и островных дуг. Не говорит ли это о вторичном (реститовом), а не первичном характере пироксенитов мантии Земли, их образовании в ходе магматической дифференциации базальтоидов, управляемой пироксенитовым эффектом?

В последнее время много внимания уделяется изучению геологической истории окраинных морей. Исследования, проведенные в Филиппинском море, показали, что формирование его геологических структур, в том числе и островных дуг, происходит в условиях растяжения земной коры, а не сжатия, как это представлялось ранее [21].

Строгие количественные закономерности свидетельствуют о гораздо более сложной геологической истории дна Мирового океана, чем это часто рисуется ортодоксальными сторонниками «новой глобальной тектоники», с проявлением разноглубинного и разновременного магматизма, наличием на дне океана опущенных плато субконтинентальной коры, широким развитием метаморфических пород и т. д.

Говоря о Мировом океане, нельзя не упомянуть, что воды его в самом ближайшем будущем могут стать неисчерпаемым источником получения многих металлов. В настоящее время усиленно развиваются исследования по созданию экономически выгодных методов извлечения металлов из морской воды с помощью ионообменных смол и избирательных сорбентов. По целому ряду металлов в лабораторных условиях уже достигнуто концентрирование в 10^6 раз с получением практически технологических растворов.

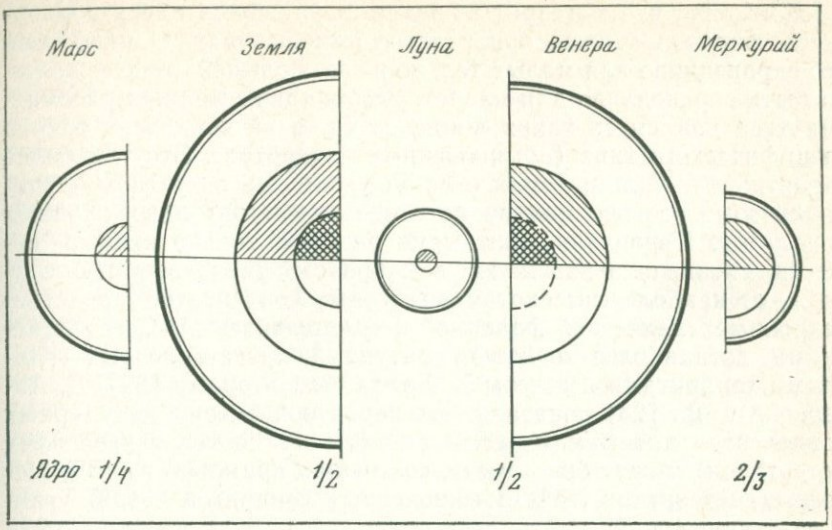
3. **Космохимия.** Не так давно, благодаря развитию космических исследований, мы получили первые сведения о составе атмосферы и поверхностных пород Венеры и Марса; оказалась реальной возможность непосредственного изучения образцов горных пород с поверхности Луны. Планеты и другие тела Солнечной системы из объектов астрономии довольно быстро превращаются в объекты исследований геологов и геохимиков. До начала космической эры космохимия как часть геохимии базировалась на изучении метеоритов и астрофизических данных. Исследование метеоритного вещества в наше время не только не

утратило своего значения, но, поднявшись на современный уровень прецизионного геохимического изучения, стало играть еще большую роль.

Очень важны полученные в последнее время данные об изотопных аномалиях в метеоритах, прежде всего в углистых хондритах. В них обнаружено необычное соотношение изотопов кислорода с избытком ^{16}O, аномально высокое содержание ^{26}Mg (очевидно, за счет распада ^{26}Al), доказано присутствие в веществе Солнечной системы изотопов ^{129}I и ^{244}Pu, придающих аномальный характер спектру изотопов Xe. Эти короткоживущие изотопы могли сыграть роль весьма эффективных источников тепла на ранней стадии развития Солнечной системы при плавлении и дифференциации вещества планетных тел даже астероидных размеров. Принципиальное значение имеет также открытие изотопных аномалий Te, Ba, Sm, Nd, Si, Ca и т. д. [24, 27, 28, 31—34], которые свидетельствуют о том, что в веществе Солнечной системы присутствует более чем одна генерация химических элементов, а образовавшиеся при взрыве сверхновой изотопы легких элементов смешались с остатками рассеянного в Космосе более древнего звездного вещества. Разница в характере изотопных аномалий в различных минеральных фазах метеоритов, присутствие в них элементов, изотопный состав которых отвечает разным процессам нуклеогенеза, означают, что к началу образования планетной системы вещество Солнечной туманности не было полностью гомогенизировано. Сегодня уже нет сомнений, что многие вариации изотопного состава химических элементов тел Солнечной системы обусловлены изотопной гетерогенностью небулы, являющейся следствием химической и минеральной гетерогенности протопланетного облака.

Последовательность образования минеральных фаз при небулярной конденсации анализировалась многими исследователями [25, 30, 29], но созданные модели уже не могут нас удовлетворить, так как рассматривают лишь изобарические или адиабатические сечения систем конденсации без учета изменения состава и термодинамических параметров небулы во времени и пространстве. И хотя намечаемая ими последовательность конденсации минеральных фаз, вероятно, в основном сохранится, изменится соотношение фаз на разном расстоянии от Солнца, а возможно, и последовательность конденсации самых ранних фаз.

Работы последних лет показали, что классическая модель конденсации, исходящая из принятого для небулы соотношения $C/O=0{,}6$, в принципе не может объяснить происхождения энстатитовых метеоритов. Дело в том, что в энстатитовых метеоритах обнаружены такие не встречающиеся на Земле минералы, как оксинитрид кремния — синоит (Si_2N_2O), нитрид титана — осборнит (TiN), сульфиды кальция и магния — ольдгамит (CaS) и найниджерит (MgS), сульфид железа и хрома — добреелит ($FeCr_2S_4$) и т. д. Термодинамический анализ однозначно показывает, что для образования этих минералов необходимы силь-



Фиг. 5. Схема внутреннего строения планет Земной группы

но восстановительные условия, которые обеспечиваются только в том случае, если содержание углерода в первичном облаке будет больше, чем содержание в нем кислорода, т. е. если отношение C/O в небуле равно или больше единицы.

Как известно, фундаментальной особенностью строения всех планет Земной группы является их расслоенность на оболочки (фиг. 5). В центре всех планет расположено плотное ядро, затем следует нижняя мантия, составляющая основную массу планеты. Выше переходного слоя расположена верхняя мантия, на которой залегает продуцированная ею кора, окруженная на больших планетах газовой и жидкой оболочками. Как же представлялся и представляется сейчас процесс разделения вещества планет на ядро, мантию и кору? Раньше обычно исходили из первоначального гомогенного строения холодных планетных тел, отвечающих по составу обыкновенным хондритам. Считалось, что с накоплением радиогенного тепла происходило плавление хондритового материала, при котором Fe-Ni фаза стекала к центру планеты, образуя ядро, а легкая полевошпатовая фаза поднималась вверх, формируя кору. Дегазация расплавленного хондритового материала при этом обеспечивала образование атмосферы и гидросферы. Новые данные о закономерном изменении плотности планет Земной группы с удалением от Солнца, различие в плотности таких близких по размеру тел, как Луна и Меркурий, и четкое деление метеоритов и астероидов на группы по составу указывают на то, что глубокая дифференциация протопланетного вещества происходила еще до формирования планетных тел.

Доказано, что метеориты представляют собой смесь конденсатов, образовавшихся при разных температурах. Однако если это справедливо для малых тел, то в еще большей степени должно быть справедливо для планет. Земля также должна рассматриваться как смесь таких конденсатов, а не конденсат одного специфического типа (обыкновенных хондритов). Это тем более вероятно, что состав Земли с Fe-Ni ядром при расчетном — «пиролитовом» составе мантии не отвечает составу обыкновенных хондритов. Первичная мантия могла быть только смесью веществ, сконденсировавшихся в широком диапазоне температур,— от наиболее высокотемпературных конденсатов, представленных металлической фракцией и тугоплавкими Al-Ca соединениями, до наиболее низкотемпературных, представленных углистыми хондритами. Расчеты Х. Холла с соавторами [29], Д. Андерсона и др. [23] показали, что вероятной смесью небулярных конденсатов для Земли (если исходить из составов известных метеоритов) может быть смесь, состоящая примерно из 15% железных метеоритов, 45% обыкновенных хондритов и 40% углистых хондритов.

Несмотря на наличие ряда нерешенных вопросов, в сознание все более входит необходимость признания гетерогенной аккреции, в результате которой состав ядер планет и их мантии является исходно различным, зависящим от догеологического этапа их развития. Например, никакого запаса железа в мантии Меркурия не хватит, чтобы выплавить ядро, составляющее $^2/_3$ его массы. Как было показано А. П. Виноградовым [10], ядро Земли из-за нехватки металлов также не может быть выплавлено из ее мантии, а содержание в ней сидерофильных элементов намного превосходит остаточные равновесные концентрации (с учетом Fe-Ni фазы). Однако и состав материала, формирующего мантию, также должен был меняться в процессе ее аккреции. На ранних стадиях формирования мантии ведущая роль в составе аккумулирующего материала, вероятно, в основном принадлежала Fe-Ni частицам и высокотемпературным Al-Ca конденсатам. В главную стадию формирования мантии ведущую роль, вероятно, играли Mg-Fe силикаты, в совокупности близко отвечающие по составу обыкновенным хондритам. На заключительных стадиях аккреции на больших планетах (Земля, Венера, частично Марс) при формировании верхней мантии ведущую роль, по-видимому, играло наименее плотное вещество, представляющее собой наиболее низкотемпературные небулярные конденсаты, т. е. материал типа углистых хондритов, которые по сравнению с другими метеоритами резко обогащены летучими компонентами, в том числе и сложными углеводородами типа парафинов нефтей и протобиологическими органическими соединениями типа цитозина (одного из четырех «кирпичиков» ДНК).

Дегазация вещества мантии и прежде всего вещества типа углистых хондритов, по-видимому, послужила причиной образования на заключительных стадиях аккреции больших планет ат-

мосферы и гидросферы. Вряд ли может быть случайностью совпадение изотопного состава H, N, C и многих благородных газов, а также соотношения летучих элементов в земной коре с таковыми в углистых хондритах при их резком отличии от метеоритов других типов. Создается представление, что последовательность смены состава материала при аккумуляции планет в основном отвечала температурной последовательности небулярной конденсации фаз. Соотношение же высоко- и низкотемпературных фаз небулярной конденсации, участвующих в формировании планет, закономерно уменьшалось с удалением от Солнца. Необходима дальнейшая интенсификация изучения метеоритов и другого внеземного вещества с одновременной разработкой новых моделей конденсации первичного облака на разном расстоянии от Солнца и прежде всего в зонах формирования планет Земной группы на основе более достоверных исходных параметров. Без этого нам будет трудно понять и объяснить различия в плотности и химическом составе планет Земной группы, в их внутреннем строении, а также отличия в характере и продолжительности на них эндогенных процессов.

Обращаясь к началу геологической истории нашей планеты, мы видим уже в основном сформировавшуюся Землю с геологическими процессами, принципиально не отличающимися от современных. Это значит, что наиболее важные особенности строения и состава оболочек Земли были заложены в до- и раннегеологический периоды, а вся фанерозойская история — это лишь их дальнейшее развитие. Чем дальше мы уходим в глубь геологической истории Земли, тем отрывочней и фрагментарней становятся наши знания. Ведь фанерозой, изученный нами несравненно детальнее докембрия, охватывает всего 0,6 млрд. из 4,6 млрд. лет жизни Земли, а о первом миллиарде лет ее жизни мы практически ничего не знаем. На Луне эндогенная жизнь завершилась около 3 млрд. лет назад, и там как бы «законсервирована» 1,5—2,0 миллиардная ранняя история планетного тела земного типа, не затушеванная наложением последующих эндо- и экзогенных процессов. Мы уже немало знаем о Луне — знаем возраст материковых и некоторых морских пород, минеральный, химический и изотопный состав элементов, и все же в руках исследователей находятся образцы всего из девяти точек видимой поверхности Луны. Да и среди базальтов видимой стороны Луны на Земле пока изучают лишь шесть типов из 14, выделенных по спектрометрическим характеристикам. Получение новых данных о составе пород лунной поверхности остается одной из важнейших задач наших космохимических исследований.

На Венере, как и на Земле, эндогенная жизнь, видимо, продолжается до настоящего времени. По размерам, плотности и внутреннему строению эта планета очень близка к Земле. На поверхности Венеры как и на Луне, большие площади заняты древней, сильно кратерированной материковой корой, депрессии поверхности перекрыты базальтами, кроме того, мы видим, как

и на Земле, большие высокогорные плато (высотой до 10 км) размером с Африку и Австралию, горные хребты, разломы, цепи молодых вулканов, в отдельных частях которых возможен современный вулканизм. Геологическая история Венеры и Земли близка, но поверхность Венеры никогда не была закрыта океаном и первичные формации пород не перекрыты осадочными образованиями. Поэтому изучение состава пород, слагающих основные морфологические и структурные типы поверхности Венеры, ее внутреннего строения, состава и эволюции атмосферы еще долго будет оставаться важной задачей космохимических исследований.

Марс по своей геологической истории и внутреннему строению занимает промежуточное положение между Луной и Венерой и является важнейшим репером для увязки догеологических и геологических этапов развития планет Земной группы. С орбитальных станций видны большие площади, занятые древней кратерированной материковой корой и перекрывающие ее базальтовые «моря» в депрессиях поверхности, рифтовые структуры и бывшие «речные» долины, крупнейшие вулканы центрального типа (высота до 27 км, диаметр кальдер 70 км). Поверхность Марса покрыта маломощной, но удивительно однообразной по составу корой выветривания, но мы еще практически ничего не знаем о составе и возрасте его коренных пород, о его внутреннем строении.

Накопленные материалы сравнительно-планетологических исследований свидетельствуют о том, что ранние стадии развития всех планетных тел земного типа были близки. А это значит, что геологическая история Луны, Марса и особенно Венеры может и должна использоваться для построения моделей ранней истории Земли. Получение новой информации о космических телах не только имеет огромное общенаучное значение, но и является действенным средством расшифровки страниц ранней истории Земли.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Банникова Л. А., Галимов Э. М.* О характере первичного вещества, сформировавшего верхние оболочки Земли.— В кн.: VII Всесоюз. совещ. по стабильным изотопам в геохимии: Тез. докл. М., 1978, с. 18.
2. *Банникова Л. А., Барсуков В. Л., Галимов Э. М., Козеренко С. В.* Изотопный состав гидротермальных карбонатов как индикатор условий рудоотложения.— Докл. АН СССР, 1980, **250**, № 1, с. 193—196.
3. *Баранова Н. Н., Рыженко Б. Н.* Моделирование на ЭВМ системы Au—Cl—S—Na—H_2O в связи с условиями переноса и отложения золота в гидротермальном процессе.— Геохимия, 1981, № 7, с. 989—1001.
4. *Барсуков В. Л., Волосов А. Г.* Геохимический метод прогноза оруденения на глубину и обнаружение слепых рудных тел на сульфидно-касситеритовых месторождениях.— Геохимия, 1967, № 11, с. 1370—1380.
5. *Барсуков В. Л., Григорян С. В., Овчинников Л. Н.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Наука, 1981. 319 с.
6. *Барсуков Викт. Л., Борисов М. В.* Моделирование массообмена при автосмешении гидротермальных растворов.— В кн.: 1-е Всесоюз. совещание: Физико-химическое моделирование в геохимии и петрологии: Тез. докл. Иркутск, 1980, с. 35—38.

7. *Барсуков Викт. Л., Пэк А. А.* Гидродинамические аспекты рудообразования и околорудного изменения пород.— В кн.: Геохимия. Минералогия: (Междунар. геол. конгр. XXVI сес. Докл. сов. геологов). М.: Наука, 1980, с. 53—60.
8. *Барсуков Викт. Л., Пэк А. А.* Роль автосмешения растворов в формировании гидротермальных жильных месторождений.— Геохимия, 1980, № 12, с. 1780—1796.
9. *Барсуков Викт. Л., Лаверов Н. П., Пэк А. А.* Структура потока рудообразующих растворов как один из факторов зональности гидротермальных месторождений.— В кн.: Геохронология и проблемы рудообразования. М.: Наука, 1977, с. 132—144.
10. *Виноградов А. П.* Происхождение металлических ядер планет.— Геохимия, 1975, № 10, с. 1427—1431.
11. *Дмитриев Л. В., Соболев А. В., Сущевская Н. М.* Условия формирования первичного расплава океанских толеитов и вариации его состава.— В кн.: Магматические и метаморфические комплексы в структурах Тихоокеанского кольца: (14-й Тихоокеанский науч. конгр. Секция В-IV. Тез. докл.). М.: Наука, 1979, с. 72—73.
12. *Дмитриев Л. В., Соболев А. В., Сущевская Н. М.* Толеиты Атлантики: Петрология и геохимия.— В кн.: Геохимия. Минералогия: (Междунар. геол. конгр. XXVI сес. Докл. сов. геологов). М.: Наука, 1980, с. 32—53.
13. *Иванов И. П., Борисов М. В.* Оценка состава исходного раствора при метасоматическом замещении пород.— Геохимия, 1980, № 12, с. 1797—1806.
14. *Кадик А. А., Эглер Д. Х.* Режим воды и углекислоты при образовании и дегазации кислых магм.— Геохимия, 1976, № 8, с. 1167—1175.
15. *Когарко Л. Н.* Проблемы генезиса агпаитовых магм. М.: Наука, 1977. 267 с.
16. *Коржинский Д. С.* Общие закономерности постмагматических процессов.— В кн.: Метасоматические изменения боковых пород и их роль в рудообразовании. М.: Недра, 1966, с. 7—15.
17. *Мейер Ч., Хемли Д.* Околорудные изменения вмещающих пород.— В кн.: Геохимия гидротермальных рудных месторождений. М.: Мир, 1970, с. 148—210.
18. *Наумов В. Б., Наумов Г. Б.* Минералообразующие флюиды и физико-химические закономерности их эволюции.— Геохимия, 1980, № 10, с. 1450—1460.
19. *Овчинников Л. Н., Григорян С. В.* Закономерности состава и строения первичных геохимических ореолов сульфидных месторождений.— В кн.: Научные основы геохимических методов поисков глубокозалегающих месторождений. Иркутск: ИГГ СО АН СССР, 1970, с. 3—36.
20. *Ходаковский И. Л., Попова М. Я., Озерова Н. А.* О формах переноса ртути в гидротермальных растворах.— В кн.: Геохимия процессов миграции рудных элементов. М.: Наука, 1977, с. 86—91.
21. *Шараськин А. Я., Закариадзе Г. С., Дмитриев Ю. И.* и др. Петрология вулканических пород.— В кн.: Геология дна Филиппинского моря/Под ред. А. В. Пейве. М.: Наука, 1980, с. 106—148.
22. *Шергина Ю. П., Шкобошов С. С.* К вопросу о последовательности формирования интрузий ультраосновных и основных пород Кольского полуострова.— Геохимия, 1970, № 2, с. 211—216.
23. *Anderson D. L., Sammis C., Jordan T.* Composition of the mantle and the core.— In: Nature of the solid earth/Ed. E. C. Robertson N. Y.: McGraw-Hill Book Co, 1972, p. 41—66.
24. *Ballad R. V., Oliver L. L., Dowing R. G., Manuel O. K.* Isotopes of tellurium, xenon and krypton in Allende retain record of nucleosynthesis.— Nature, 1979, **277**, N 5648, p. 615—620.
25. *Cameron A. G. W.* Accumulation processes in the primitive Solar Nebula.— Icarus, 1973, **18**, N 3, p. 407—451.
26. *Clayton R. N., Grossman L., Mayeda T. K.* A component of primitive nuclear composition in carbonaceous meteorites.— Science, 1973, **182**, p. 485—488.

27. *Clayton R. N., Mayeda T. K., Epstain S.* Isotopic fractionation of Si in Allende inclusions.— In: Proc. 9th Lunar Sci. Conf. Houston, 1978, p. 1267—1278.
28. *Grossman L.* Condensation in the primitive Solar Nebula.— Geochim. et cosmochim. acta, 1972, **36**, p. 597—619.
29. *Hall H. T., Murthy V.* Rama. The early chemical history of the earth: some critical elemental fractionations.— Earth and Planet. Sci. Lett., 1971, **11**, N 3, p. 238—244.
30. *Larimer J. W.* The chemical fractionations in meteorites. 1. Condensation of the elements.— Geochim. et cosmochim. acta, 1967, **31**, N 8, p. 1215—1238.
31. *Lee T., Papanastassion D. A.* Mg-isotopic anomalies in the Allende meteorite and correlation with O_2 and Sr effects.— Geophys. Res. Lett., 1974, **1**, p. 225—228.
32. *McCulloch M. T., Wasserburg G. J.* Ba and N isotopic anomalies in the Allende meteorite.— Astrophys. J., 1978, **220**, p. 15—19.
33. *McCulloch M. T., Wasserburg G. J.* More anomalies from the Allende meteorite: samarium.— Geophys. Res. Lett., 1978, **5**, p. 599—602.
34. *Russel W. A., Papanastassion D. A., Tombrello T. A.* Ca-isotope fractionation on the Earth and other solar system materilas.— Geochim. et cosmochim. acta, 1978, **42**, N 28, p. 1075—1090.
35. *Sato M.* Oxygen fugacity of basaltic magmas and the role of gas-forming elements.— Geophys. Res. Lett., 1978, **5**, N 6, p. 447—449.

УДК 550.4

А. И. ПЕРЕЛЬМАН

ПУТИ РАЗВИТИЯ ГЕОХИМИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В январе 1941 г. на торжественном заседании Московского общества испытателей природы (МОИП), посвященном 135-летию Общества, его вице-президент академик А. Е. Ферсман сделал доклад «Химия Земли на новых путях». К важнейшим проблемам геохимии он отнес распространенность элементов на Земле и в Космосе (кларки), миграцию химических элементов — законы их рассеяния и концентрации, в том числе законы образования месторождений полезных ископаемых, энергетику геохимических процессов, радиогеологию и геохимию изотопов, биогеохимию, геохимическую деятельность человечества, региональную геохимию, эволюцию миграции химических элементов в ходе геологической истории Земли, прикладную геохимию [34].

Со времени этого доклада прошло более 40 лет. Началось практическое использование атомной энергии, освоение космоса, появились ЭВМ и сделала резкий скачок математизация естествознания, возникли кибернетика, теория информации и системный анализ, изменившие саму методологию наук о природе, по-новому стали звучать такие проблемы, как человек и окружающая его среда. Как все это отразилось на путях развития геохимии, какие изменения произошли в понимании предмета науки, ее задач, методов, практических приложений? Как

оправдались прогнозы А. Е. Ферсмана? Вот вопросы, на которые мы постараемся ответить в этой статье.

Предмет геохимии. Понятие «геохимия», как известно, было предложено швейцарским химиком Ф. Шенбейном (1799—1868) в 1838 г. для обозначения науки о химических процессах в земной коре. Так этот термин использовался в течение всего XIX столетия. Однако химические процессы в земной коре изучают также минералогия, петрография, литология, вулканология, океанология и другие науки о Земле, в связи с чем еще одна наука, объединяющая реально существующие отрасли знания, оказалась излишней. Все же предложенное Ф. Шенбейном название «геохимия» не исчезло, оно было использовано для обозначения новой, созданной В. И. Вернадским науки, изучающей геологические процессы на атомарном уровне. По В. И. Вернадскому [4], геохимия — это история химических элементов нашей планеты. Так в начале 30-х годов понимал предмет геохимии и А. Е. Ферсман [32]. В дальнейшем он раздвинул ее границы, отметив, что геохимия изучает атом в условиях Земли и мироздания в целом [35]. Это предвидение А. Е. Ферсмана начинает сбываться в наши дни. Успехи космонавтики сделали реальной прямую информацию о породах Луны, атмосфере Венеры и Марса и т. д. Исследованием этих вопросов занялись геохимики, в связи с чем стали употребляться словосочетания «геохимия Луны», «геохимия Марса», «космическая геохимия». Все это позволяет в настоящее время дать следующее определение предмета науки: геохимия изучает историю атомов Земли и других планет Солнечной системы.

Распространенность элементов (проблема кларков). Эта проблема благодаря трудам Ф. У. Кларка (1847—1931) стала разрабатываться еще в конце XIX столетия, т. е. до оформления геохимии в самостоятельную отрасль знания. Определением кларков, помимо Ф. У. Кларка и его помощника Г. Вашингтона, занимались также все крупные геохимики первой половины XX столетия: в нашей стране — В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман, П. Н. Чирвинский, А. П. Виноградов, за рубежом — И. Фохт, В. М. Гольдшмидт, И. и В. Ноддаки, Г. Хевеши [6, 7, 10, 32, 38, 39]. Проблема кларков энергично разрабатывается и в наши дни, когда для определения содержания химических элементов в различных природных телах стали широко использоваться новейшие высокочувствительные и производительные методы, например нейтронно-активационный анализ. Все это позволило установить кларки большинства элементов Периодической системы, в том числе таких редких, как золото ($1{,}7 \cdot 10^{-7}\%$), рений ($7 \cdot 10^{-8}\%$), иридий ($2 \cdot 10^{-8}\%$). Весьма точно определены кларки кислых, основных и ультраосновных изверженных пород, кларки глин и сланцев, карбонатных пород, песчаников, бокситов, океана. Менее ясен вопрос о кларках земной коры в целом, так как неизвестно соотношение в ней различных типов пород. Актуальной задачей является определение кларков некоторых

сверхредких элементов (Ru, Rh, Os, Pt, Po, Ra, Ac, Pa), для которых даже нет подсчетов по отдельным породам. Наконец, необходимо уточнить величины уже установленных кларков.

Время скептического отношения к «числам Кларка» давно прошло, ныне они действительно стали константами мира и широко используются не только в теоретической, но и в прикладной геохимии, а также в науке о рудных месторождениях и других науках о Земле. Изучение кларков по-прежнему представляет одну из главных проблем геохимии.

Миграция химических элементов. Миграция атомов — главная проблема геохимии, которая рассматривает этот процесс как единство концентрации и рассеяния. С концентрацией связано образование месторождений полезных ископаемых, с рассеянием — образование вторичных ореолов вокруг рудных тел, техногенное загрязнение окружающей среды и другие явления. Для общей теории миграции фундаментальное значение имеют: так называемый основной геохимический закон В. М. Гольдшмидта, разделение А. Е. Ферсманом факторов миграции на внутренние (свойства атома — радиус иона и т. д.) и внешние (свойства среды миграции — температура, давление и др.), понятие о видах миграции [32]. В. И. Вернадский разработал учение о биогенной миграции. А. Е. Ферсман сформулировал понятие о механической (механогенез) и техногенной (техногенез) миграции, но наибольшее внимание его, как и В. М. Гольдшмидта, привлекала миграция в растворах, расплавах и газовой фазе, подчиняющаяся законам физической химии. В итоге были выделены четыре основных вида миграции: механическая, физико-химическая, биогенная и техногенная [19].

Фундаментальное значение для изучения миграции имеет понятие о парагенезисе элементов, сформулированное В. И. Вернадским в 1909 г. [6]. Установление парагенных ассоциаций элементов, характерных для различных систем земной коры, особенно для пород, руд и минералов, стало одной из главных задач геохимии.

Важное значение в общем учении о миграции элементов приобрели понятия о зонах выщелачивания и геохимических барьерах [19]. Первые характерны как для гипергенных, так и для гидротермальных систем: они развиты в зонах разломов, водоносных горизонтах артезианских бассейнов, корах выветривания, почвах и других системах земной коры. Несмотря на различие геологических условий формирования, геохимическая сущность зон выщелачивания нередко одинакова. Хорошо изучены зоны кислотного выщелачивания в корах выветривания и метасоматитах, сернокислого выщелачивания в зоне окисления сульфидных месторождений, щелочного выщелачивания и др. Особенности зон выщелачивания необходимо учитывать при поисках и оценке рудных месторождений, нередко они служат областями формирования рудоносных растворов. Геохимические барьеры, как и зоны выщелачивания, формируются в различных

системах земной коры, с ними связано образование рудных месторождений, геохимических аномалий. Различают природные и техногенные барьеры, те и другие могут быть механическими, физико-химическими и биогеохимическими. Среди физико-химических барьеров выделяются кислородные, сероводородные, щелочные, кислые и пр. На основе представления о барьерах разработана систематика типов концентрации элементов в гипергенных и гидротермальных системах [19].

Механическая миграция. Этот вид миграции изучен слабо, геохимики, как правило, не уделяют ему внимания. Только в теории геохимических методов поисков сравнительно хорошо рассмотрены процессы образования так называемых механических ореолов и потоков рассеяния, геохимические аспекты движения масс на склонах и в аллювии. Механогенез в основном остается задачей будущих исследований.

Физико-химическая миграция. Эти процессы изучены наиболее детально, им посвящено огромное число исследований как в нашей стране, так и за рубежом. Оформились и самостоятельные научные направления: физическая геохимия, термобарогеохимия, важное значение приобрели эксперименты, использование химической термодинамики и кинетики, ЭВМ. Четко обособилась геохимия магматических, гидротермальных и гипергенных процессов и систем [6, 7, 15—18, 21, 25, 28, 29, 32, 37, 41, 42].

Ведущее значение в изучении физико-химической миграции играет ионная концепция, основы которой были разработаны В. М. Гольдшмидтом в середине 20-х годов [40]. Рассчитав величины радиусов ионов, В. М. Гольдшмидт с новых позиций разработал теорию изоморфизма, объяснил огромное число ассоциаций элементов в минералах [40]. Появилась возможность на основе величин ионных радиусов предсказывать совместное нахождение элементов в горных породах и рудах. Это был новый качественный «кристаллохимический» этап в развитии геохимии, определивший главное направление развития этой науки на десятилетия. В первой половине XX в. большинство геохимиков при изучении литосферы и гидросферы основное внимание обращали именно на ионы. Крупнейший вклад в развитие ионной концепции внес и А. Е. Ферсман, который разработал систематику ионов, сформулировал правила диагональных рядов и полярного изоморфизма, ввел понятие об эндокриптии. На физико-химической основе с учетом свойств ионов А. Е. Ферсман строил общую теорию миграции элементов в земной коре. Он ввел понятие об энергетической характеристике иона — ЭК, зависящей от размеров и зарядов ионов [32]. Идея А. Е. Ферсмана о характеристике геохимических особенностей ионов с помощью одной функции, учитывающей и размер и заряд иона, была прогрессивной, однако в дальнейшем выяснилось, что ЭК могут применяться только к анализу тех систем, в которых преобладают простые ионы (некоторые силикатные расплавы, си-

стемы галогенеза и др.). Ко многим системам, в частности к гидротермам и большинству гипергенных систем, понятие об ЭК неприменимо, так как для геохимических процессов этой группы характерна неионная миграция, а ионы представляют собой сложные комплексы. Последние особенно характерны для гидротерм, в которых анализ газово-жидких включений (термобарогеохимия) и термодинамические расчеты позволили установить большое число сложных ионов одного и того же элемента [37].

В последние годы крупные успехи достигнуты при изучении ионного обмена. Это явление известно еще с середины прошлого столетия (работы английского ученого Уэ), но детально было изучено почвоведом К. К. Гедройцем (1872—1932). На роль данных процессов в геохимии обратил внимание А. Е. Ферсман [32], который объяснил закономерности ионного обмена, исходя из величин радиусов ионов. Позднее было установлено, что ионный обмен характерен не только для гипергенных, но и для гидротермальных минералов, например для апатита, полевых шпатов, слюд. С этим явлением связывают гранитизацию, нефелинизацию, альбитизацию и другие процессы. Изучение ионного обмена приобрело большое практическое значение — минералы, обладающие этими свойствами, используются в нефтеперерабатывающей, красильной, пищевой, энергетической и других отраслях промышленности, в качестве молекулярных сит для очистки сточных вод, разделения молекул разного размера, смягчения воды и т. д.

Важное значение при изучении ионной миграции приобрел анализ окислительно-восстановительных и щелочно-кислотных условий растворов и расплавов — определение величин Eh и pH. Необходимость подобного подхода была показана еще в первой половине XX столетия в трудах В. М. Гольдшмидта, А. Е. Ферсмана, В. В. Щербины и других геохимиков, однако широкое развитие работ в данном направлении произошло только в последние десятилетия. Эксперимент, термодинамические расчеты и прямые наблюдения в природе позволили охарактеризовать Eh и pH различных магматических, гидротермальных и гипергенных систем, установить характерную для них окислительно-восстановительную и щелочно-кислотную зональность, показать ее важную роль в перераспределении химических элементов в земной коре (концентрация Fe, Mn, S, Se — в результате процессов окисления; U, Mo, Se, V, Au, Ag, As — в результате восстановления; Ca, Sr, Ba, Ra, Ni, Co и др.— при повышении pH; Si, Mo, Ge, Be, Al и др.— при понижении pH и т. д.). Было показано также, что при просачивании вод через горные породы возникают электрохимические явления, например скачок потенциала, особенно хорошо изученный у многих сульфидов, обладающих электронной проводимостью. В таких системах возникают микрогальванические пары, происходит «электрохимическое растворение» некоторых сульфидов и арсенидов, объясняющее образование водных ореолов рассеяния руд в бескислородной среде,

формирование зоны вторичного сульфидного обогащения и т. д. Представления об электрохимическом растворении положены в основу особого геохимического метода поисков руд путем частичного извлечения металлов под действием постоянного электрического тока.

Крупным достижением ионной концепции явилось открытие в 60-х годах во многих минералах свободных радикалов. Методы спектроскопии твердого тела (электронный парамагнитный резонанс и др.) позволили обнаружить в минералах такие необычные ионы, как Zr^{3+}, Hf^{3+}, Mo^{5+}, W^{5+}, Pb^{3+}, CO_3^-, SO_2^-, SO_3^- и др. Они обусловливают многие особенности минералов и пород, например зеленую окраску амазонитов (Pb^+ в полевых шпатах), розовую окраску кварца (Ti^{3+}) и т. д. На основе определения свободных радикалов в минералах расчленяют массивы изверженных пород, устанавливают генетические типы рудных месторождений, решают другие геологические задачи.

Новые возможности использования химической термодинамики в геохимии открылись в связи с появлением методов оптимального программирования. В физической химии в 50-х годах был разработан метод минимизации свободной энергии Гиббса, который с помощью ЭВМ позволяет рассчитывать состав равновесных систем, включающих большое число минеральных фаз и ионов. Это создало возможность моделирования процессов физико-химической миграции на количественной термодинамической основе.

В течение длительного времени вопросы миграции элементов в неионной форме привлекали меньшее внимание геохимиков и были разработаны слабее. Пожалуй, только коллоидная миграция и в целом проблема «коллоиды в земной коре» были изучены детально [36]. Напротив, явно недооценивалась миграция элементов в виде органических комплексов, которые оказались характерными не только для гипергенных, но и для гидротермальных систем. В последние десятилетия гидрогеохимики установили широкое распространение органических соединений в природных водах, доказали, что в комплексе с ними мигрируют многие элементы. В настоящее время начинает формироваться органическая гидрогеохимия. Она тесно связана с органической геохимией и биогеохимией.

Большое значение приобрела геохимия газов, которая не только имеет теоретическое значение, но и является основой прогнозирования и поисков многих месторождений полезных ископаемых (горючие газы, нефть, рудные месторождения) [1].

Биогенная миграция. Изучение миграции этого вида привело к развитию новой, созданной В. И. Вернадским науки — биогеохимии [7]. Первые десятилетия она развивалась сравнительно медленно, преимущественно в трудах самого В. И. Вернадского и его немногочисленных учеников и последователей (Я. В. Самойлов, А. П. Виноградов, Б. Б. Полынов и др.). Высказывались представления и о принципиальной ошибочности биогеохимиче-

ских идей В. И. Вернадского [23]. Однако развитие науки во второй половине XX столетия и особенно нужды практики показали, что, создав понятие о живом веществе (совокупности живых организмов, выраженной в единицах массы и энергии), В. И. Вернадский сделал гениальное открытие, имеющее огромное значение для естествознания в целом. Ученый доказал, что миграция химических элементов в верхней части земной коры осуществляется или при непосредственном участии живого вещества или протекает в среде, геохимические особенности которой (O_2, CO_2, H_2S, HCO_3^- и т. д.) обусловлены живым веществом, как тем, которое в настоящее время составляет соответствующую систему, так и тем, которое действовало в земной коре в течение всей ее геологической истории.

Развивая идеи биогеохимии, В. И. Вернадский ввел понятие «биокосные тела» (системы), в которых живые организмы и неорганическая «косная» материя тесно между собой связаны и взаимообусловлены, представляют единое целое. К биокосным системам относятся почвы, ландшафты, коры выветривания, Мировой океан, реки, озера, многие подземные воды. Самая крупная биокосная система — вся область жизни — биосфера. Гранитный слой земной коры В. И. Вернадский относил к былым биосферам.

Среди биокосных систем особое внимание геохимиков привлекли ландшафты. В конце 40-х годов Б. Б. Полынов [21] заложил основы самостоятельного научного направления — геохимии ландшафта. Изучение геохимии лесных, степных, тундровых, пустынных и прочих ландшафтов приобрело большое практическое значение, главным образом в связи с поисками рудных месторождений и борьбой с загрязнением окружающей среды. Большое значение также приобрели исследования по геохимии коры выветривания (Б. Б. Полынов, И. И. Гинзбург), илов (Н. М. Страхов), почв (А. П. Виноградов), подземных вод (А. М. Овчинников, П. А. Удодов) и других биокосных систем [9, 18, 27]. Геохимическую деятельность подземных вод А. Е. Ферсман предложил именовать катагенезом и гидрогенезом [32]. Эти процессы с геохимических позиций стали детально изучаться только с конца 50-х годов. Было показано, что осадочная толща земной коры в значительной степени переработана подземными водами, что с эпигенетическими процессами связано образование урановых, медных и других рудных месторождений [13].

Ныне учение В. И. Вернадского о геохимической роли организмов, о биосфере широко используется во многих естественных науках, оно оказало огромное влияние на развитие смежных наук о Земле — на науку об осадочных породах, гидрогеологию, океанологию, географию, а также на микробиологию и другие биологические науки. Изучение биогенной миграции стало одним из наиболее перспективных направлений современной геохимии. В этой области еще много нерешенных задач, из ко-

торых отметим установление кларков живого вещества и его отдельных разновидностей (животных, растений, микроорганизмов), роль организмов в минералообразовании, законы концентрации химических элементов организмами, роль микроорганизмов в рудообразовании, происхождение и эволюция гидросферы и атмосферы, геохимические факторы возникновения и эволюции жизни на Земле (в том числе геохимические аспекты вымирания отдельных групп организмов, например динозавров). Внедрение биогеохимических идей В. И. Вернадского в зарубежную науку в первой половине XX в. происходило медленно, хотя лекции на эту тему В. И. Вернадский читал в Сорбонне еще в 20-х годах. Положение коренным образом изменилось с началом НТР — ныне учение В. И. Вернадского о биосфере получило всемирное признание, широчайшее распространение. Ему, в частности, уделяют внимание такие международные организации, как ЮНЕСКО.

Техногенная миграция. В. И. Вернадским впервые был поставлен вопрос о геохимической деятельности человечества; его конкретная разработка начата А. Е. Ферсманом в 20-х годах, ему же принадлежит и термин «техногенез». К геохимической деятельности человечества А. Е. Ферсман подходил с общих позиций геохимии: он рассматривал использование элементов в зависимости от их кларков, свойств и положения в Периодической системе. С геохимических позиций ученый анализировал экспорт и импорт, рассеяние и концентрацию элементов промышленностью, проблему стратегического сырья, которая особенно интересовала его в годы Великой Отечественной войны 1941—1945 гг.

При жизни А. Е. Ферсмана эти его исследования не привлекли должного внимания геохимиков и практически не нашли продолжателей. Однако в наши дни выяснилось, что изучение техногенной миграции составляет теоретическую основу борьбы с загрязнением окружающей среды и решения других актуальных вопросов. Поэтому данный раздел геохимии быстро развивается, создана система понятий, начаты исследования по геохимии городов и других техногенных систем, составляются специальные геохимические карты. Привлекает внимание и геохимия ноосферы Земли в целом, т. е. части планеты, измененной техногенезом. Эти исследования энергично развиваются как в нашей стране, так и за ее пределами [3, 7].

Радиогеология и геохимия изотопов. Геологическое значение радиоактивности стало выявляться вскоре после открытия этого явления, т. е. в самом начале XX столетия (Д. Джоли и др.). Огромную роль процессам радиоактивного распада придавал В. И. Вернадский, поставивший вопрос о создании особой науки — радиогеологии, главным образом в связи с проблемой абсолютного возраста и энергетики [5, 6]. Радиоактивный распад атомов стали рассматривать в качестве источника внутренней энергии Земли и связывать с ним энергетику эндогенных процессов, глубинное тепло планеты (преимущественно за счет распада

^{235}U, ^{238}U, ^{40}K и ^{232}Th). Обращалось внимание также на радиационно-химические явления в земной коре, протекающие при радиоактивном распаде. С этими процессами оказались связаны метамиктные изменения циркона, торита, браннерита и других минералов, радиолиз воды — разложение ее с выделением водорода и кислорода и т. д. Геохимическое значение этих процессов, их масштабы еще подлежат уточнению.

В последние десятилетия самостоятельной наукой стала ядерная геология, которая, помимо радиоактивных процессов, изучает также разделение нерадиоактивных изотопов в земной коре (^{1}H и ^{2}H; ^{12}C и ^{13}C; ^{16}O и ^{18}O; ^{32}S и ^{34}S; ^{86}Sr и ^{87}Sr и др.). Методы исследования в ядерной геологии в основном физические, решаемые проблемы — преимущественно геохимические; поэтому ядерной геологией занимаются как геохимики, так и геофизики.

Изучение распределения радиогенных и нерадиогенных изотопов позволяет решать такие важные проблемы, как абсолютная геохронология, коровое или мантийное происхождение пород (по соотношению ^{86}Sr и ^{87}Sr), магматогенная или вадозная природа сульфидной серы (по ^{32}S и ^{34}S), температура воды древних морей (по ^{16}O и ^{18}O), скорость движения подземных и поверхностных вод (по содержанию ^{3}H — трития). Изотопные исследования позволили решать многие актуальные вопросы как геохимии, так и смежных наук. На них основаны также весьма эффективные методы поисков месторождений полезных ископаемых (гамма-спектрометрические и прочие методы поисков урановых и других месторождений). Исследования по геохимии изотопов широко развиваются как в нашей стране, так и за рубежом [18, 22, 29, 34, 42].

Геохимия рудных месторождений. Огромное значение рудных месторождений в экономике определило их важную роль в качестве объектов геохимических исследований. В работах А. Е. Ферсмана и его многочисленных последователей (А. А. Сауков, К. А. Власов, В. В. Щербина и др.) главное внимание уделялось именно рудным месторождениям [12, 13, 29, 32]. В наше время создается особый раздел науки, задача которого сводится к изучению процессов наибольшей концентрации химических элементов в земной коре. В этом разделе рассматриваются кларки концентрации элементов на месторождениях, формы нахождения элементов в рудах и ореолах, парагенные ассоциации элементов в минералах, рудах, месторождениях, рудных провинциях и поясах, современные и былые геохимические процессы на месторождениях, геохимическая зональность, геохимические барьеры, историческая и региональная геохимия месторождений, геохимические аспекты их генезиса. В совокупности перечисленные вопросы составляют содержание геохимии конкретного рудного месторождения. В той или иной степени они освещаются многими авторами; мы полагаем, что геохимия рудного месторождения должна стать обязательным разделом исследо-

ваний аналогично минералогии, структуре и гидрогеологии месторождений. Перспективной проблемой является дальнейшее развитие геохимической классификации рудных месторождений и на этой основе установление их новых генетических типов.

Региональная геохимия. Это по-прежнему наименее разработанный раздел геохимии, его основы закладывались А. Е. Ферсманом в ходе многочисленных экспедиций. С середины 20-х годов с А. Е. Ферсманом в них сотрудничал Д. И. Щербаков (1893—1966) — выдающийся знаток региональной геохимии Средней Азии и Кавказа.

В 1919 г. в Петроградском университете А. Е. Ферсман прочитал курс лекций по геохимии России, позднее (в 1922 г.) опубликованный [30]. В 1931 г. увидела свет его книга «Основные черты геохимии Союза» [31], в которой уже сформулированы основные положения региональной геохимии как особого раздела геохимической науки.

Заслуга А. Е. Ферсмана состоит в разработке системы понятий региональной геохимии и основ геохимического картирования. Им созданы понятия о территориальных геохимических единицах — геохимических провинциях, зонах, поясах, узлах, полях и т. д. На востоке Советского Союза он выделил грандиозный Монголо-Охотский складчатый рудный пояс, что имело большое значение для поисков месторождений в этом регионе, а также для становления только еще зарождавшейся металлогении, одним из основоположников которой по праву считается А. Е. Ферсман. Ему же принадлежит выделение пустынно-озерного пояса [31].

К классическим регионально-геохимическим исследованиям относятся «Полезные ископаемые Кольского полуострова» [33] А. Е. Ферсмана. V том своей «Геохимии» ученый предполагал посвятить геохимии Урала, Забайкалья и Средней Азии. К сожалению, он не успел реализовать этот замысел, поставленные им задачи во многом не решены и в последующий период, хотя опуликованы исследования по геохимии многих регионов СССР.

Важное значение для развития региональной геохимии имела разработка А. П. Виноградовым понятия о биогеохимических провинциях. Им и его последователями установлены на территории СССР и изучены биогеохимические провинции, характеризующиеся дефицитом I, F, Co, Sr, B, Mo и других элементов или избытком F, Mo, Cu, Ni и т. д. [8]. Регионально-геохимический аспект также ярко выражен в геохимии ландшафта: разработана методика ландшафтно-геохимического районирования, составлена карта геохимических ландшафтов СССР и отдельных его частей. Все же методика геохимического картирования в целом разработана еще слабо. Мало трудов и по геохимии отдельных регионов; само содержание понятия «геохимия конкретного региона» еще требует уточнения. Весьма важно развивать круп-

номасштабные исследования по геохимии отдельных районов, рудных узлов, городов и т. д.

Важность регионально-геохимических исследований не подлежит сомнению. В первую очередь они необходимы в связи с прогнозированием и поисками рудных месторождений, но велика их роль и в решении проблемы окружающей среды, развитии сельского хозяйства и медицины. Отметим, что региональная геохимия как особое научное направление пока существует только в нашей стране.

Геохимия отдельных элементов. Геохимические исследования, посвященные отдельным элементам, развиваются одновременно и параллельно с изучением геохимических процессов и геохимии систем. С первых лет зарождения геохимии В. И. Вернадский уделял большое внимание геохимии редких элементов, позднее он написал классические очерки по геохимии марганца, кислорода, кремния, углерода, радиоактивных элементов [4]. Серию трудов по геохимии редких элементов опубликовали В. М. Гольдшмидт с сотрудниками [14]. Много внимания этой проблематике уделял и А. Е. Ферсман, ориентировавший своих сотрудников на детальный анализ геохимии конкретных элементов.

Крупный вклад в эту проблему внес К. А. Власов (1905—1964) как ученый и организатор института, изучающего минералогию, геохимию и кристаллохимию редких элементов (ИМГРЭ) [12]. В последние десятилетия в СССР были опубликованы монографии, посвященные геохимии бериллия, урана, бора, ванадия, галлия, стронция, молибдена, ртути и других элементов. Широкое развитие подобные исследования получили и за рубежом. Они позволили сформулировать содержание понятия «геохимия конкретного элемента», которое включает характеристику следующих вопросов.

1. Свойства химического элемента, определяющие его миграцию в земной коре, Земле в целом и других планетах, положение в Периодической системе, строение атома, изотопный состав, размеры атомов и ионов, их окислительно-восстановительные свойства, pH осаждения гидроокислов, свойства соединений и т. д. 2. Кларки элемента в земной коре, отдельных геосферах и системах, кларки концентрации. 3. Миграция элементов в магматических, гидротермальных, гипергенных и прочих системах, формы их переноса и отложения, парагенные ассоциации элементов и их причины, геохимические барьеры, геохимия месторождений и геохимические методы их поисков. 4. Историческая геохимия элемента, его участие в геохимических циклах. 5. Техногенная миграция элемента, его технофильность, проблема защиты среды, медико-геохимические и сельскохозяйственные аспекты геохимии элемента.

Для многих химических элементов этот комплекс вопросов уже охарактеризован, но есть и немало элементов, геохимия которых изучена недостаточно. Это, например, относится к платине и платиноидам (не установлены кларки, содержание в во-

дах и т. д.), серебру, мышьяку, ниобию, танталу, рению и другим, преимущественно редким элементам.

Историческая геохимия. Как и все науки о Земле, геохимия — наука историческая, что нашло яркое отражение уже в трудах ее основоположников. В. И. Вернадский неоднократно обращался к проблеме эволюции геохимических условий за время геологической истории Земли, А. Е. Ферсман ввел понятие о «геохимических эпохах», а его ученик А. А. Сауков [25] — об «исторической геохимии» как самостоятельном разделе науки, изучающем эволюцию миграции элементов в истории Земли.

Непрерывное поступление в земную кору трансформированной солнечной энергии (в основном за счет разложения органических веществ), а также глубинной энергии Земли (в ходе вулканизма и других процессов) определили ее необратимую геохимическую эволюцию [2]. За миллиарды лет эволюционировал состав Мирового океана, атмосферы и литосферы [25—27, 29]. Некоторые типы горных пород и руд не образуются в современную геологическую эпоху. Это относится к железным рудам типа джеспилитов, ураноносным конгломератам, металлоносным черным сланцам, писчему мелу, красноцветам и т. д. Многие проблемы исторической геохимии еще далеки от решения. Например, чрезвычайно сложна и дискуссионна проблема происхождения и эволюции солевого состава океана. Разные подходы и методы нередко приводят к противоположным выводам, взгляды одних и тех же ученых изменяются коренным образом.

Повторение в истории Земли складчатости, горообразования, влажного и сухого климата придавало разным геологическим эпохам некоторые общие геохимические черты. Однако все эти явления развивались на фоне общего необратимого прогрессивного развития земной коры. Поэтому нет и полной повторяемости геохимических процессов в ходе геологической истории.

Многие вопросы исторической геохимии были изучены за последние годы, но все же целостная геохимическая история земной коры, отвечающая уровню исторической геологии, еще не существует. Это очередная теоретическая задача геохимии. Не менее важны исследования по исторической геохимии отдельных регионов и эпох. В решении вопросов исторической геохимии особое значение приобрели изотопные исследования. Необходимы также тесные контакты с работами стратиграфов, палеонтологов, петрологов, литологов, тектонистов, металлогенистов, специалистов по рудным месторождениям, палеогеографов и других представителей наук о Земле.

Прикладная геохимия. История геохимии — хороший пример взаимоотношения науки и практики. Геохимия возникла в результате логического развития научной мысли вне прямой связи с потребностями практики. Это относится как к основополагающим работам В. И. Вернадского в России в начале XX в., так и к работам Ф. У. Кларка в США. Однако новая наука вскоре доказала свое огромное практическое значение — это произо-

шло в СССР и было связано с потребностями социалистического строительства (преимущественно исследования А. Е. Ферсмана и его школы в Хибинах, Средней Азии, на Урале). В 20-х и 30-х годах основными областями практического приложения геохимии были изучение месторождений полезных ископаемых, выяснение их генезиса с целью прогнозирования. Эту задачу А. Е. Ферсман считал главной, он подчеркивал также роль геохимии в развитии химической технологии, настаивал на комплексном использовании минерального сырья, подчеркивал, что знание условий образования руд может подсказать технологу рациональный способ извлечения полезных ископаемых. Обе эти прикладные задачи геохимии еще более актуальны в наши дни в связи с возросшими трудностями поисков новых месторождений и важностью комплексного использования минерального сырья. Сохранят свое важное значение названные задачи и в будущем.

В 30-е годы в связи с развитием биогеохимии определилось практическое значение геохимии в медицине (борьба с эндемическим зобом и другими биогеохимическими эндемиями) и сельском хозяйстве (борьба с болезнями домашних животных и культурных растений). Теоретической основой решения этих вопросов было учение о биогеохимических провинциях, разработанное А. П. Виноградовым. В те же годы А. Е. Ферсман в замечательной книге «Полезные ископаемые Кольского полуострова» [33] указал на роль геохимии в решении вопросов охраны природы, борьбы с загрязнением окружающей среды.

Прикладное значение геохимии резко возросло во второй половине XX столетия. Наряду с изучением условий образования месторождений стали разрабатываться геохимические методы их поисков. Хотя основы этих методов были заложены в СССР еще в 30-х годах, их быстрое развитие началось только с середины 50-х годов. Оно продолжается и в настоящее время, когда геохимические поиски стали главной областью практического приложения геохимии. В СССР ежегодно анализируется около 10 млн. проб пород и почв, уже получены многие миллиарды значений (в каждой пробе определяются содержания от 30 до 40 химических элементов). Этот подлинный «информационный взрыв» позволил выявить многие десятки новых месторождений (часто в комплексе с геофизическими и другими методами). Огромную роль геохимических методов поисков месторождений прозорливо подчеркивал А. Е. Ферсман. Этому вопросу он посвятил специальную монографию, опубликованную в 1940 г. [11]. Ныне геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых в совокупности составляют самостоятельную прикладную науку с хорошо разработанной теорией, собственной разветвленной системой понятий, многочисленными печатными трудами, кафедрами в вузах, лабораториями и научными институтами, международными организациями [1]. Наибольшее распространение геохимические поиски получили в нашей стране,

которая уже несколько десятилетий сохраняет лидерство в области их теории. Можно не сомневаться, что и в будущем геохимические методы поисков сохранят свое значение в прикладной геохимии. Однако мы не исключаем, что в ближайшие годы решение проблем защиты окружающей среды может стать главной областью практического приложения геохимии. Круг вопросов прикладной геохимии техногенеза очень широк — это геохимия городов, промышленных комбинатов, дорожных и сельскохозяйственных ландшафтов, геохимические проблемы загрязнения рек, подземных вод, морей и океанов, курортов, геохимические последствия мелиорации, особенно орошения и осушения и, наконец, геохимические аспекты оптимизации всей ноосферы Земли [3].

Многие задачи геохимии техногенеза в теоретическом отношении оказались теми же, что и в теории геохимических поисков. Например, разрушающиеся рудные месторождения с образующимися вокруг них вторичными ореолами рассеяния стали моделями загрязнения окружающей среды от локального промышленного источника.

По мере развития геохимии росло ее практическое значение. Развивались отрасли прикладной геохимии, однако в разные исторические эпохи на первое место выдвигались разные направления — сначала геохимические основы прогнозирования рудных месторождений, затем геохимические методы их поисков, в ближайшей перспективе намечается ведущая роль геохимических аспектов проблемы окружающей среды. Можно не сомневаться, что дальнейшее развитие теории геохимии, в частности, как результат изучения планет Солнечной системы и земных глубин, приведет и к новым областям практического использования этой науки. Уже сейчас наметилось применение геохимии при добыче полезных ископаемых методом подземного выщелачивания, ставится вопрос об искусственном создании месторождений.

Руководящие идеи и перспективы развития геохимии. Геохимия — наука XX столетия. Изучение истории атомов Земли, а в последние годы и других планет позволило не только построить самостоятельную крупную отрасль естествознания, но и глубоко внедриться в смежные науки, «геохимизировать» их. Геохимические идеи и методы ныне оказывают большое влияние на минералогию, петрологию, литологию, гидрогеологию, гидрологию, географию и другие науки о Земле, на многие биологические, технические и другие науки. Каковы же перспективы дальнейшего развития геохимии в эпоху продолжающейся НТР, бурной перестройки естествознания и техники? Очевидно, ответ на этот вопрос зависит, с одной стороны, от того, в какой степени геохимия способна решать проблемы, стоящие перед человечеством, а с другой — каковы творческий потенциал самой науки, глубина ее идей, заложенные в них возможности развития.

Отвечая на первый вопрос, напомним, что две важнейшие проблемы современности во многом решаются на путях совре-

менной геохимии; это проблемы сырьевых ресурсов и окружающей среды. Таким образом, потребность в развитии науки имеется. Но каковы ее внутренние возможности, готова ли она решать поставленные вопросы достаточно быстро и глубоко? Анализ путей развития геохимии позволяет сделать вывод, что методология и основные идеи геохимии, разработанные ее великими основоположниками В. И. Вернадским, В. М. Гольдшмидтом, А. Е. Ферсманом и развитые их многочисленными последователями, содержат огромные возможности дальнейшего развития. Прежде всего это изучение истории атомов в природе, исходя из их положения в Периодической системе химических элементов Д. И. Менделеева, особенностей строения ядра и электронных оболочек, новейших представлений физики и химии. Сохранится огромное значение использования различных физико-химических параметров, например радиусов ионов и атомов, потенциалов ионизации и т. д. Усилится значение новейших, наиболее чувствительных, точных, производительных и локальных методов определения и содержания форм нахождения элементов (нейтронно-активационный, рентгено-радиометрический, электронного зондирования и др.).

Все большее значение будет приобретать геохимия изотопов, решение на ее основе не только собственно геохимических задач, но и проблем смежных наук о Земле.

Большие возможности заложены в дальнейшем развитии физической геохимии — использовании химической термодинамики и кинетики при изучении миграции элементов. Огромная роль в будущем развитии геохимии, несомненно, принадлежит математизации этой науки на основе использования теории вероятности, дифференциальных уравнений и других разделов математики, широкого применения ЭВМ.

Все изложенное относится к использованию в геохимии общих методологических принципов современного естествознания, так как только шагая в ногу с веком наука может развиваться успешно. Однако это, несомненно, необходимое, но недостаточное условие. Важно, чтобы геохимия использовала и собственные руководящие идеи и принципы. Среди них на первое место мы выдвигаем положение, исходящее из самого определения предмета науки — историзм, идея геохимических циклов, развивающихся на фоне необратимого поступательного и прогрессивного развития земной коры. Каждый химический элемент участвует в этих циклах, один и тот же атом входит в состав живого вещества, участвует в водной миграции, накапливается в илах, входит в состав осадочных пород, участвует в процессах метаморфизма, палингенеза, магматизма и снова поступает на земную поверхность. Так осуществляется большой круговорот веществ в земной коре, связывающий поверхностные и глубинные процессы.

Можно считать доказанным, что земная кора представляет собой сложную динамическую систему, в которую непрерывно

поступает солнечная и глубинная энергия. Это определяет направленное развитие земной коры, в ходе которого увеличиваются ее сложность и разнообразие, накапливается свободная энергия и растет неравновесность, уменьшается энтропия. В связи с этим выявляется огромная роль живого вещества в истории атомов, в первую очередь в биосфере, но, вероятно, также и в земной коре в целом.

Другой общий принцип геохимии — это представление об огромной роли человеческого общества как геохимического фактора, о значении техногенной миграции в будущей истории планеты, о необходимости разработки теории ноосферы.

Эта книга публикуется в связи со столетием со дня рождения А. Е. Ферсмана, поэтому уместно еще раз подчеркнуть, что ведущие идеи современной геохимии во многом обязаны его исследованиям. Обращаясь к жизненному и научному пути ученого, мы поражаемся безграничной широте его творчества, охватившего почти все разделы геохимии, заложившего основы многих ее научных направлений. О силе предвидения А. Е. Ферсмана говорит актуальность и в наши дни поставленных им задач, многое предстоит решить будущему поколению геохимиков. Ферсмановские идеи долго будут питать развитие геохимии; геохимик всегда будет с восхищением и благодарностью обращаться к творчеству великого ученого и гражданина нашей страны.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барсуков В. Л., Григорян С. В., Овчинников Л. Н.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Наука, 1981. 319 с.
2. *Белов Н. В., Лебедев В. И.* Источники энергии геохимических процессов.— Природа, 1957, № 5, с. 11—20.
3. Биогеохимические циклы в биосфере/Под ред. А. Г. Назарова. М.: Наука, 1976. 356 с.
4. *Вернадский В. И.* Очерки геохимии. М.; Л.: Госиздат, 1927. 368 с.
5. *Вернадский В. И.* О необходимости исследования радиоактивных минералов Российской империи.— В кн.: Избранные сочинения. М.: Изд-во АН СССР, 1954, т. 1, с. 570—619.
6. *Вернадский В. И.* Избранные сочинения: В 5-ти т. М.: Изд-во АН СССР. Т. 1. 1954. 696 с.; Т. 2. 1955. 615 с.; Т. 3. 1959. 508 с.; Т. 4, кн. 1. 1959. 624 с.; Т. 4, кн. 2, 1960. 651 с.; Т. 5. 1960. 422 с.
7. *Вернадский В. И.* Химическое строение биосферы Земли и ее окружения. М.: Наука, 1965. 374 с.
8. *Виноградов А. П.* Биогеохимические провинции.— В кн.: Тр. Юбилейной сессии, посвященной столетию со дня рождения В. В. Докучаева. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1949, с. 59—84.
9. *Виноградов А. П.* Геохимия редких и рассеянных химических элементов в почвах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 237 с.
10. *Виноградов А. П.* Среднее содержание химических элементов в главных типах изверженных горных пород земной коры.— Геохимия, 1962, № 7, с. 555—571.
11. *Ферсман А. Е.* Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1939. 448 с.
12. Геохимия, минералогия и генетические типы месторождений редких элементов. В 3-х т. Т. 1. Геохимия редких элементов. М.: Наука, 1964. 687 с.

13. Гидрогенные месторождения урана: основы теории образования/Под ред. А. И. Перельмана. М.: Атомиздат, 1980. 270 с.
14. *Гольдшмидт В. М.* Сборник статей по геохимии редких элементов. М.; Л.: ГОНТИ, 1938. 244 с.
15. *Жариков В. А.* Основы физико-химической петрологии. М.: Изд-во МГУ, 1976. 420 с.
16. *Коржинский Д. С.* Теоретические основы анализа парагенезисов минералов. М.: Наука, 1973. 288 с.
17. *Овчинников А. М.* Гидрогеохимия. М.: Недра, 1970. 200 с.
18. Очерки современной геохимии и аналитической химии/Под ред. А. И. Тугаринова. М.: Наука, 1972. 641 с.
19. *Перельман А. И.* Геохимия. М.: Высш. школа, 1979. 423 с.
20. *Полынов Б. Б.* Кора выветривания. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 242 с.
21. *Полынов Б. Б.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1956. 751 с.
22. Природные изотопы гидросферы. М.: Недра, 1975. 277 с.
23. *Пустовалов Л. В.* Петрография осадочных пород. М.; Л.: Гостоптехиздат, 1940. Ч. 1. 476 с.; Ч. 2. 420 с.
24. *Ронов А. Б.* Осадочная оболочка Земли. М.: Наука, 1980. 79 с.
25. *Сауков А. А.* Геохимия. М.: Наука, 1975. 480 с.
26. *Сидоренко Св. А., Сидоренко А. В.* Органическое вещество в осадочно-метаморфических породах докембрия. М.: Наука, 1975. 117 с.
27. *Страхов Н. М.* Типы литогенеза и их эволюция в истории Земли. М.: Госгеолтехиздат, 1963. 535 с.
28. *Таусон Л. В.* Геохимические типы и потенциальная рудоносность гранитоидов. М.: Наука, 1977. 280 с.
29. *Тугаринов А. И.* Общая геохимия. М.: Атомиздат, 1973. 288 с.
30. *Ферсман А. Е.* Геохимия России. Пг.: НХТИ, 1922. 214 с.
31. *Ферсман А. Е.* Геохимические проблемы Союза. Очерк первый. Основные черты геохимии Союза. Л.: Изд-во АН СССР, 1931. 39 с.
32. *Ферсман А. Е.* Геохимия. М.; Л.: ОНТИ Химтеорет. Т. 1, 1933. 328 с.; Т. 2, 1934. 354 с.; Т. 3, 1937. 503 с.; Т. 4, 1939. 355 с.
33. *Ферсман А. Е.* Полезные ископаемые Кольского полуострова. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 345 с.
34. *Ферсман А. Е.* Химия Земли на новых путях. М.: МОИП, 1944. 28 с.
35. *Ферсман А. Е.* Задачи минералогии в нашей стране.— Зап. Всерос. минерал. о-ва, 1945, ч. 74, вып. 1, с. 10—24.
36. *Чухров Ф. В.* Коллоиды в земной коре. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 671 с.
37. *Щербина В. В.* Основы геохимии. М.: Недра, 1972. 296 с.
38. *Clarke F. W.* The data of geochemistry. Wash., 1924. 841 p. (US Geol. Surv. Bull.; Vol. 770).
39. *Goldschmidt V. M.* Geochemische Verteilungsgesetze. Oslo, 1922—1927. Bd. 1. 17 S.; Bd. 2. 37 S.; Bd. 3. 58 S.; Bd. 4. 24 S.
40. *Goldschmidt V. M.* Geochemistry. Oxford: Clarendon press, 1954. 731 p.
41. Handbook of geochemistry/Execut/Ed. K. H. Wedepohl. B.; N. Y.: Spring.-Verl., 1969. 442 p.
42. *Krauskopf K.* Introduction of geochemistry. N. Y.: MacGraw-Hill Book Co, 1967. 721 p.

УДК 550.84

К. М. ФЕОДОТЬЕВ

О РАЗВИТИИ ОТЕЧЕСТВЕННОГО ЭКСПЕРИМЕНТА В МИНЕРАЛОГИИ И ГЕОХИМИИ

Идеи экспериментальной минералогии зародились во времена М. В. Ломоносова. В его научном наследии впервые встречаются описания задуманных опытов по изучению процессов минералообразования. В краткой заметке, найденной в архиве М. В. Ломоносова, опубликованной только в наше время, описывается программа опытов воздействия растворов на минералы. В этой заметке М. В. Ломоносов набросал короткую запись об опыте по обработке минералов водой при повышенной температуре под давлением водяного пара. Он писал: «NB. Дожжовую или снежную воду варить с материями, варить в Папиновой машине» [16, с. 441]. Это, вероятно, самый ранний из задуманных экспериментов по геохимии процессов.

Более поздние экспериментальные исследования образования минералов в России начались в середине XIX в. Они заключались в искусственном получении некоторых минералов различными способами. Краткое их описание находим в труде П. Н. Чирвинского «Искусственное получение минералов в XIX столетии» [37]. Автор упоминает лишь нескольких ученых, искусственно получавших минералы в лабораториях России. Старейшим из них был И. И. Лемберг, среди других минералов создавший в лаборатории анортит, апатит, калиевый нефелин. Следует упомянуть профессора Петербургской медико-хирургической академии К. Д. Хрущева. С его именем связан синтез минералов в гидротермальных условиях. Были получены анортит, роговая обманка, ортоклаз, кварц, циркон и из расплава — магнезиальная слюда. Особенно важен синтез роговой обманки — сложного алюмосиликата, плавящегося с разложением и содержащего гидроксильный ион. В экспериментальных работах К. Д. Хрущева особенно ценно стремление решать вопросы, выдвигаемые геологическими науками,— им синтезированы важные минералы и в условиях, близких к природным.

В начале нашего века одним из центров экспериментальных исследований стал Петербургский политехнический институт, где под руководством Ф. Ю. Левинсона-Лессинга ставились экспериментальные работы по изучению минералообразования на научной основе с использованием достижений физической химии (правила фаз и физико-химического анализа — методики, разрабатываемой в том же институте академиком Н. С. Курнаковым) и с исследованием полученных образцов кристаллооптически.

В лаборатории Ф. Ю. Левинсона-Лессинга дипломники изучали системы породообразующих элементов. Первые публикации

полученных результатов относятся к 1906 г. [11]. Описаны плавления смесей $CaSiO_3$—$MgSiO_3$. Несмотря на примитивность аппаратуры того времени, температура плавления псевдоволластонита была установлена равной 512° С, что подтверждено исследованиями в настоящее время; впервые выяснено влияние добавки магниевого метасиликата на температуру плавления — уже незначительное его количество снижает температуру плавления, а добавка, равная 35 мол.%, приводит к образованию эвтектики с температурой плавления 1270° С.

После этого первого исследования последовало изучение многих силикатных систем [11, 15]. Все исследования имели экспериментально-минералогический характер. В них определялись изоморфизм между компонентами, условия образования твердых растворов, несмесимость. Для полученных минералов устанавливались оптические константы. К сожалению, рентгенографическое исследование минералов в то время еще не вошло в обиход минералогических исследований.

После небольшого перерыва на кафедре минералогии этого института вновь возродились экспериментальные работы на более высоком теоретическом уровне и продолжались до 1915 г. Ф. Ю. Левинсон-Лессинг к тому времени выписал из Берлина от профессора Х. Е. Буке так называемую бомбу для работ в заданной газовой атмосфере при повышенном давлении.

В это же время Н. С. Курнаков с сотрудниками занимался физико-химическим анализом солевых систем и синтезом минералов, входящих в состав отложений соляных озер и других природных образований, исследовал рассолы Соликамска, а С. Ф. Жемчужный и Ф. Ю. Левинсон-Лессинг экспериментально изучали теоретические вопросы кристаллизации минералов [15].

Экспериментальная лаборатория при кафедре минералогии, организованная в Петроградском политехническом институте, была первой специально созданной для минералогического синтеза и по тому времени хорошо оборудованной.

Империалистическая война 1914—1918 гг. прервала многие работы, в том числе и по синтезу минералов, и по изучению их особенностей. После Великой Октябрьской революции минералогическая лаборатория была превращена в центр Геохимического отделения Политехнического института, экспериментальная ее часть превратилась в учебную ячейку, планомерные исследовательские работы прекратились.

Необходимость более углубленного изучения минералообразования А. Е. Ферсман ощущал еще в самом начале своей научной деятельности. Будучи профессором Университета им. Шанявского, докладывая в Обществе естествоиспытателей в 1912 г., он говорил: «В настоящее время все более и более проникает в научное сознание мысль о том, что химическая жизнь земной коры регулируется законами физической химии и перед минералогией

стоит задача выяснить общие закономерности природных химических реакций» [31, с. 255].

Время шло, но «проникновение в сознание», по-видимому, задерживалось общей консервативной обстановкой того времени. Только после Великой Октябрьской революции по-настоящему развернулись работы по экспериментальной минералогии.

Один из зачинателей экспериментальных исследований в Политехническом институте А. С. Гинзберг в 1921 г. в Петрограде организовал в Геологическом комитете Лабораторию высоких температур, целью которой были эксперименты по минералогии. Работы лаборатории были развернуты позднее; начались они с приходом Хр. С. Никогосяна. Первой публикацией, возвестившей о начале деятельности вновь созданной лаборатории, было описание образующихся твердых растворов бисиликатов кальция и натрия [2]. Далее последовало описание синтеза рамзаита и кальциевого рамзаита [3]. В этой же лаборатории синтезировали шпинели [19]; велись интересные работы по термическому анализу отдельных минералов и их групп.

В 20-е годы Лаборатория высоких температур Геолкома практически была единственной, в которой экспериментально изучали и синтезировали минералы.

В 1930 г. по инициативе А. Е. Ферсмана в Академии наук СССР были созданы Минералогический и Геохимический институты, которые он и возглавил. Через два года оба института были объединены в Институт им. М. В. Ломоносова. Его структура и задачи, поставленные А. Е. Ферсманом, предусматривали организацию ряда лабораторий. Опубликованные Александром Евгеньевичем мысли о направлении такого института очень хорошо выражают сущность задуманного. Он писал: «Настоящая книжка... обращена не к истории и прошлому, а к будущему; она должна пробудить новую мысль активной творческой работы в области интереснейших научных течений, перебрасывающих мост между химией и физикой, геологией и минералогией, между кристаллографией и химией... Она имеет целью заострить ряд новых научных моментов» [33, с. 403]. Эти слова оказались пророческими, и вскоре стали развиваться экспериментальная минералогия и геохимия.

А. Е. Ферсман считал, что как минералогические, так и геохимические экспериментальные исследования должны развиваться совместно. В своей четырехтомной «Геохимии» Александр Евгеньевич выделил главу «Минерагения» или, как он ее еще называл, «Химия геопроцесса». К настоящему времени мы эти названия несколько трансформировали и в геохимии выделяем «геохимию процессов», в минералогии — «генетическую минералогию», но они неразрывны. В геохимии процессов существенную роль играет экспериментальная геохимия. Она изучает миграцию атомов, закономерности образования минералов, факторы миграции. Таким образом, разделить экспериментальные минералогию и геохимию трудно, они «прорастают» друг друга.

Выше было отмечено, что до 1930 г. экспериментальные работы по минералогии и геохимии практически проводили в одной лаборатории Геологического комитета.

Прошло 50 лет, и сейчас мы наблюдаем расцвет ряда экспериментальных центров, получающих искусственные минералы и изучающих их особенности, разрабатывающих теоретические основы минералообразования на основе точных наук и другие вопросы существования атомов и жизни минералов в природе.

Собственные экспериментальные работы А. Е. Ферсмана немногочисленны, работая над магнезиальными силикатами в 1911 г., он выполнял простые опыты, необходимые для раскрытия строения минералов. В частности, им была записана кривая потери воды при нагревании. Александр Евгеньевич пишет: «Прекрасный, чистый материал дал возможность произвести несколько опытов по выделению воды при разных температурах. Первоначально я предполагал дать диаграммы для представителей всех главных групп пилотических асбестов... Однако продолжительность каждого опыта заставила меня временно отказаться от этого плана» [32, с. 383]. К этому времени относятся и опыты Я. В. Самойлова [25] по записи кривых нагревания кальцита, каолина и витерита и кривых обезвоживания каолина [24].

А. Е. Ферсман уже в начале своей научной деятельности понимал, что одно описание и умозаключения без экспериментальных исследований минералов не могут дать надежных сведений о строении и генезисе минералов. Поэтому, составляя программу организации Ломоносовского института, он указывал на существенную необходимость создания экспериментальных лабораторий для решения вопросов генетической минералогии и геохимии [33].

Развиваясь, наибольшее распространение получили опыты по нагреванию минералов. Экспериментальная методика, которой пользовались вначале, совершенствовалась; вместе с ней уточнялись и результаты. Большой вклад в этой области сделали Н. С. Курнаков и С. Ф. Жемчужный, сконструировавшие регистрирующий пирометр (пирометр Курнакова). Утомительная работа по регистрации кривых нагревания была облегчена. Уже в 20-е годы были записаны кривые нагревания и обезвоживания огнеупорных глин [28], а также каолина и других минералов этой группы. В 30-е годы составляли сводки, содержащие данные по результатам нагревания и обезвоживания минералов [12].

Одновременно совершенствовались методики термических исследований [29, 36]. В результате этих работ вода получила определенное место в структуре минералов.

Термический анализ продолжает развиваться и играет существенную роль в изучении минералов, содержащих летучие компоненты. Во многих научно-исследовательских учреждениях сейчас используют дериватографы, синхронно записывающие три кривые — дифференциально-термогравиметрическую (ДТГ),

дифференциально-термографическую (ДТА) и термогравиметрическую (ТГ). Они характеризуют минерал по качеству и по количеству летучих составляющих. В 1974 г. вышла в свет книга по термическому анализу минералов и горных пород [27], подытоживающая определенный этап исследований Лаборатории высоких температур ВСЕГЕИ. К сожалению, в ней отсутствуют термические данные для ряда минералов, которыми эта лаборатория не занималась. Последнее обстоятельство обеднило ее содержание, вследствие чего руководством по термическому анализу указанная книга служить не может.

Другое направление, зародившееся в Петербургском политехническом институте в начале века,— **синтез минералов** — получило широкое развитие. Поначалу это было воспроизведение минералов плавлением соответствующих смесей. Высокотемпературный синтез проводился для получения искусственного аналога минерала, лишенного примесей. Это позволяло характеризовать его физическими и физико-химическими постоянными и, кроме того, установить способность минерала к образованию твердых растворов, характер и скорость его кристаллизации, температуры плавления и кристаллизации, устойчивость его решетки в процессе охлаждения.

В этой части экспериментальной минералогии к настоящему времени имеются большие достижения. Во-первых, получается в промышленных масштабах монокристальный лейкосапфир плавлением по способу Вернейля. Этот же способ позволяет получать окрашенные кристаллы: в красный цвет — рубин, в синий — сапфир. Во-вторых, особо следует отметить опыты Д. П. Григорьева, получившего из фторсодержащего расплава фторфлогопит, роговую обманку [8—10], в составе которых гидроксил заменен фтором.

В послевоенные годы эксперименты по минералогии и геохимии развивались главным образом по синтезу минералов из расплавов и по изучению поведения минералов при нагревании. Сосредоточены они были в нескольких учреждениях Ленинграда и Москвы. В качестве примера состояния экспериментальных работ в геохимии и минералогии следует привести данные, подытоженные 3 Совещанием по экспериментальной минералогии и петрографии, которое проходило в конце января 1939 г. Из общего числа докладов на долю московских институтов пришлось пять, ленинградских — 10. Среди 34 докладов четыре касались вопросов гидротермального синтеза; наиболее интересный доклад сделал В. В. Щербина, изучавший в то время гидротермальное образование сульфидов в системе FeS—ZnS—MnS [38].

Экспериментальные работы по минералогии и геохимии значительно расширились только в конце 40-х годов. В это время ленинградские лаборатории изменили тематику — перешли на изучение минералов методом кривых нагревания. Лишь единич-

ные работы касались образования гидротермальных растворов — устойчивости минералов в гидротермальных условиях.

В Институте геологических наук АН СССР в это время успешно действовали: 1) Лаборатория исследований минералов при высоких температурах; 2) Лаборатория исследований при высоких температурах и давлениях; 3) Лаборатория геохимических процессов в Отделе геохимии. Во второй из них И. А. Островский, изучая условия минералообразования в водно-силикатных системах при высоких температурах и давлениях, синтезировал гидроксильный биотит и определил условия его возникновения [20].

В 1947 г. был организован Институт геохимии и аналитической химии им. В. И. Вернадского, в котором были начаты исследования по экспериментальной геохимии и минералогии. В 1954 г. в нем была создана Лаборатория магматогенных процессов, в 1958 г. в Новосибирске и в Иркутске организованы экспериментальные лаборатории. Тематикой всех лабораторий стала экспериментальная минералогия и геохимия. Исследования в них были несколько различны, но цель одна — выяснение закономерностей поведения атомов в земной коре, образования минералов и их строения.

Выполнявшиеся экспериментальные работы охватили многие вопросы в связи с процессами, происходящими в земной коре, в мантии Земли. В полной мере описать результаты этих исследований нет никакой возможности. Мы ограничимся двумя-тремя из них — синтезом минералов, формированием постмагматических растворов и современными тенденциями экспериментальной геохимии.

Работы по синтезу минералов, как указывалось ранее, имеют многолетнюю историю. Одновременно с развитием работ в этой области создавалась и совершенствовалась аппаратура. От примитивной криптоловой печи, в которой создавались минералы в Лаборатории Петроградского политехнического института, до автоклавов с титановыми вкладышами, в которых в настоящее время синтезируются и изучаются минералы в гидротермальном процессе,— таков путь развития экспериментов этого направления.

Синтез флогопита и амфибола из расплавленной смеси окислов с фтористым кальцием, выполненный Д. П. Григорьевым, положил начало детальному исследованию получения слюд, которое сейчас завершилось промышленным изготовлением фтористых слюд более высокого качества — они не разлагаются до 1200° С. Это была одна из первых отдач минералогических исследований в технику и промышленность.

Синтезом *цеолитов* занимались в Лаборатории магматогенных процессов ГЕОХИ АН СССР [26], а затем в Институте геологии и геофизики СО АН СССР [1]. Это важные работы и не только в геохимии — указывающие на условия конечной стадии гидротермального процесса минералообразования, но и в техни-

ке — обосновывающие производство молекулярных сит и особенности их эксплуатации.

Цеолиты — термоактивные соединения. Они имеют характерные термограммы, используемые не только при диагностике, но и при определении интервала их «активации». Последняя осуществляется прокаливанием, при котором молекулы воды удаляются, освобождая каналы в их структуре. Оптимальные условия «активации», а также возможный сорбционный объем по воде можно установить по термограммам. Исследование кинетики дегидратации как природных, так и синтетических цеолитов, термической устойчивости каркаса (Al, Si)—O дает ценную информацию о кристаллических особенностях и физических свойствах этих соединений, столь необходимую технике.

Другим важным объектом экспериментальных исследований были *сульфидные системы.* Исследованием сульфосолей занимаются в Лаборатории экспериментальной минералогии Института геологии и геофизики СО АН СССР. Многолетние систематические экспериментальные работы посвящены физико-химическим условиям процессов минералообразования, возникновению твердых растворов или изоморфных смесей.

А. А. Годовиковым с сотрудниками исследована система $PbS—Bi_2S_3$ [5]. Она важна для правильного понимания особенностей сложной группы минералов — свинцово-висмутовых сульфосолей. Пиросинтезом с последующей гидротермальной перекристаллизацией получены лиллианит, галенобисмутит и гунгаррит. Канниццарит оказался, по-видимому, за пределами параметров исследования. Изучены также образующиеся между ними твердые растворы. В этой же лаборатории установлены характерные особенности гидротермальных растворов, связанные с температурой и составом гидротермальных растворов [6], позволяющие применить полученные результаты при изучении месторождений.

Работы в гидротермальных условиях продолжались, и в дальнейшем были синтезированы медно-висмутовые сульфосоли — виттихенит Cu_3BiS_3, купробисмутит, эмплектит $CuBiS_2$ и догначкаит. В псевдотройной системе $Cu_2S—PbS—Bi_2S_3$ [4] обнаружены широкая область твердых растворов у догначкаита и узкая — у лиллианита, а также ряд других особенностей.

Из свинцово-сурьмяных сульфосолей синтезированы в гидротермальных условиях при 400° С цинкенит, робинсонит и буланжерит. Понижение температуры до 350° С выявляет дополнительно фюлеппит, плагионит, семсеймит, цинкенит же исчезает. Все эти сульфосоли синтезированы в чисто хлоридном растворе с pH близким к нейтральному; синтезированы также известные в природе сульфосоли.

Приведенный пример показывает наиболее рациональную постановку исследований. Изучаются физико-химические данные минералообразования целого класса соединений. В этом мы видим ценность данного комплекса исследований. Для осуществле-

ния задуманного были необходимы соответствующие условия. Они создавались всей предыдущей деятельностью большого коллектива экспериментаторов. Начало деятельности находится в дореволюционном периоде, затем она медленно развивалась в течение почти сорока лет. В настоящее время экспериментаторы обладают теорией, соответствующей аппаратурой и другими возможностями для выполнения сложных исследований.

Первые исследования по **геохимической миграции** элементов заключались в выяснении устойчивости кварца в гидротермальных средах различной щелочности и различного состава [34]. До этого были опубликованы результаты опытов по надкритическим растворам ряда веществ [35]. В них показана зависимость критической температуры от концентрации соли в растворе. Критическая температура растворов повышается до 430° С. В последующих работах были выявлены неустойчивость минералов в гидротермах, а также их переход в раствор и способность элементов к гидротермальной миграции. Тема миграции элементов развивалась и, несколько трансформируясь, стала звучать как растворимость труднорастворимых веществ в гидротермах, как выщелачивание, переход в раствор отдельных элементов или комплексов из минералов.

На 2 Совещании по минералогии, геохимии и генезису вольфрамовых месторождений, проходившем в 1968 г. в ЛГУ, было сообщено о формировании гидротермального рудосодержащего раствора, образующегося при воздействии гидротерм, содержащих хлориды щелочей, на кристаллизующиеся стекла альбитового состава, в которых присутствуют молибден и вольфрам [30]. В этом процессе молибден и вольфрам при кристаллизации альбита переходят в интерстиции, а затем в раствор. Избыток этих элементов способствует возникновению хорошо окристаллизованных новообразований MoO_2 и WO_2.

Таков первый этап развития геохимических исследований по формированию состава гидротерм. Следующий этап — опыты по равновесию хлоридный раствор—гранитный расплав—металл при повышенных температурах и давлениях. Для меди, например, установлено равновесие: содержание в граните $(2—3{,}5) \cdot 10^{-2}$ мас.% Cu — в хлоридном растворе $(1{,}2—1{,}4) \cdot 10^{-1}$ мас.% Cu. Термодинамические расчеты показывают, что в гранитоидах большая часть меди представлена сульфидом [23]. Изучение перехода молибдена в раствор также получило свое продолжение [22]. Другие исследования были сосредоточены на растворимости газов в земной коре, в гидротермальных растворах различного состава. Например, изучавшаяся в течение многих лет миграция CO_2 в высокотемпературных растворах в настоящее время исследуется с точки зрения образования карбонатитов [13, 17, 18]; изучается воздействие щелочных карбонатных растворов на основные породы, образование карбонатного расплава, перемещение его по разломам в вышележащие горизонты и застывание среди них в виде карбонатитов.

Сейчас доминирующее положение в экспериментальных геохимических исследованиях занимает теоретическая физическая химия и термодинамика с их математическим аппаратом. Это следующий этап развития [7, 21], но об этом следует писать отдельно.

Небольшой объем статьи позволил лишь кратко показать на ограниченном числе примеров развитие и существующие тенденции экспериментальной минералогии и геохимии, но и они дают картину развития обоих направлений эксперимента. Особенно следует отметить тенденцию внедрения экспериментальных работ в область интерпретации геологических явлений, в обоснование технологических процессов. Это те моменты, о которых А. Е. Ферсман писал: «...задача современной геохимии — изучение атома в его перемещениях в земной коре как в природных естественных процессах, так и в тех процессах, которые лежат в основе деятельности самого человека» [33, с. 405]. Геохимия, особенно экспериментальная, следуя предвидениям А. Е. Ферсмана, проникает всюду, оставляя везде свой след.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белицкий И. А., Букин Г. В., Топор Н. Д.* Термографическое исследование цеолитов.— В кн.: Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Новосибирск: Наука, 1972, т. 7, с. 255—309.
2. *Гинзберг А. С., Никогосян Хр. С.* О твердых растворах бисиликатов кальция и натрия.— Изв. Геол. ком., 1923, 42, с. 61—85.
3. *Гинзберг А. С., Никогосян Хр. С.* Об искусственном рамзаите.— Изв. Геол. ком., 1924, 43, с. 397—408.
4. *Годовиков А. А., Федорова Ж. Н.* Система Cu_2S—PbS—Bi_2S_3.— В кн.: Экспериментальные исследования по минералогии 1968—1969 гг./Под ред. А. А. Годовикова, В. С. Соболева. Новосибирск: ИГиГ, 1969, с. 42—49.
5. *Годовиков А. А., Кляхин В. А., Федорова Ж. Н., Лейбсон Р. М.* Экспериментальное изучение системы PbS—Bi_2S_3.— В кн.: Материалы по генетической и экспериментальной минералогии. Новосибирск: Наука, 1967, т. 5, с. 10—33.
6. *Годовиков А. А., Белицкий И. А., Богданова В. И.* и др. Некоторые результаты работ лаборатории экспериментальной минералогии ИГиГ СО АН СССР за 1965 г.— Геология и геофизика, 1966, № 8, с. 132—137.
7. *Голубев В. С.* Динамика геохимических процессов. М.: Недра, 1981. 208 с.
8. *Григорьев Д. П.* Изучение магнезиально-железистых слюд.— Зап. Всерос. минерал. о-ва, 1935, ч. 64, вып. 1—2, с. 21—79.
9. *Григорьев Д. П.* Некоторые итоги экспериментальных исследований по искусственному получению амфиболов.— В кн.: Тр. 3-го совещания по экспериментальной минералогии и петрографии. М.: Изд-во АН СССР, 1940, с. 65—68.
10. *Григорьев Д. П.* Синтез и исследование флогопита.— Докл. АН СССР, 1944, 43, № 2, с. 67—69.
11. *Жемчужный С. И., Лебедев П. И.* Обзор работ по термическому и микроскопическому анализу силикатов и солей, произведенных в Лабораториях минералогии и общей химии с 1906 по 1912 г.— Изв. СПб. политехн. ин-та, 1912, 18, с. 225—254.
12. *Иванова В. П., Феодотьев К. М.* О диагностике и количественном определении водных минералов методом термического анализа.— Сов. геология, 1945, сб. 8, с. 81—91.

13. *Кадик А. А., Луканин О. А.* Поведение воды и углекислоты в магматических процессах, определяемое их растворимостью.— Геохимия, 1973, № 2, с. 163—179.
14. *Кляхин В. А., Годовиков А. А., Ягофарова Е. Г.* Гидротермальный синтез свинцово-сурьмяных сульфосолей.— В кн.: Экспериментальные исследования по минералогии 1968—1969 гг./Под ред. А. А. Годовикова, В. С. Соболева. Новосибирск: ИГиГ, 1969, с. 50—57.
15. *Левинсон-Лессинг Ф. Ю.* Экспериментальная петрография.— В кн.: Избранные труды. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1950, т. 2, с. 284—300.
16. *Ломоносов М. В.* Сочинения. Т. 7. Л.: Изд-во АН СССР, 1934. 591 с.
17. *Малинин С. Д.* Растворимость кальцита в растворах $H_2O—CO_2$ (NaCl) при температурах 100—600° С и давлениях до 1000 кг/см^2.— В кн.: Эксперимент в минералогии и петрографии. М.: Наука, 1975, с. 121—127.
18. *Малинин С. Д., Дернов-Пегарев В. Ф.* Растворимость кальцита в высокотемпературных водных растворах щелочных карбонатов и вопросы карбонатитообразования.— Геохимия, 1976, № 5, с. 643—658.
19. *Никогосян Хр. С.* Синтез шпинелей.— Минерал. сырье, 1931, **6**, с. 728—731.
20. *Островский И. А.* Условия минералообразования в некоторых водно-силикатных системах при высоких давлениях и температурах. М.: Изд-во АН СССР, 1957. 39 с. (Тр. ИГЕМ АН СССР; Вып. 9).
21. *Рыженко Б. Н.* Термодинамика равновесий в гидротермальных растворах. М.: Наука, 1981. 191 с.
22. *Рябчиков И. Д., Рехарский В. И., Кудрин А. В.* Мобилизация молибдена магматическими флюидами в ходе кристаллизации гранитных расплавов.— Геохимия, 1981, № 8, с. 1243—1247.
23. *Рябчиков И. Д., Орлова Г. П., Ефимов А. С., Каленчук Г. Е.* Медь в системе гранит — флюид.— Геохимия, 1980, № 9, с. 1320—1326.
24. *Самойлов Я. В.* О воде каолинита.— Изв. Акад. наук. Сер. 6, 1909, **3**, с. 1137—1152.
25. *Самойлов Я. В.* К вопросу о получении термических кривых различных минеральных тел.— Изв. Акад. наук, 1915, **6**, с. 1759—1768.
26. *Сендеров Э. Э., Хитаров Н. И.* Цеолиты, их синтез и условия образования в природе. М.: Наука, 1970. 283 с.
27. Термический анализ минералов и горных пород. Л.: Недра, 1974. 399 с./ /В. П. Иванова, Б. К. Касатов, Т. Н. Красавина, Е. Л. Розинова.
28. *Уразов Г. Г., Влодавец Н. И.* Физико-химическое исследование боровичских огнеупорных глин методом кривых нагревания и кривых обезвоживания.— Изв. Геол. ком., 1925, **44**, с. 240—243; 1926, **45**, с. 821—836.
29. *Феодотьев К. М.* Автоматизация трудоемких методов термического анализа.— В кн.: Тр. 4-го совещания по экспериментальной минералогии и петрографии. М.: Изд-во АН СССР, 1953, вып. 2, с. 121—132.
30. *Феодотьев К. М.* О формировании гидротермального раствора, содержащего вольфрам и молибден.— В кн.: Минералогия и геохимия вольфрамовых месторождений. Л.: Изд-во ЛГУ, 1971, с. 310—316.
31. *Ферсман А. Е.* По вопросу о генезисе минералов и их взаимных превращениях.— Тр. СПб. о-ва естествоисп.: Протоколы заседаний, 1912, **43**, вып. 1, с. 255—278.
32. *Ферсман А. Е.* Исследования в области магнезиальных силикатов. Группы циллерита, церматита и палыгорскита.— Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1952, т. 1, с. 124—512.
33. *Ферсман А. Е.* Институт имени М. В. Ломоносова и задачи его учреждений.— Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1953, т. 2, с. 403—442.
34. *Хитаров Н. И.* Экспериментальная характеристика устойчивости кварца и миграции кремнезема в гидротермальных условиях.— В кн.: Тр. 4-го совещания по экспериментальной минералогии и петрографии. М.: Изд-во АН СССР, 1953, вып. 2, с. 180—186.
35. *Хитаров Н. И., Иванов Л. А.* Исследования в области критических температур водных растворов.— В кн.: Тр. 2-го совещания по экспериментальной минералогии и петрографии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1937, с. 167—176.

36. *Цветков А. И.* Динамическое взвешивание при нагревании как метод фазового анализа минеральных образований.— В кн.: Тр. 4-го совещания по экспериментальной минералогии и петрографии. М.: Изд-во АН СССР, 1951, вып. 1, с. 8—19.
37. *Чирвинский П. Н.* Искусственное получение минералов в XIX столетии. Киев: Киев. ун-т, 1903—1906. 638 с.
38. *Щербина В. В.* Гидротермальный синтез сульфидов, селенидов и теллуридов.— В кн.: Тр. 3-го совещания по экспериментальной минералогии и петрографии. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940, с. 133—135.

УДК 550.8

Л. Н. ОВЧИННИКОВ

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОХИМИИ

Значительный прогресс в геологических науках в последние десятилетия во многом связан с бурным развитием геохимии и широким внедрением в различные геологические исследования геохимических методов. Благодаря применению в геохимии новых и новейших методов исследования вещества, изучения зависимости его состава, строения и свойств от геологических условий нахождения при использовании пространственно-статистического анализа и других логико-математических методов удалось заметно продвинуться в познании механизмов и закономерностей отдельных природных процессов и причин, ими управляющих. В настоящее время в качестве одной из самостоятельных областей геологических наук формируется *геохимия рудных месторождений* — одно из важнейших направлений прикладной геохимии.

Впервые понятие *прикладной геохимии* ввел А. Е. Ферсман, который, как никто, умел связывать самые отвлеченные и сложные вопросы геохимии с конкретными задачами обеспечения минерально-сырьевой базы нашей страны. Он писал: «Применение законов и выводов геохимии к проблемам практического характера заставило выдвинуть целую область геохимических дисциплин — прикладную геохимию, которая развивалась в двух направлениях: с одной стороны, законы распределения элементов... приводили нас к очень важным практическим выводам и намечали новые пути поисков, разведок и даже эксплуатации месторождений, с другой стороны — принципы и методы кристаллохимии и теоретической геохимии позволили решать ряд важных и трудных технологических задач... Мы должны особое внимание остановить на топогеохимии — на работах по изучению законов распределения и совместного нахождения элементов в земной коре и связи этих законов с процессами геологического и геохимического характера» [24, с. 819].

Одним из главных вопросов прикладной геохимии является проблема поисков минерального сырья, поисков месторождений

полезных ископаемых. «*Учение о полезных ископаемых есть часть современной геохимии, и вне методов геохимического и минералогического анализа оно развиваться не может.* Отсюда совершенно понятна и огромная роль, роль руководящая во всех стадиях геологической работы по изучению месторождений полезных ископаемых, прежде всего при *поисках*, где только на основе геохимических идей может идти планомерное накопление материала, *в разведках*, где приходится учитывать зональное распределение элементов вокруг массивов или по тектоническим линиям, при *эксплуатации*, где лишь законы геохимии и химии геопроцессов могут дать освещение распространения или изменения рудного комплекса с глубиной и т. д.» [24, с. 38].

А. Е. Ферсман прозорливо видел и подчеркивал, что «для наших масштабов и для наших темпов *только новые геохимические и геофизические методы смогут в ближайшие годы дать стране нужное сырье — в нужном количестве, нужного качества и в соответствующих местах*» [25, с. 6]. Это писалось в 1938 г., но справедливо и свежо и сейчас, спустя несколько десятков лет. Дальнейшее развитие прикладной геохимии дало возможность XXVI съезду КПСС в «Основных направлениях экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года» указать на необходимость «более быстрыми темпами развивать прогрессивные виды геофизических и геохимических исследований недр» [17, с. 32]. Это весьма важно, так как, вслед за А. Е. Ферсманом, мы также твердо уверены, «что практически проблема поисков полезных ископаемых, по существу своему, проблема чисто геохимическая» [23, с. 451]. Однако при этом следует всегда помнить, что «*геохимический метод имеет значение лишь в тесной и гармонической увязке с методами геологии*» [25, с. 7]. На категорическую необходимость увязки геохимических исследований с геологией самым решительным образом неоднократно обращал внимание сам основатель прикладной геохимии и один из основателей науки геохимии вообще А. Е. Ферсман. Эта мысль проходила сквозной нитью через все многочисленные его труды. Он писал, что «применение идей геохимии к практическим проблемам поисков и разведок весьма эффективно и что геохимия при выявлении ископаемых богатств займет весьма видное место, если она будет умело сочетаться с данными геологического (в первую очередь тектонического), петрографического и стратиграфического характера» [23, с. 443]. И далее: «Нельзя переоценить роль тектоники в геохимических процессах, и нет никакого сомнения, что только тесная и углубленная связь геотектоники и геохимии может привести к точной формулировке законов распределения и перемещения веществ в земной коре и образования мсторождений» [23, с. 621]. «Нет никакого сомнения, что точный прогноз при поисках полезных ископаемых должен быть основан прежде всего на хорошем знании петрографического состава пород, тектонических особенностей района, его прошлой геологической истории. Каждое из этих явлений предоп-

ределяет тип концентрации химических соединений, и поэтому только глубокий анализ всей геологической картины данного района может помочь геохимику в решении поставленных им задач» [23, с. 517].

К сожалению, геохимики-поисковики, прикладники, весьма слабо опираются в своих работах и даже выводах на геологию, на знание тектоники, петрографии. Отсюда и еще пока относительно малая эффективность таких работ. Только этим можно объяснить наличие в настоящее время в стране ста тысяч неоцененных геохимических аномалий.

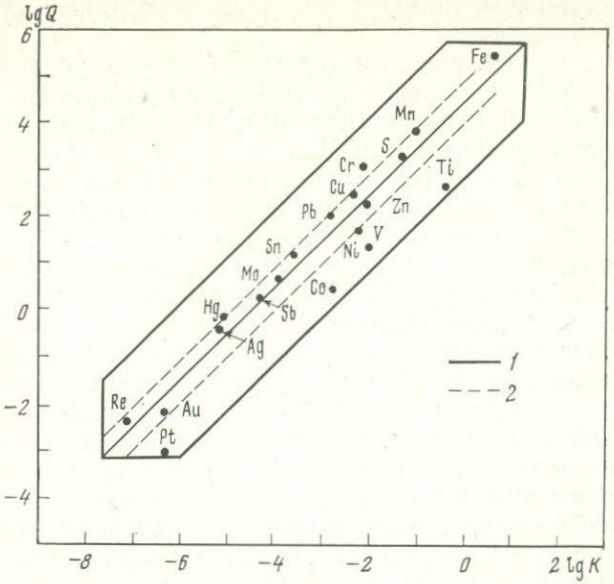
Развитие прикладной геохимии в стране после А. Е. Ферсмана связано с именами А. П. Виноградова, В. Л. Барсукова, А. А. Беуса, И. И. Гинзбурга, С. В. Григоряна, А. Н. Еремеева, Е. М. Квятковского, В. И. Красникова, К. М. Лукашова, Л. Н. Овчинникова, А. И. Перельмана, В. В. Поликарпочкина, А. А. Саукова, Н. И. Сафронова, А. А. Смыслова, А. П. Соколова, Л. В. Таусона, В. В. Щербины и многих других исследователей. За рубежом важные работы в этой области выполнили Р. И. Аллан, Х. Блум, Р. В. Бойл, Р. Г. Гаррет, Е. Камерон, А. Левинсон, Я. Никол, Дж. С. Уэбб, Х. Е. Хокс и др.

Общие основы

А. Е. Ферсман не только ввел понятие прикладной геохимии, но и заложил ее фундаментальные основы. Дальнейшее развитие прикладной геохимии в основном заключалось в разработке и детализации его идей, намеченных им путей, поставленных проблем. И это несмотря на то, что прикладная геохимия росла и развивалась не только вглубь, но и значительно вширь. Геохимические поиски, геохимия минерального сырья — главнейший раздел прикладной геохимии, но не единственный. В настоящее время мы с полным правом можем рассматривать прикладную геохимию как отрасль науки, прилагающую геохимическую методологию, комплекс геохимических методов анализа, синтеза, интерпретации к решению различных задач и проблем геологии, петрологии, тектоники, стратиграфии, учения о полезных ископаемых и других геологических наук, а также задач и проблем технологии минерального сырья, взаимоотношений человека и природы (экогеохимия, техногеохимия, агрогеохимия).

Можно сказать также, что прикладная геохимия по своему существу — это геохимия *индикаторов* — закономерностей распространения и взаиморасределения в пространстве и времени химических элементов-примесей как естественных следов проявления различных геологических процессов. Отсюда кардинальной основой прикладной геохимии являются, с одной стороны, учение о *кларках*, а с другой — всеобщий закон многоликой *геохимической зональности* как следствия неизбежной непрерывной дифференциации вещества Земли.

Понятие «кларк» было введено А. Е. Ферсманом в 1923 г. как определяющее относительное количество атомов данного элемента в данном космическом теле и его части. Оно характеризует частоту, распространенность, среднее содержание элементов. В январе 1941 г. А. Е. Ферсман писал: «Сейчас, после долгой, полувековой работы, геохимия овладела новым числом — новой константой мира. Долго к ней относились скептически и химики, и геологи, и геофизики, и только сейчас мы начинаем понимать, что число, определяющее относительное количество какого-либо элемента в космосе, есть величайшая константа... Даже в условиях земной коры кларк есть функция времени и места, величины кларков меняются в зависимости от условий, в которые поставлен атом» [25, с. 534]. В настоящее время всем ясно, что эта величина имеет весьма большое значение в прикладной геохимии, в познании процессов рудообразования, при поисках. Достаточно сказать, что масштабы накопления металлов в рудных месторождениях определяются степенью их распространения в земной коре (фиг. 1). Между средними содержаниями химических элементов в земной коре — кларками — и запасами этих элементов в месторождениях, а также содержаниями в рудах существует прямая связь [12, 13]. Зависимость накопления металлов в месторождениях от их кларков раскрывается не только в глобальном выражении. Она относится к совокупности месторождений также и отдельных территорий: континента, крупного государства, рудной провинции и проявляется даже в пределах отдельной рудной формации [14]. Соотношение запасов ассоциации металлов в совокупности месторождений внутри какой-либо рудной формации, провинции, рудного узла отвечает соотношению кларков этих металлов в породах первоисточника. Эта важная закономерность — прямое свидетельство того, что среднее содержание химического элемента в какой-либо естественной геохимической системе — величина постоянная. Всякое статистически значимое отклонение от кларка в ту или иную сторону причинно обусловлено и тем самым пригодно для широкого использования в прикладных целях. Как показывает практика, для оценки промышленной значимости конкретных случаев таких отклонений в сторону накопления иногда может быть достаточным и сопоставление местных значений содержания металла с его глобальным кларком пород того или иного типа. Однако в связи с пространственной и временно́й латеральной и вертикальной неоднородностью состава геологических образований земной коры более эффективно использование уровня так называемого местного геохимического фона (нормального поля) — «нормальных» средних содержаний химических элементов в различных исследуемых типах горных пород данного района или рудного поля. В связи с этим вполне уместно принятие и развитие представлений не только о кларках земной коры в целом, но и о кларках горных пород, провинциальных (региональных) кларках.



Фиг. 1. Соотношение между кларками (K) халькофилов и сидерофилов и их мировыми запасами (Q) в рудных месторождениях

1 — толерантные пределы; *2* — стандартное отклонение

В основе всех геологических процессов, включая и образование рудных месторождений, лежит главный геохимический закон — закон дифференциации вещества Земли, определяющий зональность распределения металлов во всех измерениях и на всех уровнях организации вещества. Единый закон геохимической зональности обусловливает как мегазональность земного шара, земной коры и верхней мантии, так и макрозональность структурно-формационной зоны, интрузивной зоны, рудной благоприятной зоны, рудной провинции, узла, рудного поля, макрозональность ореолов распространения ассоциаций характерных химических элементов вокруг интрузивов и рудных месторождений, внутри рудных тел, осадочных толщ и региональных метасоматических формаций, в связи с глубинными разломами и другими рудоконтролирующими элементами, а также во многих других случаях.

Одной из главных проблем прикладной геохимии, геохимии рудных месторождений, является предыстория рудообразования, имеющая кардинальное значение для металлогенических и прогнозных построений, для понимания причин возникновения месторождений и раскрытия закономерностей их распределения, генетических связей с общегеологическими процессами и продуктами этих процессов. Таким образом, все виды, типы и ранги многоликой геохимической зональности распределения металлов, а так-

же других элементов-индикаторов имеют то или иное существенно прикладное значение.

В схеме геохимической зональности разных уровней можно выделить, по крайней мере, 12 рангов: I — Солнечной системы; II — планетарный, корово-мантийный; III — коровый; IV — платформенно-геосинклинальный; V — блоковый, наборов геологических формаций в отдельных блоках; VI — формационный, интрузивный, рудного узла; VII — рудного поля, комплексного ореола; VIII — рудного месторождения и его ореола; IX — рудного тела и его ореола; X — парагенетических минеральных ассоциаций, типов и сортов руд; XI — минеральный агрегатный; XII — минеральный монокристальный. Рангам с IV по X соответствуют также уровни зональности, связанной с разломами разной степени региональности. Ранги I—VI принадлежат к региональной зональности, а начиная с VII и ниже — к локальной.

Зональность разных классов, типов, видов и рангов выявляется с помощью могучего метода пространственно-статистического анализа изменения ряда геохимических величин и параметров, опирающихся на простейшие данные. К главнейшим типам и видам геохимической зональности, важным в прикладном отношении, принадлежат следующие:

А. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

Внутренняя	Региональная	Внутримагматическая	Плутоническая Вулканическая
		Метаморфическая	Стратиграфическая Стратозональная Латеральносекущая Латеральнозональная
		Ультраметаморфическая	Стратозональная Латеральнозональная
		Осадкообразования	
	Локальная	Внутриразломная Внутрирудная	
Внешняя	Региональная	Околоинтрузивная Околоэффузивная Околоразломная	
	Локальная	Околорудная Околоразломная	

Б. ГЕОЛОГИЧЕСКИЕ ТИПЫ ВРЕМЕННОЙ ГЕОХИМИЧЕСКОЙ ЗОНАЛЬНОСТИ

Предрудногроцессная	
Синрудногроцессная	Прегенетическая Сингенетическая Эпигенетическая
Пострудногроцессная	Гипогенная Гипергенная

Относительно земной коры	Вертикальная Латеральная Радиальная
Относительно объекта	Монозалежная Комплексная (группы залежей) Поперечная Продольная («осевая») Диагональная
По внутреннему строению	Симметричная Асимметричная Непрерывно-монотонная Дискретная Волновая
Относительно направления движения растворов	Продольная Поперечная Диагональная

Все прикладные геохимические исследования, собственно говоря, сводятся к раскрытию и использованию проявлений зональности. С этой целью изучаются содержание и тренд его изменения элементов-индикаторов в интересующих объектах, изучаются соотношения элементов-индикаторов друг с другом и с главными химическими элементами, а главное — выясняется зависимость этих разнообразных соотношений и их трендов от соответствующей геологической обстановки, вида, типа, происхождения объекта и прочих геологических параметров. Особенно важным представляется использование количественных геохимических показателей, из которых в первую очередь следует назвать запасы главных металлов и металлов-спутников отдельных месторождений, их групп и совокупностей, характеризующие масштабы рудного процесса и их зависимость от генетических и геологических факторов (см., например, [14]). Качественный показатель, выражаемый через содержание элементов в руде, — величина для характеристики рудного процесса менее устойчивая, зависящая от условий рудоотложения, объемов рудной массы и других геологических факторов. Более точен, устойчив и объективен в различных сопоставлениях количественный показатель — запасы металла.

Геохимические поиски

В настоящее время для поисков месторождений полезных ископаемых успешно применяется широкий комплекс непрерывно совершенствующихся геохимических методов: литохимических, атмохимических, гидрогеохимических, биогеохимических. Наибольших развития и эффективности достигли литохимические методы поисков по вторичным ореолам и потокам рассеяния и в

особенности методы первичных гипогенных ореолов. В основе теории геохимических методов поисков рудных месторождений лежит концепция, рассматривающая процесс образования месторождений как единственно возможный переход металлов от изначально рассеянного состояния в земной коре и мантии к концентрированному с многоступенчатой дифференциацией при этом, что приводит к обязательному образованию первичных геохимических ореолов. Возникновение вторичных гипергенных ореолов рассеяния, связанное с разрушением месторождений и их первичных ореолов, является единственно возможным обратным процессом — переходом, также дифференциальным, от концентрации вновь к рассеянию.

Методика геохимических поисков по **первичным ореолам**, опирающаяся на единую зональность последних [1], основана на модели формирования эндогенных рудных месторождений, в соответствии с которой месторождение включает в себя рудное тело и первичный геохимический ореол, составляющие генетически и пространственно единое целое. Ореолы и рудные залежи месторождений халькофильных и сидерофильных элементов независимо от их генетического типа и первоисточника растворов и металлов образуются из универсального, стандартного в своей основе, рудообразующего раствора в сходных физико-химических условиях, меняющихся в одном и том же диапазоне. При определенном разнообразии компонентов и переносимых металлов основой всякого рудоносного раствора всегда остается газированная вода, в которой осаждающиеся металлы находятся в виде комплексных соединений с очень близкими термодинамическими свойствами при единой стехиометрии.

В основе ореолообразования лежит трещинный метасоматоз, при котором конвективный перенос вещества по трещинам сочетается со сложным турбулентным движением раствора в неравномерно-пористой среде. Медленно движущийся гидротермальный раствор и трещинно-поровое пространство отложения создают хроматографическую систему, в которой в условиях снижающейся температуры происходит закономерно последовательная смена осажденных соединений металлов по направлению движения раствора. Эта смена для сульфидсодержащих месторождений передается универсальным зональным рядом (от тыла к фронту): вольфрам—бериллий—олово—уран—молибден—кобальт—никель—висмут—медь—золото—цинк—свинец — серебро—кадмий—ртуть—мышьяк—сурьма—барий [7]. Такое зональное распределение металлов определяется разной устойчивостью их хлоридных комплексов, в виде которых в основном переносятся металлы. Константа устойчивости комплекса соответствующего металла строго определяет его место в зональном ряду. Эта зависимость последовательности осаждения настолько велика, что раствор, наряду с привносом, извлекает неравновесные металлы по ходу колонки из вмещающих пород и переносит их дальше (выше) на свое место в ряду.

Вторичные ореолы рассеяния элементов-индикаторов аналогично первичным ореолам сульфидных гидротермальных месторождений формируются при гипергенезе также с тенденцией проявления единой стандартной зональности. Это определяется влиянием на состав продуктов окисления и ход самого процесса достаточно стандартного состава главных минеральных ассоциаций первичных сульфидных руд. Степень подвижности металлов-индикаторов и их место в зональном ряду определяются растворимостью и устойчивостью их соединений (в первую очередь сульфатов) в водной среде зоны окисления. Обобщенный ряд гипергенной зональности, как и частные ряды, относящиеся к отдельным месторождениям, отчетливо разделяется на две части: к первой принадлежат подвижные элементы — кобальт, никель, цинк, мышьяк, олово, медь, образующие легкорастворимые продукты окисления (в большинстве сульфаты) преобладающих первичных рудных минералов; ко второй — малоподвижные элементы — молибден, висмут, свинец, вольфрам, серебро, барий, растворимость которых в той же подкисленной воде падает на несколько порядков. Гипергенный ряд подвижности металлов, основанный на степени растворимости их сульфидов в воде, будет таким (в скобках — растворимость сульфидов (в г/100 г) при 20° С): Zn (96,5) > Ni (75,6) > Co (34,4) > Cu (31,6) > Sn (19) ≫ Ag (0,79) > Mo (0,1) > Pb (0,0041) > Ba (0,00023) > Bi (0,00014) > W (труднорастворим).

Большое практическое значение ряда гипергенной подвижности элементов заключается прежде всего в возможности выбора элементов, вторичные ореолы которых в большей степени соответствуют первичным и поэтому являются более надежными их индикаторами. Очевидно, что в первую очередь такими будут слабоподвижные в гипергенных условиях элементы (трудные мигранты), содержащиеся в первичных ореолах в необходимых концентрациях. Не менее важно для определения природы и перспективности экзогенных геохимических аномалий знание закономерностей экзогенного перераспределения химических элементов в различных ландшафтно-геохимических условиях, а также выявление геохимических барьеров, связанных с резкой сменой условий миграции элементов-индикаторов [28].

Для применения **гидрогеохимических методов** весьма важна дифференциальная подвижность элементов-индикаторов в подземных водах, выявленная гидрогеохимиками в рудно-ореольных зонах сульфидных месторождений. Степень миграции, подвижности металлов в водах хорошо согласуется с их положением в ряду гипергенной литохимической зональности. Собственно говоря, это явления одного порядка, открывающие новые перспективы повышения эффективности гидрогеохимических методов поисков, в любом случае способствующих более точной и эффективной интерпретации литохимических данных. Соответствие поведения металлов в подземных водах универсальному ряду зональности первичных ореолов было подмечено Г. А. Голевой [5], подчерк-

нувшей, что между зональностью водных и солевых ореолов в зоне гипергенеза рудных месторождений, как и между рядами зональности элементов-индикаторов в глубоких термальных водах и эндогенных ореолов, имеется большое сходство.

Подмеченные закономерности образования первичных, вторичных литохимических и гидрогеохимических ореолов весьма наглядно показывают, какими многообещающими могут быть комплексные практические исследования, выполненные на единой теоретической основе.

В последние годы все большее распространение получают атмохимические (газовые) методы поисков рудных месторождений [36]. Земная кора (и верхняя мантия) непрерывно выделяет в атмосферу значительные количества различных газов. Это выделение приурочено к определенным локальным участкам, в первую очередь к зонам глубинных разломов и сопровождающим их трещинам разнообразных масштабов. Поток газов усиливается при наличии в таких зонах рудных залежей. Газовая фаза является неотъемлемой составляющей при образовании эндогенных рудных месторождений, сохраняется она также и в пострудный период. В гипергенных условиях в поверхностных частях рудных залежей появляются газовые продукты процесса окисления руд. Иными словами, газы различного генезиса и состава сопровождают рудные месторождения в течение всего времени их существования. Это дает возможность использовать газы в качестве весьма чувствительных индикаторов как при структурном картировании с выделением разломов различного возраста, происхождения, глубинности, так и при поисках скрытых рудных месторождений с попутной или предварительной фиксацией рудоподводящих, рудоконтролирующих и рудовмещающих структурных элементов. Газовые ореолы рудных месторождений имеют обычно поликомпонентный состав. В него в первую очередь входят углекислота, водород, метан, кислород, азот, гелий, радон, торон, аргон, сероводород, ртуть; из других газовых компонентов можно указать связанный с сульфидными месторождениями сернистый газ (SO_2), мало изученные пары галоидов (фтор, хлор, иод и бром).

Наиболее распространенными атмохимическими методами поисков рудных месторождений являются газортутный и гелиевый. Создана специальная полевая аппаратура, которая за сравнительно короткий срок позволила, особенно при использовании газортутного метода [27], не только выявить перспективные разломы, но и обнаружить новые месторождения. Существование глубинного потока гелия установлено многими исследователями. Методические работы и поиски, проводимые в СССР, показали интересные возможности применения гелиевого метода в металлогенически-прогнозных целях и для поисков [32]. Растет число опытно-методических работ, посвященных изучению возможности поисков рудных месторождений по ореолам обычных газов [26]. Специфические особенности имеют газовые методы поисков

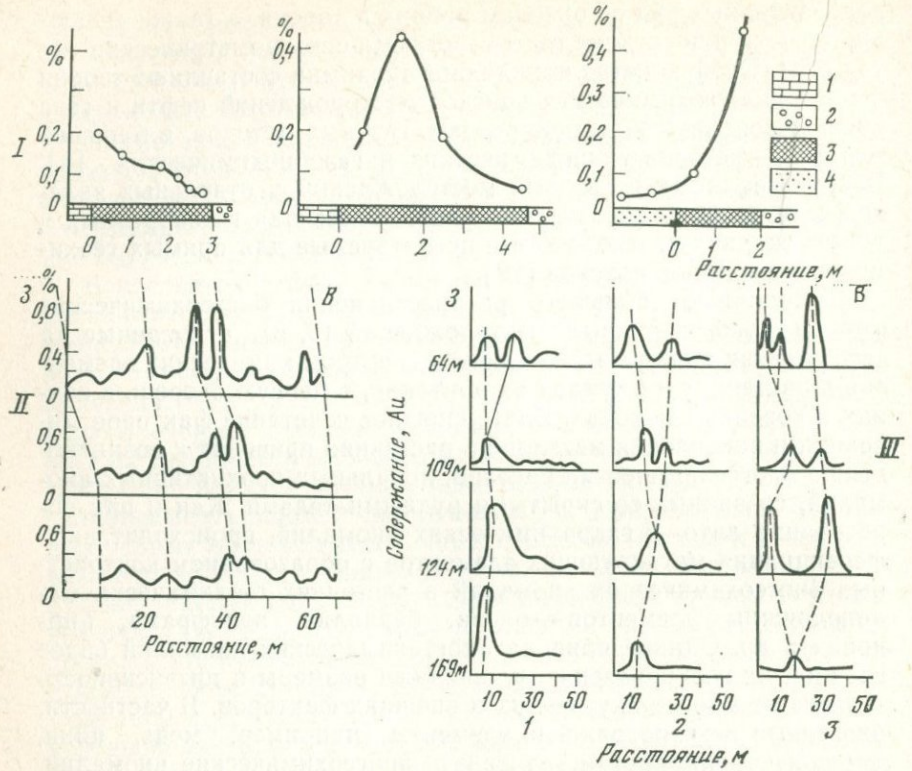
радиоактивных руд по ореолам радона и торона, а также делающий успехи в последние годы аэрогамма-спектрометрический метод [29]. Особую ветвь прикладной геохимии составляют теория и методика геохимических поисков месторождений нефти и газа с использованием в первую очередь газовых методов, в меньшей степени — методов гидрохимических и газобиохимических [4]. Вокруг нефтяных и газовых месторождений и отдельных залежей закономерно образуются ореолы рассеяния газообразных и легких жидких углеводородов, используемые для прямых геохимических методов поисков [22].

Заслуживают большего распространения **биогеохимические методы** поисков рудных месторождений [9, 8], основанные на тесной связи между содержанием и спектром химических элементов в растениях и в средах их обитания, в первую очередь в почвах и коренных породах. Благоприятное сочетание факторов миграции и накопления металлов в растениях приводит к возникновению биогеохимических ореолов, локальных продуктивных аномалий, связанных со скрытыми рудными телами. Как и при образовании лито- и гидрохимических аномалий, происходит дифференциация мигрирующих элементов с образованием контрастных биогеохимических аномалий в растениях геохимически малоподвижных элементов — олова, бериллия, вольфрама, циркония и др. Однако природа биогеохимических аномалий более сложна, их возникновение, площадные размеры и интенсивность зависят от многих внутренних и внешних факторов. В частности, биогенные легкоподвижные элементы (например, медь, цинк, марганец, молибден) могут давать биогеохимические аномалии, не связанные с оруденением [8].

Геохимия рудных тел

Геохимический закон дифференциации вещества находит отражение и в распространении металлов-спутников в рудных месторождениях [10, 11]. Собственно содержания всех элементов-примесей обнаруживают закономерную направленную изменчивость внутри рудных тел, залежей и зон, определяемую условиями образования месторождений. Эти закономерности имеют универсальный характер, и их нельзя не учитывать при опробовании и оценке металлов-спутников, при характеристике распределения вредных примесей и качества руд основного металла.

Внутри рудных тел, залежей и зон элементы-примеси распределены весьма неравномерно, и их содержание в слагающих руду минералах подвержено значительным колебаниям. В общем случае содержания элементов-примесей при их распространении в рудных телах и минералах достигают определенных максимумов (фиг. 2), представляющих в разрезе и плане точки и линии, а в пространстве — поверхности, в стороны от которых наблюдается закономерное падение их значений. Эти максимумы всегда строго фиксированы, отвечая в каждом случае соответствующей



Фиг. 2. Пространственное распределение элементов-примесей в минералах и рудах эндогенных рудных месторождений

I — содержание кобальта в пирите медных руд Турьинских месторождений, поперечные разрезы (варианты с одним максимумом): *1* — известняки; *2* — пироксен-гранатовые скарны; *3* — массивные сплошные руды; *4* — бедные вкрапленные руды.

II — содержание фосфора в сплошных магнетитовых рудах Первого Северного рудника, план с тремя поперечными сечениями.

III — содержание золота (в усл. ед.) медных рудах колчеданного месторождения, три вертикальных сечения: *1* — южная часть; *2* — средняя часть; *3* — северная часть

геологической обстановке, определенным участкам рудных тел, залежей, зон. Максимумы содержаний различных элементов-примесей в различных минералах, как правило, пространственно совпадают.

В основе образования рудных тел лежит трещинный метасоматоз, при котором ламинарный конвективный перенос вещества по трещинам сочетается со сложным турбулентным движением раствора в пористой среде. Концентрация рудообразующих элементов в процессе формирования месторождения в силу большого их исходного содержания быстро выравнивается на большом пространстве с созданием рудных тел. Благодаря малой концентрации элементы-примеси, независимо от химической природы и

внутренних свойств, при перемещении в стороны от трещин всегда обладают меньшей подвижностью по сравнению с основными рудообразующими элементами, элементами преобладающими, и всегда отстают от них. Содержание элементов-примесей в соответствии с законами диффузии или закономерностями фильтрации падает по мере удаления от первоначальных путей следования растворов (питающих каналов свободной циркуляции).

Поскольку содержание элементов-примесей всегда падает с удалением от путей свободного продвижения растворов, постольку максимумы их содержаний в рудах в целом и в минералах в частности обозначают те каналы и пути поступления растворов в зону рудоотложения, которые существовали в период образования рудных тел. Изучение пространственного распределения элементов-примесей в рудных телах, как вкрапленных, так и сплошных, дает великолепную возможность раскрытия геохимическим путем их внутреннего строения и механизма формирования, способствуя тем самым методически правильной постановке поисковых, разведочных и даже эксплуатационных работ.

Естественно, что в небольших рудных телах, в телах с простым строением трещинных путей течения и распределения растворов, отмечаемых в настоящее время максимальными содержаниями примесей в минералах и рудах, существовало немного. Иногда для этого достаточно было наличия одной трещины или узкой зоны. В крупных залежах, в залежах, образовавшихся в сложной геологической обстановке, таких трещин-путей притока растворов находилось значительное количество. Распространение растворов может быть не только фронтальным, но и радиальным. В последнем случае падение содержаний элементов-примесей закономерно происходит также и по простиранию рудных тел. При перемещении растворов по радиусу на сравнительно небольшие расстояния возникают рудные столбы.

Геохимические основы металлогении и прогноза

Основным выражением результатов металлогенических и прогнозных исследований, их синтезом являются соответственно металлогенические и прогнозные карты. А. Е. Ферсман придавал большое значение геохимическому картированию, рассматривая его как одно из важнейших направлений прикладной геохимии. Понимая под геохимическим картированием «установление пространственного распределения как на поверхности, так и в глубинах отдельных химических элементов» [23, с. 529], он наметил основные принципы составления геохимических карт и их возможные типы. В настоящее время проникновение геохимии в металлогенические построения и основы прогнозирования становится все более глубоким и значительным.

Металлогения и прогноз опираются на органическое сочетание геологических и геохимических закономерностей размещения и условий образования промышленных рудных концентраций.

В основе последних, как уже было сказано, лежит закон дифференциации, зональности распределения металлов. Чем большее раскрытие и отражение на металлогенических и прогнозных картах получают параметры и коэффициенты различных видов, типов, классов и рангов зональности, тем полнее и информативнее становятся эти карты, а прогноз — все более достоверным. Металлогенические и прогнозные карты, помимо прямых признаков оруденения, должны нести мощную и обильную целенаправленную геохимическую информацию, вытекающую из конкретных рудоуказующих проявлений основного закона зональности и его следствий на данной площади, в данном объеме.

Каждое геологическое образование, каждая порода, свита, пласт и пр. имеет свое геохимическое лицо. Из всего геохимического спектра выделяется комплекс — набор элементов-индикаторов, могущий служить в данном случае показателем потенциальной или конкретной рудоносности. При этом имеет значение не просто присутствие тех или иных элементов-индикаторов, а их количественные соотношения, выражаемые через различные коэффициенты и их сочетания. Важное значение при этом имеют: а) показатели потенциальной рудоносности, основывающейся на первичной геохимической характеристике пластов, массивов, блоков, геологических и петрографических фаций и формаций как результате предрудноцроцессной дифференциации; б) показатели потенциальной рудоносности тектонических зон, отдельных геологических структур и структурно-тектонических элементов, отражающие их синрудноцроцессную геохимическую специализацию; в) показатели потенциальной рудоносности региональных метасоматических зон и формаций на основе той же синрудноцроцессной специализации.

Необходимо осуществление перехода от потенциальной рудоносности к показателям истинной рудоносности через уже известную рудоносность и рудоносность, выявленную при использовании специальных горных и буровых работ.

Существенным элементом карт металлогении и прогноза должны служить векторы обнаружения месторождений как отражение тренда изменчивости соответствующих параметров, используемых в порядке последовательного сокращения размеров перспективных площадей. Должны найти свое место также и показатели уровня эрозионного среза рудонесущих формаций в обязательном сочетании с гипсометрическим уровнем продуктивности. В менее изученных районах имеет значение введение коэффициента рудоносности отдельных площадей, блоков, продуктивных пластов и свит. Особое значение геохимический закон зональности и его конкретные следствия имеют в стереометаллогении и в стереопрогнозе.

Пространственно-статистический анализ зависимости геохимических показателей от геологической обстановки, конкретных геологических факторов — мощное оружие прогноза. Например, его приложение к Алтайской колчеданоносной провинции позво-

лило выявить комплекс факторов, благоприятных для образования крупного промышленного оруденения [14]. К ним последовательно относятся:

1. Статиграфический контроль	Наличие главной рудовмещающей дацит-липаритовой формации (около 90% месторождений и запасов)
2. Тектонический контроль	Приуроченность к зонам поперечных глубинных разломов (84% запасов в зоне до 14 км от разлома)
. Глубинный контроль	Степень удаления от поверхности базальтового слоя (более 80% запасов в зоне 16—20 км)
4. Гипсометрический контроль	Нахождение в определенном интервале абсолютных отметок (74% запасов в интервале от +200 до —200 в Алейско-Иртышской зоне, от +600 до +200 в Змеиногорско-Зыряновской зоне)
5. Геохимический контроль	Определенное соотношение в породах и аномалиях показателя (Pb + Zn)/2Cu (для Алейско-Иртышской зоны должно быть более 0,5, для Змеиногорско-Зыряновской — свыше 2,0)

Пространственный анализ этих факторов и их взаимоналожение дают возможность последовательного сужения прогнозных площадей при каждом очередном введении факторов от первого к пятому [15].

Важное значение для металлогении и прогноза имеет региональная околоинтрузивная зональность. Магматическая деятельность в каждом отдельном случае не определяется только внедрением расплава и становлением интрузива. Флюиды, сопровождающие и частично опережающие в движении расплав, облегают этот расплав, как кокон, устремляясь от него не только вверх, но и в стороны. Следы прохождения этих флюидов образуют околоинтрузивные ореолы. По такому ореолу, его размерам, конфигурации, ориентации, составу элементов-индикаторов, их концентрациям и соотношениям, геохимической зональности и прочим признакам можно различать генезис и механизм образования интрузива, глубину его становления и, что не менее важно, его металлогеническое лицо, степень возможной рудоносности. Исследования околоинтрузивных ореолов, их металлогенического значения только начинаются. В качестве примера можно указать на Талнахскую габбро-долеритовую интрузию, породившую, как известно, концентрации медно-никелевых руд; околоинтрузивные и внутриинтрузивные геохимические ореолы этой интрузии были изучены О. П. Разгоновым [21].

Формирование рудных месторождений в осадочном цикле также связано со вторичным перераспределением металлов, с движением, что влечет за собой также закономерное зональное распределение металлов-индикаторов. Так, например, во впадинах Красного моря, как известно, происходит накопление ряда металлов с образованием крупных месторождений. Одновременно с поступлением металлов во впадины происходит и их рассеяние; в результате этого в донных осадках на протяжении

12 км от источника образовался ореол рассеяния железа, цинка, марганца, меди, ртути [30]. Такие протяженные ореолы внутри продуктивных свит были возможны и в древнее время; в соответствующих рудных провинциях, особенно в складчатых областях, подобные ореолы могут иметь прогнозно-поисковое значение.

Геохимические индикаторы геологических процессов

Как уже было отмечено, содержание редких и рассеянных элементов, элементов-примесей, не только в земной коре в целом, но и в отдельных ее зонах и блоках, в слагающих ее геологических формациях и комплексах представляет важнейшую величину, служащую чувствительным индикатором геологических процессов и явлений. Привлечение геохимии в целом и данных о рассеянных в породах элементах в качестве индикаторов становится все более широким и разнообразным, знаменуя бурное развитие этого направления прикладной геохимии. Переход на более высокий уровень исследований на основе тонкой аналитической геохимии значительно расширяет наши возможности познания сути и закономерностей многих геологических процессов, удивительного явления полигенности и конвергентности минеральных парагенезисов.

Среди достижений индикаторной геохимии можно назвать выявление комплекса критериев происхождения различных месторождений, распознавания источников рудного вещества, источников рудообразующих растворов, критериев связи магматизма и рудообразования, метаморфизма и рудообразования, установления генетического разнообразия изверженных горных пород, хода эволюции магматизма, метаморфизма, осадкообразования и других процессов.

В последнее время [28, 29, 31, 33—35, 37—42] в качестве геохимических индикаторов различных геологических процессов все более привлекаются, например, сравнительные данные о содержании и распространении отдельных редких земель и их соотношениях. Большое значение приобретают также соотношения таких стабильных и радиогенных изотопов, как стронций, неодим и др. Эти соотношения широко используются для раскрытия и трактовки взаимоотношений земной коры и мантии, развития земной коры, ассимиляции и контаминации магматических расплавов, для создания петрогенетических моделей смешения магм, химической эволюции земной коры и мантии, для раскрытия происхождения метаморфических и ультраметаморфических комплексов и при решении других вопросов глобальной геологии и петрологии. Привлекаются геохимические индикаторы для химических подходов к орогенезу и другим геодинамическим процессам. Перспективы геохимии индикаторов безграничны, с совершенствованием аналитических средств она будет становиться все более и более значимой.

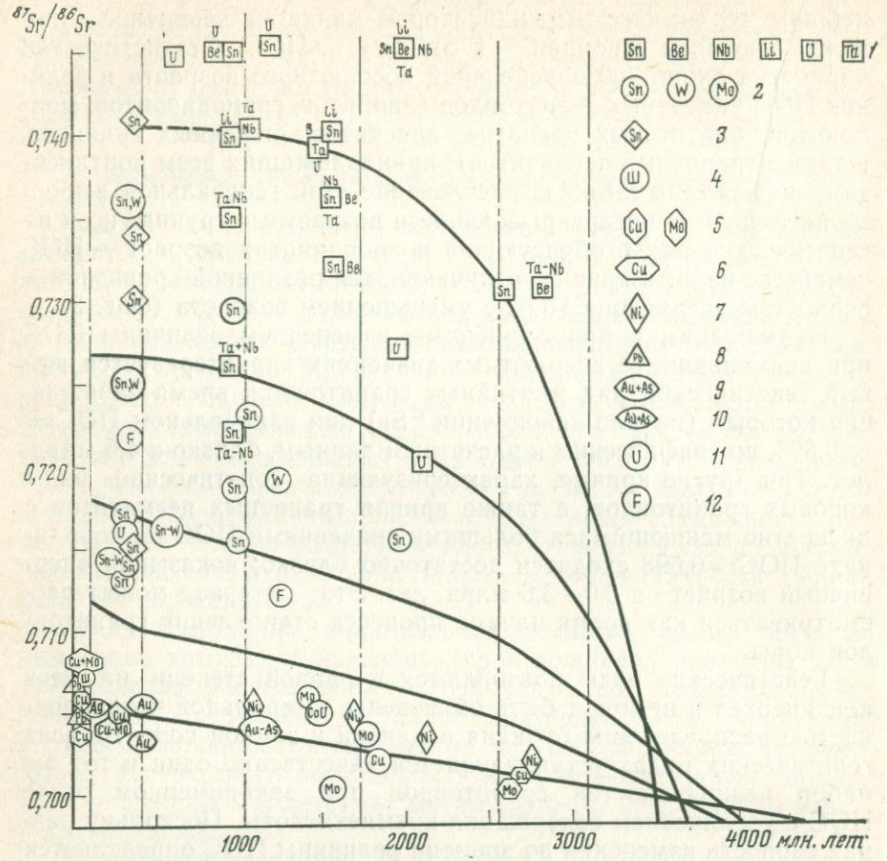
Две небольшие иллюстрации из наших исследований. Важ-

нейшим геохимическим индикатором является первичное отношение изотопов стронция — $(^{87}Sr/^{86}Sr)_0$ — ПОС. Статистическая обработка около 700 определений абсолютного возраста и величин ПОС различных гранитоидов (диоритов, гранодиоритов, монцонитов, биотитовых гранитов, аляскитов, щелочных гранитов, а также гранитных пегматитов), принадлежащих всем континентам, показала отчетливое расчленение этой генеральной выборки не только на неперекрывающиеся возрастные группы, но и на генетические ряды, образующие в координатах возраст — ПОС семейство из пяти кривых, отличающихся различной кривизной— скоростью увеличения ПОС с уменьшением возраста (фиг. 3).

Наименьшим и прямолинейным изменением величины ПОС при наименьших ее абсолютных значениях характеризуется первый генетический ряд мантийных гранитоидов, время зарождения которых (начало накопления ^{87}Sr) при изначальном ПОС= =0,698, по графическим и расчетным данным, близко к 4,5 млрд. лет. Три другие кривые, характеризующие генетические ряды коровых гранитоидов, а также кривая гранитных пегматитов с дискретно меняющимися большими значениями ПОС на координате ПОС=0,698 сходятся достаточно близко, показывая «первичный возраст» в 3,0—3,6 млрд. лет. Этот интервал может рассматриваться как время начала процесса становления гранитоидов коры.

Генетические ряды повторяются в равной степени на всех континентах и не могут быть объяснены латеральной неоднородностью распределения рубидия в мантии и земной коре. Во всех генетических рядах устанавливается качественно один и тот же набор разновидностей гранитоидов при закономерном росте ПОС с увеличением содержания кремнекислоты. Поскольку разная скорость изменения во времени величины ПОС определяется различным содержанием радиоактивного рубидия в субстрате, распределение которого, в свою очередь, диктуется законом геохимической зональности вещества планеты, то разные генетические ряды гранитоидов, скорее всего, отвечают разным глубинам зарождения исходных магм.

Как показано на фиг. 3, различные генетические ряды гранитоидов отчетливо различаются и рудной специализацией. С мантийными гранитоидами первого ряда связаны магматические медно-никелевые месторождения, медно-молибденовые месторождения медно-порфирового типа, некоторые типы золоторудных месторождений. С другой стороны, месторождения олова, вольфрама и редких металлов, т. е. типичных литофилов, ассоциируют с гранитоидами, для которых характерны высокие значения ПОС. Месторождения олова в подавляющем большинстве не только приурочены к гранитоидам с высокими значениями ПОС, но и имеют сравнительно молодой возраст; их возникновению должна предшествовать сложная и длительная предыстория эволюции субстрата. Для промежуточного (второго) генетического ряда какие-либо месторождения не известны.



Фиг. 3. Семейство генетических кривых гранитоидов в координатах ПОС — возраст. Показана связь с ними рудных месторождений различных генетических типов

1 — пегматитовые; *2* — жильные и грейзеновые; *3* — касситерит-сульфидные; *4* — скарново-шеелитовые; *5* — меднопорфировые; *6* — колчеданные; *7* — магматические медно-никелевые; *8* — скарново-полиметаллические; *9* — жильные золото-кварцевые; *10* — пятиэлементной формации; *11* — жильные урановые; *12* — флюоритовые

А. Е. Ферсман обращал внимание на важность органической связи между геохимическими и петрологическими процессами. «Не нужно забывать, что одновременно с дифференциацией элементов идет и дифференциация пород, и мы получаем параллелизм между обоими рядами» [23, с. 410]. В последнее время установлено, что кларки редких литофильных элементов (Nb, Zr, Li, Rb, TR и др.) последовательно возрастают с увеличением общей кислотности и щелочности пород в эволюционном магматическом ряду от базальтов к гранитоидам [3]. Закономерному эволюционному ряду средних составов магматических пород соответствует столь же последовательная совокупность кларков

редких элементов. Эта закономерность вскрывает существование глубокой взаимосвязи между процессами дифференциации главных типов природных магматических расплавов, образованием распространенных изверженных пород, формированием земной коры и концентрацией в ней редких элементов.

Обоснование объективной природы кларков и возможность их проверки с учетом роли конкретных факторов для отдельных магматических систем создают принципиальную основу для использования кларков как эталонных величин при решении различных вопросов прикладной геохимии: геохимической типизации магматических формаций, прогнозной оценки их рудоносности, общей оценки промышленных запасов дефицитных редких металлов в земной коре.

Геохимия окружающей среды

Хорошим эпиграфом к этому разделу могут служить слова А. Е. Ферсмана: «Создавая таким образом малоустойчивые системы, человек направляет свою деятельность против естественно идущих геохимических реакций, с которыми она неизбежно вступает в конфликт» [23, с. 540].

Охрана окружающей среды от загрязнения — важнейшая современная проблема. Планомерные геохимические исследования показали большую важность и эффективность этого специфического направления прикладной геохимии [6, 25]. Геохимические методы успешно применяются для решения следующих задач: изучение бытовых и промышленных отходов, их оценка как загрязнителей окружающей среды и потенциальных источников вторичных ресурсов ценных химических элементов; выявление источников загрязнения окружающей среды промышленными выбросами, картографирование зон их воздействия; установление локальных очагов интенсивной нагрузки токсичных химических элементов и их соединений; оценка состояния почв и растительности в связи с воздействием на них выбросов, использованием бытовых и промышленных отходов в качестве удобрений; установление источников загрязнения природных вод и зон их влияния; оценка эффективности водоочистных мероприятий; выявление контингентов населения с повышенным риском заболеваний в связи с установленными геохимическим картированием локальными и региональными аномалиями загрязнения.

Опыт применения в этой области традиционных геохимических методов свидетельствует о возможности их широкого использования для контроля за состоянием среды (мониторинга), получения научно-методических материалов по формированию зон загрязнения и оценке взаимосвязей между различными компонентами среды (включая живые организмы), а также для решения разнообразных практических задач, из которых важнейшей является выявление вторичных источников многих ценных

металлов. Утилизация их наряду с положительным экологическим эффектом равносильна открытию и разработке промышленных месторождений [6].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Барсуков В. Л., Григорян С. В., Овчинников Л. Н.* Геохимические методы поисков рудных месторождений. М.: Наука, 1981. 319 с.
2. *Беус А. А., Грабовская Л. И., Тихонова Н. В.* Геохимия окружающей среды. М.: Недра, 1976. 248 с.
3. *Бородин Л. С., Овчинников Л. Н.* Особенности концентрации и кларки редких элементов в связи с прогнозной оценкой рудоносности магматических формаций.— Докл. АН СССР, 1980, **252**, № 4, с. 967—970.
4. Геохимические методы поисков нефтяных и газовых месторождений.— Тр. ВНИИЯГГ, 1972, вып. 12. 232 с.
5. *Голева Г. А.* Гидрогеохимия рудных элементов. М.: Недра, 1977. 216 с.
6. *Григорян С. В., Сает Ю. Е.* Геохимические методы при решении некоторых экологических задач.— Сов. геология, 1980, № 11, с. 94—108.
7. Закономерности зонального распределения элементов-индикаторов в первичных геохимических ореолах сульфидсодержащих гидротермальных рудных месторождений.— В кн.: Открытия в СССР, 1979. М.: ЦНИИПИ, 1980, с. 27.
8. *Ивашов П. В.* Теоретические основы биогеохимического метода поисков рудных месторождений. Новосибирск: Наука, 1976. 272 с.
9. *Ковалевский А. Л.* Биогеохимические ореолы рудных месторождений.— Геология руд. месторождений, 1976, № 2, с. 89—105.
10. *Овчинников Л. Н.* О распределении элементов-примесей в метасоматических месторождениях.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1948, № 1, с. 153—158.
11. *Овчинников Л. Н.* Элементы-примеси как индикаторы процессов рудообразования и использование закономерностей их распределения при поисках и разведке рудных месторождений.— В кн.: Химия земной коры. М.: Наука, 1964, т. 2, с. 215—228.
12. *Овчинников Л. Н.* Прогнозная оценка мировых запасов металлов в месторождениях суши.— Докл. АН СССР, 1971, **196**, № 3, с. 683—686.
13. *Овчинников Л. Н.* Геохимические критерии связи процессов магматизма и рудообразования.— Изв. АН АрмССР. Науки о Земле, 1977, № 4/5, с. 78—93.
14. *Овчинников Л. Н., Баранов В. Д.* Проблема стереометаллогении.— В кн.: Проблемы металлогении и рудогенезиса. Алма-Ата: Наука, 1974, с. 51—71.
15. *Овчинников Л. Н., Баранов В. Д., Головин А. А.* Геолого-геохимический прогноз размещения колчеданно-полиметаллического оруденения на Алтае.— В кн.: Металлогения и рудообразование. Алма-Ата: Наука, 1979, с. 142—158.
16. *Овчинников Л. Н., Григорян С. В., Сает Ю. Е., Буренков Э. К.* По накоплениям химических элементов.— Гор. хоз-во Москвы, 1978, № 8, с. 41—43.
17. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1981—1985 годы и на период до 1990 года. М.: Политиздат, 1981. 95 с.
18. *Островский Э. Я., Портнов А. М.* Геолого-геохимические основы аэрогеохимического метода поисков месторождений кварц-адуляровой формации.— Геология руд. месторождений, 1977, № 5, с. 99—104.
19. *Перельман А. И.* Геохимия элементов в зоне гипергенеза. М.: Недра, 1972. 288 с.
20. *Поликарпочкин В. В.* Вторичные ореолы и потоки рассеяния. Новосибирск: Наука, 1976. 407 с.
21. *Разгонов О. П.* Закономерности распределения химических элементов в интрузивных траппах и околоинтрузивных геохимических ореолах и их использование при поисках сульфидных медно-никелевых руд: Автореф. дис. ... канд. геол.-минерал. наук. М.: ИМГРЭ, 1977. 15 с.
22. *Соколов В. А.* Геохимия природных газов. М.: Недра, 1971. 336 с.
23. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1953, т. 2. 768 с.

24. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955, т. 3. 798 с.
25. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1959, т. 5. 858 с.
26. *Фридман А. И.* Газовая съемка при поисках руд и геологическом картировании. М.: ИМГРЭ, 1975. 87 с.
27. *Фурсов В. З.* Ртуть — индикатор при геохимических поисках рудных месторождений. М.: Недра, 1977. 143 с.
28. *Allègre C. J., Ben Othman D.* Nd-Sr isotopic relationship in granitoid rocks and continental crust development: a chemical approach to orogenesis.— Nature, 1980, **286**, N 5771, p. 335—342.
29. *Allégre C. J., Ben Othman D., Polve M. R. P.* et al. The Nd-Sr isotopic correlation in mantle materials and geodynamic consequences.— Phys. Earth and Planet. Inter., 1979, **19**, N 4, p. 293—306.
30. *Bignell R. D., Cronan D. C., Tooms G. S.* Metal dispersion in the Red Sea as an aid to marine geochemical exploration.— Trans. Inst. Mining and Met. B. Appl. Earth Sci., 1976, **85**, p. 274—278.
31. *Briquen L., Lancelot J.* Rb-Sr systematics and crustal contamination models for calc-alkaline igneous rocks.— Earth and Planet. Sci. Lett., 1979, **43**, N 3, p. 385—396.
32. *Eremeev A. N., Sokolov V. A., Sokolov A. P., Yanitskii J. N.* Application of helium surveying to structural mapping and ore deposit forecasting.— In: Geochemical exploration, 1972. L.: Inst. of Mining, Metallurgy, 1973, p. 183—192.
33. *Hamilton P., Evensen N., O'Nions R., Tarney J.* Sm-Nd systematics of Lewisian gneisses: implications for the origin of granulites.— Nature, 1979, 277, N 5691, p. 25—28.
34. *Hamilton P. J., O'Nions R. K., Evensen N. M.* et al. Sm-Nd isotopic investigations of Jsua supracrustals and implications for mantle evolution.— Nature, 1978, **272**, N 5648, p. 41—43.
35. *Hawkesworth C. J., Norry M. J., Roddick J. C., Vollmer R.* $^{143}Nd/^{144}Nd$ and $^{87}Sr/^{86}Sr$ ratios from the Azores and their significance in LIL (large ionic lithophile) — element enriched mantle.— Nature, 1979, **280**, N 5717, p. 28—31.
36. *Ovchinnikov L. N., Sokolov V. A., Fridman A. J., Yanitskii J. N.* Gaseous geochemical methods in structural mapping and prospecting for ore deposits.— In: Geochemical exploration, 1972. L.: Inst. of Mining, Metallurgy, 1973, p. 177—182.
37. *Paolo D., de.* Implications of correlated Nd and Sr isotopic variations for the chemical evolution of the crust and mantle.— Earth and Planet. Sci. Lett., 1979, **43**, N 2, p. 201—211.
38. *Paolo D. J., de, Wasserburg G. J.* Petrogenetic mixing models and Nd-Sr isotopic patterns.— Geochim. et cosmochim. acta, 1979, **43**, N 4, p. 615—627.
39. *Paolo D. J., de.* Crustal growth and mantle evolution: inferences from models of element transport and Nd and Sr isotopes.— Geochim. et cosmochim. acta, 1980, **44**, N 8, p. 1185—1196.
40. *Shimizu H., Masuda A.* Cerium in chert as an indication of marine environment of its formation.— Nature, 1977, **266**, N 5600, p. 346—348.
41. *Sighinolfi G. P., Gorgoni C.* Chemical evolution of high-grade metamorphic rocks. Anatexis and remotion of material from granulite terraines.— Chem. Geol., 1978, **22**, N 2, p. 157—176.
42. *Van Calsteren P. W. C.* Geochemistry of the polymetamorphic mafic-ultramafic complex at Cabo Ortegal (NW Spain).— Lithos, 1978, **11**, N 1, p. 61—72.

УДК 553.2

Ф. И. ВОЛЬФСОН

ВОПРОСЫ ГЕНЕЗИСА ГИДРОТЕРМАЛЬНЫХ РУДНЫХ МЕСТОРОЖДЕНИЙ

Вопросы генезиса гидротермальных рудных месторождений, в которых сконцентрирована основная масса руд цветных, редких и других металлов, разнообразных рассеянных элементов, а также часть руд железа и марганца, длительное время привлекают внимание отечественных и зарубежных геологов. Эти вопросы многократно обсуждались в геологической литературе, они отражены в трудах В. А. Обручева, А. Н. Заварицкого, В. И. Вернадского, С. С. Смирнова, Д. И. Щербакова, А. Г. Бетехтина, О. Д. Левицкого, А. В. Королева, В. И. Смирнова, Ф. В. Чухрова, Н. П. Лаверова, автора данной работы, В. Линдгрена, В. Эммонса, П. Ниггли и других исследователей. Решению вопросов генезиса гидротермальных месторождений и месторождений металлических и неметаллических полезных ископаемых большое внимание уделял А. Е. Ферсман; он не только высказал важные теоретические представления об условиях их формирования, но также наметил основные пути и методы дальнейших исследований. Идеи А. Е. Ферсмана, несомненно, представляют значительный интерес в настоящее время и сохранят свое значение в будущем.

Некоторые идеи А. Е. Ферсмана о генезисе металлических и неметаллических полезных ископаемых

Важность выяснения генезиса месторождений полезных ископаемых А. Е. Ферсман сформулировал следующим образом: «Мы должны подчеркнуть, что правильное определение генезиса имеет решающее значение как в поисковой, так и в разведочной деятельности, а неверное трактование генезиса приводит нередко к грубейшим ошибкам и даже роковым результатам при организации промышленного предприятия» [5, с. 532]. А. Е. Ферсман считал, что правильное установление генезиса месторождений возможно лишь в результате проведения комплексных исследований для решения следующих вопросов.

1. Выяснение геологической обстановки и составление детальной геологической карты. 2. Изучение тектоники, особенно в период ее усиленного проявления; изучение связи с тектоникой накопления определенных типов осадков и заполнения трещин рудными жилами. 3. Установление возрастных соотношений между вмещающими породами, тектоническими явлениями и минералообразующими процессами. 4. Накопление данных о составе и генезисе горных пород и их соотношениях в отдельных место-

рождениях. 5. Проведение для месторождений, связанных с осадочными толщами, детального палеогеографического анализа и определение условий образования как осадочных пород, так и полезных ископаемых. 6. Диагностика и характеристика минералов (месторождений). 7. Установление пространственных, хронологических и генетических соотношений минералов и построение их общей диаграммы, характеризующей эти соотношения. 8. Изучение типоморфных минералов и типоморфных особенностей минералов, характера их изменений в ходе гидротермального процесса. 9. Учет всех действующих в процессе химических элементов, определение их кларков, сравнение их со средними кларками земной коры, их места в Периодической системе Менделеева. 10. Установление характера миграции, рассеяния и концентрации отдельных элементов в районе месторождения.

Ниже с современных позиций рассмотрены два основных вопроса: связь гидротермального оруденения с магматизмом; роль тектоники в генезисе гидротермальных руд. В основу положен фактический материал, собранный автором в течение многолетних исследований в Средней Азии, Центральном и Восточном Казахстане, Восточном Забайкалье и других регионах.

Связь гидротермального оруденения с магматизмом

При жизни А. Е. Ферсмана широкую известность приобрела идея о генетической связи гидротермального оруденения с магматизмом, известная под названием батолитовой концепции В. Эммонса. Еще в 1937 г. первые серьезные замечания по этой концепции были высказаны С. С. Смирновым, в дальнейшем он [4] показал полную несостоятельность этой концепции. Не повторяя критические замечания, высказанные С. С. Смирновым, которые широко освещались в печати и дополнялись, отметим, что некоторые важные проблемы вообще не находили отражения в концепции В. Эммонса. К ним, в частности, относятся проблемы глубин распространения батолитов гранитоидов и соотношения оруденения и более поздних продуктов магматизма. Кроме того, в основу батолитовой концепции было положено представление о формировании руд всех металлов из одного потока растворов, из которого кристаллизовались рудные минералы в соответствии с растворимостью соответствующих соединений. Этим явлением и объяснялась зональность гидротермального оруденения.

А. Е. Ферсман не высказывал критических замечаний по построениям В. Эммонса, но в своих трудах значительно опередил своих современников в решении сложных проблем рудогенеза. Он впервые выделил верхнюю оболочку Земли мощностью примерно 20 км, находящуюся ниже слоя осадочных пород. А. Е. Ферсман пришел к выводу, что именно в этой оболочке происходит формирование магматических очагов, с которыми связано становление гранитных массивов и связанных с ними

постамагматических образований. Тем самым впервые было высказано четкое представление о глубинных уровнях зарождения гранитных магматических расплавов и последующем их внедрении в более высокие горизонты, где проявляются постмагматические процессы.

Выделенная А. Е. Ферсманом внешняя оболочка полностью соответствует современному представлению о гранитно-метаморфическом слое, для которого, по данным новейших геолого-геофизических и петрологических исследований, характерны те процессы, которые были рассмотрены А. Е. Ферсманом еще в 30-е годы. Значительно позже появились геофизические данные о границе земной коры и верхней мантии, которая названа поверхностью Мохоровичича (М). На континентах поверхность М находится (в среднем) на глубине 35—40 км от современной дневной поверхности (в горных областях на глубине до 70 км). Кроме того, на глубине порядка 15—20 км намечена поверхность Конрада (К), выше которой находится верхняя оболочка — гранито-гнейсовый слой земной коры, впервые выделенный А. Е. Ферсманом на основании общих научных построений. По данным новейших геофизических исследований, поверхность К четко определяется не всегда, и можно лишь говорить о наличии под континентами целой зоны поверхностей, разделяющих земную кору на гранито-гнейсовый и базальтовый слои. В океанической коре гранито-гнейсовый слой отсутствует, а развит лишь базальтовый, мощность которого не превышает 5—6 км.

Верхняя мантия слагается ультраосновными породами, находящимися под огромным давлением, достигающим 10 000 атм, при средней температуре, составляющей приблизительно 800° С [3].

Данные изучения действующих вулканов, а также воссоздание истории геологического развития древних вулканических областей приводят к однозначному выводу о тесной связи процессов, протекающих в гранито-гнейсовом слое, с развитием верхней мантии.

Изучение геологического строения и истории геологического развития рудных полей, приуроченных к вулканическим сооружениям и прежде всего несущих гидротермальное свинцово-цинковое, редкометальное и другое оруденение в активизированных областях, показывает, что на ход магматических и постмагматических процессов в таких рудных полях большое влияние оказывают продукты, тесно связанные с верхней мантией. Однако это влияние отчетливо устанавливается лишь там, где размещение таких рудных полей контролируется крупными разломами, достигающими верхней мантии; это находит подтверждение в геофизических исследованиях. В связи с изменением давления в зонах упомянутых разломов происходит выплавление вещества мантии или глубоких частей базальтового слоя с возникновением нижних базальтоидных магматических очагов. Их

длительное развитие (в течение не менее 25—30 млн. лет) привело к сложным процессам, проявляющимся как на дневной поверхности, так и в гранито-гнейсовой оболочке Земли. Определение абсолютного возраста продуктов магматизма в вулканических сооружениях Восточного Забайкалья, сложенных горизонтами перемежающихся основных и кислых пород, пересеченных рудоносными жилами, показывает, что деятельность процессов, связанных с развитием нижнего очага, протекала в течение нескольких десятков миллионов лет. Активность нижнего магматического очага начинается (как правило, в континентальных условиях) с излияния на дневную поверхность базальтовых лав, выполняющих долины древнего рельефа. В дальнейшем проникающие из нижнего магматического очага по разрывным нарушениям тепловые потоки и флюиды приводят в узлах пересечения нарушений преимущественно к расплавлению сиаля и возникновению на глубинах 10—15 км верхнего гранитного магматического очага. Еще до завершения его формирования базальтовые лавы перекрываются эффузивными породами, приближающимися по составу к дацитам. В дальнейшем после перерыва, в течение которого происходит формирование горизонта осадочных пород, начинают функционировать оба магматических очага — нижний базальтовый и верхний гранитоидный, что вызывает переслаивание горизонтов кислых и основных эффузивных пород. Магматическая деятельность обычно заканчивается формированием массивных кислых и субщелочных экструзивных образований, в ее конечный этап формируются дайки диабазов.

После остывания магматических продуктов, пересечения их тел тектоническими разрывными нарушениями и возникновения целой системы синэффузивных и послевулканических трещин проявляется гидротермальная деятельность. Она вначале выражается в развитии вдоль разрывных нарушений зон измененных вмещающих пород. Внутри же этих зон, обладающих по сравнению с неизмененными породами более высокой эффективной пористостью и пониженной прочностью, образуются одиночные разрывы или зоны повышенной трещиноватости, вдоль которых локализуется свинцово-цинковое и другое оруденение. На участках, где мощность эффузивно-осадочных пород не превышает 500—600 м, оруденение локализовалось по крутопадающим разрывам и в породах фундамента, в повышенных частях его сложного рельефа.

Простирание рудных жил и рудоносных зон в фундаменте в ряде случаев образует угол 50° и более с рудовмещающими разрывами в породах чехла. При этом обычно по контакту пород фундамента и чехла слоистых образований происходили пологие тектонические срывы, совпадающие с неровностями рельефа фундамента, создавшие экраны для поступавших снизу рудоносных растворов. Среди образований чехла нередки прослои высокопластичных пород, представляющие для рудоносных растворов более высоко расположенные экранирующие поверхно-

сти, над и под которыми локализовались рудные тела и обогащенные участки. Рассмотренная модель формирования гидротермальных руд вероятна, если развитие верхнего гранитного магматического очага приводило к излиянию кислой эффузивной магмы и основная масса его застывала в виде гранитоидов на глубине.

С чем же генетически связано оруденение, сформировавшееся в подобных геологических условиях, и где находится его источник — в верхнем гранитном очаге или в нижнем базальтовом? В обоих случаях руды свинца, цинка, золота, вольфрама, олова, и других металлов генетически связаны с разными магматическими очагами, но сформировались они после остывания гранитного очага, из его остаточных расплавов, обогащенных летучими веществами. Эти расплавы, по-видимому, накапливались после кристаллизации алюмосиликатной составляющей верхнего магматического очага, приведшей к накоплению в остаточном расплаве, обогащенном летучими, повышенных количеств рудогенных компонентов, позже перешедших во флюиды (гидротермальные растворы).

Близкие условия формирования оруденения в активизированных и орогенных областях существуют и в том случае, когда расплавы нижнего очага не дают покровов и потоков, а затвердевают лишь с образованием поздних даек диабазовых порфиритов. Гидротермальное же оруденение упомянутых ранее металлов пространственно ассоциирует с наиболее поздними интрузивными массивами гранитоидов, являющихся дериватами верхнего магматического очага. В этом случае обычно формируются крутопадающие жилы, залегающие в массивах гранитоидов или в прорванных ими вмещающих породах. Пологопадающие разрывы, которые могли бы служить полупроницаемыми экранами для поступающих снизу рудоносных растворов, обычно отсутствуют. Такими экранами могли быть слабо проницаемые горизонты пород надрудной толщи, однако в большинстве случаев они были эродированы, что затрудняет их изучение. В рассмотренной геологической обстановке наиболее часто формируются месторождения молибдена, вольфрама и олова, сопровождаемые грейзенами, реже березитами. Что же касается сульфидных месторождений, в частности медноколчеданных, медных, свинцово-цинковых и золоторудных, то они обычны там, где крупные массивы, по возрасту близкие к оруденению, не обнажаются на дневной поверхности и не вскрываются горноразведочными выработками и буровыми скважинами на глубину до 2 км от поверхности.

В полях упомянутых месторождений в большинстве случаев прослеживаются дайки кислых и основных пород, часто параллельные рудным жилам. Они обычно представлены гранит-порфирами, кварцевыми порфирами, диабазовыми порфиритами и лампрофирами. Трудно судить, являлся ли источником рудогенных компонентов верхний гранитный магматический очаг или

нижний, базальтовый, связанный с верхней мантией. В некоторых случаях косвенные геохимические данные, в частности количественные соотношения изотопов серы ^{32}S и ^{34}S в сульфидах, позволяют считать более вероятным мантийный источник. Однако к настоящему времени на этот вопрос однозначно ответить невозможно.

Значительно больше данных имеется для суждения о мантийном источнике рудогенных компонентов, входящих в состав руд телетермальных свинцово-цинковых месторождений. Эти месторождения распространены как на активизированных платформах, так и в складчатых областях. Рудные тела залегают преимущественно в карбонатных отложениях и в ряде случаев обладают пластовой формой. В тех же случаях, когда их форма является более сложной или имеются секущие крутопадающие жилы, оруденение, как правило, локализуется в едином стратиграфическом горизонте.

До последнего времени в литературе обсуждается вопрос — относятся ли эти месторождения к гидротермальным или образованы в ходе осадконакопления. Изучение геологии этих месторождений с участием автора и литературные данные, относящиеся к различным провинциям мира, показывают, что нет сколько-нибудь достаточных оснований для отнесения их к осадочным образованиям [1]. В то же время во всех известных месторождениях отчетливо выявляется структурный контроль оруденения; рудные тела залегают среди гидротермально-измененных вмещающих пород, обычно доломитизированных, окварцованных или баритизированных. Процесс минерализации является многостадийным, а парагенетические минеральные ассоциации сходны или тождественны соответствующим ассоциациям свинцово-цинковых руд, залегающих среди магматических пород.

Общая характерная особенность рассматриваемых месторождений — отсутствие на рудоносных площадях выходов изверженных пород или наличие лишь базальтоидов, слагающих дайки, штоки или силлы. Для рудных минералов месторождений характерны примеси элементов, типичных для основных или ультраосновных магм, в том числе хрома, титана, платиноидов, кобальта и др. Эти же компоненты в повышенных (по отношению к фону) количествах содержатся в первичных ореолах рудных тел и в базальтоидах. В складчатых областях продукты только основного и ультраосновного магматизма в форме даек и штоков наблюдаются в рудных полях ряда ртутных и некоторых других месторождений; это позволяет предполагать, что такое оруденение, как и телетермальное свинцово-цинковое, генетически связано с нижним магматическим очагом, продукты которого обнажаются на современном эрозионном срезе.

Изложенное показывает, что рудогенные компоненты, к которым относятся молибден (в ранних молибденитах), вольфрам, олово, по-видимому, уран, а также литий, цезий и некоторые другие элементы, генетически связаны с верхним гранитным

магматическим очагом, который является источником этих элементов. С другой стороны, свинец и цинк, входящие в состав руд низко- и частью среднетемпературных сульфидных месторождений, как и тесно ассоциирующие с ним рассеянные элементы, а также ртуть и, возможно, сурьма, вероятно, генетически связаны с нижним магматическим очагом. В процессе кристаллизационной дифференциации базальтоидного магматического очага, очевидно, сопровождаемой ликвацией, вероятно, происходило накопление этих металлов в остаточном расплаве, обогащенном летучими компонентами. Глубоко проникавшие разрывные нарушения, достигавшие мантии, являлись каналами, по которым флюиды, обогащенные металлами, выносили их в более высокие горизонты земной коры; рудоотложение происходило при определенных термодинамических условиях под экранирующей (надрудной) толщей.

Неясно, с каким магматическим очагом — верхним гранитоидным или нижним базальтоидным — генетически связана большая группа мезотермальных месторождений, сульфиды которых содержат серию халькофильных элементов, поскольку руды таких месторождений пространственно ассоциируют как с кислыми, так и с основными продуктами магматизма. Однако несомненно, что нижний магматический очаг функционировал в процессе формирования всех гидротермальных месторождений и он являлся той энергетической базой, которая влияла на формирование магматических и постмагматических образований в пределах гранито-гнейсового слоя. Сам факт развития даек диабазов, как правило, формировавшихся ранее руд практически во всех районах развития гидротермальных сульфидных месторождений, указывает на влияние нижнего магматического очага на их образование. Наличие упомянутых выше даек основных пород должно рассматриваться в качестве важного поисково-оценочного критерия для выявления повышенной концентрации халькофильных элементов.

Роль тектоники в генезисе гидротермальных руд

А. Е. Ферсман придавал важнейшее значение тектоническим исследованиям при выяснении генезиса месторождений. В работе, посвященной прикладной геохимии, А. Е. Ферсман подчеркнул, что «тектоника в значительной степени определяет ход геохимических явлений» [5, с. 522]. Особое внимание он уделял глубоко проникающим разрывным нарушениям: «Районы глубинных дизъюнктивных дислокаций обычно сопровождаются подъемом из глубин или магм, или их горячих дериватов и выносом и накоплением элементов жильных образований (в частности, халькофилов)... Чем сложнее тектоническая история какого-либо района, тем значительнее процессы миграции и тем интенсивнее и вероятнее возможность образования крупных минеральных скоплений» [5, с. 522].

Высказывания А. Е. Ферсмана по вопросу о роли тектоники в минералообразовании совершенно справедливы, и их нельзя не учитывать при выяснении условий локализации оруденения и решении вопросов генезиса месторождений. А. Е. Ферсман — один из основоположников геохимии, учитывая важность тектонических исследований, первым в нашей стране организовал специальные тектонические исследования на Кольском полуострове, которые выполнил А. В. Пэк. Такого же высокого мнения о важности тектонических исследований для выяснения условий локализации оруденения придерживался С. С. Смирнов, изучавший минералогию рудных месторождений и металлогению; ему принадлежат слова: «прикладная геология — есть прежде всего структурная геология» [4, с. 201]. Важность проведения тектонических исследований в рудных районах, полях и месторождениях, высказывания выдающихся советских ученых, а также запросы практики привлекли внимание отечественных исследователей, и еще до Великой Отечественной войны сформировалось несколько научных школ, в задачу которых входило углубленное исследование структур рудных месторождений.

Первая из этих школ возникла в конце 20-х годов в Ташкенте, где молодые исследователи группировались вокруг В. А. Королева. В начале 30-х годов в Москве одну из школ возглавил В. М. Крейтер (МГРИ), другую, созданную по инициативе И. Ф. Григорьева и Д. И. Щербакова, — А. В. Пэк, Ф. И. Вольфсон, Л. И. Лукин (ИГЕМ АН СССР). Независимо от них в Сибирском отделении АН СССР (Новосибирск) уже после Великой Отечественной войны школу по структурному изучению рудных месторождений возглавил Г. Л. Поспелов. Появились группы исследователей, начавших детально изучать геологию и структуру рудных месторождений и в других городах, но особенно большой объем работ стали выполнять многочисленные геологи-производственники, руководившие геологоразведочными работами и осуществлявшие рудничногеологическую службу при добыче руд цветных, редких и других металлов. Развитию таких исследований способствовали специальные методические руководства и прежде всего серия работ по структурам рудных полей и месторождений, опубликованных сотрудниками ИГЕМ АН СССР. Автор настоящей статьи принимал непосредственное участие в проведении структурных исследований на гидротермальных рудных полях и месторождениях различных районов Советского Союза и стран народной демократии. Это позволило сформулировать некоторые теоретические обобщения; ниже будут кратко охарактеризованы главнейшие из них.

Автор совместно с Л. И. Лукиным [2] на основе анализа данных о структурных условиях локализации гидротермального оруденения в различных геологических обстановках пришел к заключению, что наиболее ярко роль структурных особенностей проявляется при формировании месторождений в слоистых толщах различных структурных этажей и ярусов. Последующие

исследования показали, что в нижнем структурном этаже, представленном архейскими и протерозойскими образованиями, а в фанерозойских областях также в некоторых случаях и палеозойскими, условия локализации оруденения характеризуются рядом специфических особенностей. Одна из них заключается в том, что крупные разломы не только контролируют оруденение, как это имеет место в фанерозойских геосинклинальных областях, но в ряде рудных полей могут вмещать рудные тела. Отсюда вытекает вывод, что протяжение по простиранию рудных тел в нижнем структурном этаже является максимальным. То же относится и к вертикальному размаху оруденения, который в ряде случаев превышает 3 км и, возможно, приближается к 5 км. Общими особенностями таких месторождений являются древний возраст и длительное развитие рудовмещающих разрывов, нередко заложенных в рассланцованных метавулканитах, реже в кристаллических сланцах и гнейсах еще в архее в виде зон пластических деформаций и проявленных в протерозое либо в более поздние периоды тектонических деформаций.

В подавляющем большинстве случаев надрудные толщи, существовавшие в период минерализации, представлены платформенными слоистыми образованиями. В одних районах оруденение формировалось лишь в нижнем структурном этаже (часто в породах фундамента и в нижней части разреза платформенных отложений), в других — только в слоистых толщах чехла. Причиной столь различных геологических условий локализации оруденения в вертикальном разрезе является непостоянство мощности пород чехла. Этот вопрос более подробно рассмотрен ниже при характеристике условий локализации оруденения в верхнем структурном этаже.

Ряд исследователей приходят к выводу, что руды, залегающие в нижнем структурном этаже, практически во всех случаях подверглись интенсивному метаморфизму, особенно динамометаморфизму, и нередко в литературе приводится мнение, что именно эти месторождения относятся к осадочно-метаморфогенным образованиям. В действительности же метаморфизм руд часто связан с внутрирудными тектоническими подвижками, вызванными многостадийностью минерализации, и интенсивность его проявления в большинстве случаев не превышает степени метаморфизма руд, залегающих в фанерозойских отложениях. Наблюдаемые же часто в рудоносных зонах рудные тела в складках метаморфических образований являются результатом замещения интенсивно деформированных вмещающих пород сульфидами; текстуры руд показывают, что метасоматические процессы протекали весьма интенсивно, и благодаря этому реликты вмещающих пород в рудах часто не сохранились. Гидротермальное происхождение подобных месторождений доказывается не только структурным контролем, но и предрудным изменением вмещающих пород, а также многостадийностью минерализации.

Основной тезис о роли тектогенеза при рудообразовании,

выдвинутый А. Е. Ферсманом, подтверждается на примере сульфидных месторождений свинца, цинка, меди, сурьмы, ртути и других металлов, а также золотокварцевых месторождений среди фанерозойских образований. Помимо жильных месторождений, обычно приуроченных к массивным породам, в слоистых толщах, смятых в складки, распространены пласто-, линзо- и седловидные рудные залежи. Все эти залежи обычно приурочены к горизонтам наиболее хрупких пород, залегающих под малопроницаемыми пластами глинистых и других сланцев. Месторождения формировались только там, где вмещающие породы разбиты серией крутопадающих разрывных нарушений. Наиболее крупные из них играют роль рудоконтролирующих, а менее крупные разрывы, частью сопряженные с крупными региональными разломами, являлись рудоподводящими нарушениями, по которым растворы просачивались в зону рудоотложения. На площадях с отчетливо проявленной складчатостью при отсутствии крутопадающих разрывных нарушений сульфидные и другие гидротермальные руды не формировались, и проводить поиски на таких площадях нецелесообразно.

Роль тектогенеза еще более ярко проявляется в орогенном ярусе и особенно в активизированных складчатых областях. Здесь крутопадающие разрывы не только вмещают оруденение, но они еще в дорудное время служили каналами для проникновения магматических расплавов, обусловливающих накопление эффузивных образований и возникновение вулканических сооружений, часто с кальдерами обрушения. Ко времени поступления из глубин рудоносных растворов в локализации оруденения важное значение приобретают не только подновившиеся крутопадающие разрывы, служившие каналами для поступления магматических расплавов, но и контракционные трещины, возникавшие в процессе формирования вулканических сооружений, бортовые разрывы, ограничивающие кальдеры, пологие срывы, прослеживающиеся по контакту пород с различными механическими свойствами, тектоническая трещиноватость горизонтов пород, обладающих повышенной хрупкостью, и т. д. Зоны пологих срывов и горизонты пород, обладающих повышенной способностью к пластическим деформациям, обычно являются полупроницаемыми экранами, играющими важную роль в локализации оруденения.

На всех месторождениях среднего структурного этажа мощность надрудной толщи, которая существовала в момент рудообразования, обычно не превышает 500—700 м, редко достигая 1 км. Рудоносные растворы просачиваются не только по крутопадающим разрывам, но и по другим нарушениям, в частности пологонаклонным. Находясь под большим давлением, эти растворы движутся только по восстанию, в том числе под небольшими углами. Вертикальный интервал оруденения в слоистых толщах среднего структурного этажа обычно не превышает 1 км, но в массивных породах может составлять 2 км и более.

Локализация оруденения в верхнем платформенном структурном этаже имеет свои особенности, обусловленные горизонтальным или слабо наклонным залеганием вмещающих платформенных осадочных пород, их литологическим составом и физико-механическими свойствами. Свинцово-цинковое, медное, реже золоторудное оруденение приурочено к горизонтам пород с повышенными пористостью (проницаемостью) и способностью к хрупким деформациям.

Практически во всех рудоносных районах при рудообразовании на активизированных платформах по контакту пород с различными физико-механическими свойствами образуются зоны срыва и дробления в сочетании с крутопадающими разрывами. Последние являются сквозными и проникают из нижнего структурного этажа в верхний или возникают только в породах чехла. Рудные тела приурочены к горизонтам пород с благоприятными физико-механическими свойствами и наиболее часто формируются в пределах стратиграфических несогласий; форма их различная, в некоторых случаях близкая к пластообразной, но чаще это вытянутые линзо- либо лентоотбразные залежи и даже секущие жилы в строго определенных горизонтах вмещающих пород.

Большое значение в локализации оруденения приобретают и первичные структурные элементы, среди которых прежде всего могут быть отмечены рифовые постройки, бары, складки волочения, возникшие в результате образования оползней со склонов поднятий в процессе осадконакопления, когда формирующиеся осадки обладали высокой пластичностью. Все структурные элементы, связанные с процессами осадконакопления, имеют высокие коллекторские свойства, что благоприятно для формирования эпигенетических рудных скоплений.

Гидротермальное происхождение рассматриваемых месторождений в верхнем структурном этаже подтверждается изменениями вмещающих пород — доломитизацией, окварцеванием, баритизацией, серицитизацией, хлоритизацией. Рудная и сопровождающая ее минерализация является многостадийной. Температура растворов, судя по данным декрепитации рудных минералов и гомогенизации включений в жильных минералах, составляет 100—200, в некоторых случаях 250° С и более.

Общей особенностью всех месторождений этой группы является локализация на расстоянии не более 2 км выше поверхности фундамента. Мощность надрудной толщи, нередко представленной глинистыми сланцами и другими малопроницаемыми породами, обычно приближается к 500 м. Отсюда следует, что гидротермальные рудные месторождения на платформах формируются лишь в местах с мощностью платформенных отложений, большей частью не превышающей 2,5 км. При мощности платформенных отложений 3 км и более гидротермальные рудные месторождения не возникают. Это обусловлено тем, что мощности чехла более 2,5—3 км затрудняют разрастание трещинных

зон — проводников флюидов по восстанию и способствуют созданию закрытых систем с восстановительной реакцией и аномально высокими пластовыми давлениями, что приводит к рассеянию рудогенных компонентов. Изложенное подтверждается следующими данными. В пределах платформы проводится бурение скважин на нефть. В ореолах нефтяных залежей на глубинах 3—3,5 км и более развита убогая вкрапленность сульфидов — галенита, сфалерита, халькопирита и др. Однако на этой глубине ни в одном случае не были пересечены сколько-нибудь повышенные концентрации названных минералов. Можно предполагать, что их вкрапленность образовалась из потока растворов, которые далее не могли просочиться по восстанию, и минералообразование прекратилось. Промышленные сульфидные руды в редких случаях залегают даже на расстоянии около 2 км от фундамента. Обычно это расстояние не превышает 1—0,5 км, еще более часто руды локализуются в основании толщи платформенных отложений либо частью переходят в фундамент, и, наконец, известны примеры, когда сульфидные руды залегают только в фундаменте или даже на 200—300 м ниже контакта пород фундамента и чехла. Все это находит объяснение в относительно малой мощности пород чехла при формировании гидротермальных месторождений на платформах.

Во всех известных случаях надрудная толща рассматриваемых месторождений обладала мощностью порядка 500 м. Это и малая эрозия платформенных толщ позволяют считать, что современный уровень нахождения руд в платформенных отложениях с достаточной достоверностью воссоздает уровень дневной поверхности, существовавшей при формировании рассматриваемых месторождений. В частности, если оруденение залегает только в фундаменте и не доходит до контакта с платформенными отложениями на 200—300 м, то их мощность не могла превышать 300 м. Ярким примером, подтверждающим сказанное, является северный фланг Маданского свинцово-цинкового рудного поля в НРБ, перекрытого палеогеновыми платформенными образованиями мощностью 300 м. Здесь была пересечена скрытая свинцово-цинковая рудная залежь в докембрийских породах фундамента; верхняя граница залежи оказалась на глубине 300 м и не достигла контакта с породами верхнего этажа.

В настоящее время в практику изучения гидротермальных сульфидных и других месторождений широко внедрены комплексные исследования, необходимые для правильного суждения об их генезисе. Среди этих исследований значительное место занимает изучение истории тектонических элементов. На необходимость этого научного направления в свое время обратил внимание А. Е. Ферсман. Развитие его идей сыграло важную роль в проведении поисков, разведки и изучения геологии гидротермальных рудных месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Архангельская В. В., Вольфсон Ф. И.* Геотектонические позиции и систематика стратиформных свинцово-цинковых месторождений. М.: Наука, 1979. 274 с.
2. *Вольфсон Ф. И., Лукин Л. И.* Особенности локализации гидротермального оруденения в различных структурных этажах.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1965, № 10, с. 28—38.
3. *Дербгольц В. Ф.* Мир воды. Л.: Недра, 1979. 254 с.
4. *Смирнов С. С.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 248 с.
5. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1953. Т. II. 768 с.

УДК 551.322.2 : 553.064

А. И. ГИНЗБУРГ

УЧЕНИЕ О ПЕГМАТИТАХ В СВЕТЕ СОВРЕМЕННЫХ ЗНАНИЙ

С именем А. Е. Ферсмана связано создание и становление единого и стройного учения о пегматитах. Хотя с момента последнего издания его классической монографии «Пегматиты» [30] прошло более 40 лет, она во многом сохранила свое значение и до настоящего времени является настольной книгой всех геологов, минералогов и геохимиков, которым приходится сталкиваться с этими замечательными образованиями.

За период, прошедший после опубликования монографии А. Е. Ферсмана, интерес к пегматитам значительно возрос, что связано с резким увеличением добычи из них редких металлов, листового мусковита, оптического флюорита, пьезокварца, ювелирных камней, полевого шпата и многих других видов минерального сырья. Проблема генезиса пегматитов является одной из ключевых в петрологии и геологии рудных месторождений, поскольку пегматиты, по А. Н. Заварицкому, являются образованиями, промежуточными между изверженными горными породами и рудными жилами. Правильное понимание генезиса пегматитов позволяет подойти к решению важнейшего вопроса рудообразования — выяснению механизма отделения рудного вещества от магмы.

Все сказанное определило повышенное внимание к этой проблеме и острые дискуссии о происхождении пегматитов, развернувшиеся в 50-х и 60-х годах на страницах научной печати. Представления А. Е. Ферсмана о существовании специфического остаточного расплава — дифференциата гранитной магмы и последовательной его кристаллизации в относительно закрытой системе подверглись существенной критике, особенно после появления работы А. Н. Заварицкого [15], основанной на опытах Р. Горансона по растворимости воды в гранитном расплаве. А. Н. Заварицкий пришел к выводу о невозможности образова-

ния пегматитов путем последовательной кристаллизации специфического расплава, обогащенного летучими, и о развитии в процессе остывания гранитной магмы явлений ретроградного вскипания с образованием надкритического раствора. Геологическим следствием этого является широкое развитие в замкнутой системе явлений перекристаллизации ранее выделившихся минералов и последующего их замещения другими минералами при воздействии гидротермальных растворов. Основываясь на представлениях А. Н. Заварицкого и на учении Д. С. Коржинского о развитии метасоматических процессов под влиянием сквозьмагматических растворов, В. Д. Никитин [21] с новых позиций возродил гипотезу гидротермального образования пегматитов, предложенную в середине 20-х годов американскими геологами — В. Шеллером, Ф. Хессом, К. Ландесом. Согласно В. Д. Никитину, слюдоносные и редкометальные пегматиты возникают вследствие перекристаллизации и метасоматоза аплитов или даек среднезернистых гранитов под воздействием сквозьмагматических растворов, приносящих с больших глубин рудные компоненты.

На основе изучения пегматитов, встречающихся в древних метаморфических толщах, в последние десятилетия появилась метаморфогенная гипотеза образования пегматитов, связывающая пегматитообразующие процессы с явлениями ультраметаморфизма [27]. Таким образом, к настоящему времени сложились три гипотезы генезиса пегматитов.

Магматическая, рассматривающая пегматиты как результат сложной эволюции остаточного расплава, обогащенного летучими веществами. Эта эволюция включает как кристаллизацию расплава, так и перекристаллизацию и метасоматоз под воздействием остаточных растворов. Эта гипотеза представляет собой развитие основных идей А. Е. Ферсмана. Она творчески разрабатывалась его учениками и последователями А. Н. Лабунцовым, А. Ф. Соседко, М. Ф. Стрелкиным, К. А. Власовым, Г. П. Барсановым, А. И. Гинзбургом, А. А. Беусом, К. Л. Бабаевым, Н. П. Ермаковым, Г. Г. Родионовым, В. П. Петровым, Е. К. Лазаренко, Б. М. Шмакиным, Н. А. Солодовым, М. В. Кузьменко, И. Т. Бакуменко, Л. Н. Россовским, А. С. Никаноровым — в СССР, а за рубежом — П. Квенселем, Н. И. Варламовым, Е. Н. Камероном, Р. Г. Джансом, А. Г. Мак-Нейром, Л. Р. Пейджем, Д. Б. Стьюартом, К. В. Бэрнемом, О. Бротценом, Ф. Чехом, И. Станеком.

Гидротермально-метасоматическая, согласно которой пегматиты — это аплиты или жильные граниты, перекристаллизованные и замещенные под влиянием восходящих гидротермальных растворов глубинного происхождения. Эта точка зрения наиболее последовательно развивалась В. Д. Никитиным, П. П. Боровиковым, С. А. Руденко, В. А. Филипповым, В. В. Гордиенко и др.

Метаморфогенная, в которой пегматиты относятся к продуктам ультраметаморфизма и метаморфической дифференциации. После общеизвестных работ П. Эскола и Н. Г. Судовикова эта гипотеза применительно к пегматитам древних щитов и платформ в СССР принималась Ю. М. Соколовым, Д. А. Великославинским, К. А. Шуркиным, М. М. Мануйловой, М. Е. Салье, В. А. Бабошиным, В. А. Глебовицким, Л. Л. Гродницким, за рубежом наиболее последовательным приверженцем этой гипотезы является Г. Рамберг.

Поскольку наряду с типичными пегматитами в природе широко развиты крупнокристаллические минеральные образования пегматоидной структуры, иногда напоминающие пегматиты (например, кварц-полевошпатовые жилы пегматоидной структуры, так называемые штокшайдеры на контактах мелких куполов гранитов, полевошпатовые метасоматиты, скарны и др.), то в первую очередь следует остановиться на том, что следует понимать под пегматитами. Сам термин «пегматит» ввел в литературу в начале XIX в. Р. Гаюи для обозначения письменного (графического) гранита. В дальнейшем этот термин был распространен на гранитные породы, содержащие участки как с письменными структурами, так и с крупнозернистым строением. Впоследствии под пегматитами стали понимать любые крупно- и гигантозернистые, преимущественно жильные тела, по минеральному составу близкие к интрузивным породам, что привело к известной неопределенности понятия.

Если для пегматитов гранитных магм существуют определенные критерии, позволяющие отличать их от сходных крупнокристаллических образований иного генетического типа, то для негранитных пегматитов такие критерии до сих пор отсутствовали, и разные исследователи под термином «пегматит», особенно для массивов щелочных, основных и ультраосновных пород, часто понимали генетически различные образования.

Анализ специфических особенностей типичных гранитных пегматитов [12] позволяет сформулировать это понятие следующим образом.

Пегматиты — группа пород, образующих инъекционные жильные тела или шлиры, состав которых приближается к анхиэвтектическому и обычно близок к составу поздних дифференциатов магматических комплексов или анатектических выплавок. Для пегматитов характерны закономерные парагенетические ряды минеральных ассоциаций, неоднородное строение с тенденцией к проявлению зональности и развитию специфических структур минеральных агрегатов. Формирование пегматитов происходит на умеренных и значительных глубинах в широком температурном диапазоне при высокой активности летучих и подвижных компонентов.

На протяжении последних десятилетий основное внимание исследователей было обращено главным образом на те аспекты проблемы пегматитов, которые были слабо разработаны при жизни А. Е. Ферсмана.

Формационные типы пегматитов и геологические условия их нахождения

Пегматиты возникают только в условиях умеренных и значительных глубин, где затруднено удаление летучих из магматического расплава. Минимальная глубина, на которой возможно развитие пегматитового процесса, по различным определениям, составляет 1,5—2 км; вертикальный интервал развития пегматитов — не менее 14—16 км. В этом состоит одно из существенных отличий гранитных пегматитов от рудоносных гидротермальных месторождений, формирующихся главным образом на глубинах до 3—4 км.

Поскольку пегматиты возникают в весьма значительном интервале глубин, они могут быть разделены по геологическим условиям нахождения и соответственно по термодинамическим параметрам образования на ряд групп или формаций [9] с различной полезной минерализацией. Если А. Е. Ферсман различные пегматиты рассматривал как продукты эволюции остаточного расплава при постепенном понижении температуры и считал, что в пределах единого пегматитового поля могут быть встречены представители всех основных выделенных им типов, то в настоящее время не вызывает сомнения необходимость выделения пегматитовых формаций, возникающих в различных структурных этажах земной коры. Каждая из них, в свою очередь, претерпевает определенную температурную эволюцию. Выделяются четыре такие формации: хрусталеносные пегматиты малых глубин, редкометальные пегматиты средних глубин, слюдоносные пегматиты больших глубин и керамические (редкоземельные) пегматиты весьма больших глубин (табл. 1). Пегматиты выделенных формаций образуются при различном термодинамическом режиме. Так, хрусталеносные и частично редкометальные пегматиты возникают в складчатых поясах в условиях, отвечающих низко- и среднетемпературным фациям контактового метаморфизма. Редкометальные пегматиты появляются также в геосинклинальных трогах древних платформ и щитов в породах средне-высокотемпературных фаций регионального метаморфизма низких давлений (кордиерит-амфиболитовой фации). Слюдоносные пегматиты образуются при метаморфизме более высоких давлений (гранат-амфиболитовой фации), а пегматиты керамические (редкоземельные) — при ультраметаморфизме, чаще всего на древних щитах в областях развития пород гранулитовой фации.

Различные пегматитовые формации территориально разобщены и не переходят друг в друга. В то же время наблюдаются пегматиты с чертами, присущими двум смежным по глубинности формациям. К ним следует отнести пегматиты с ювелирными камнями и так называемые редкометально-слюдоносные пегматиты, выделяемые некоторыми исследователями (Ю. М. Соколов, К. О. Кратц, М. Е. Салье и др.) в особую формацию. Драгоценные ювелирные камни могут появляться в зано-

Таблица 1

Основные формации гранитных пегматитов

Формация пегматитов	Глубина образования, км	Фация и субфация метаморфических вмещающих пород	Связь с материнскими гранитами	Процессы замещения	Миароловые пустоты	Геохимическая специализация	Полезная минерализация
Хрусталеносные пегматиты относительно малых глубин	2—3	Фация зеленых сланцев	Внутригранитные пегматиты, расположены в куполах, в участках изгиба кровли	Интенсивно развиты вокруг миароловых пустот и особенно под ними	Крайне характерны	F, Be, Li, TR	Пьезооптическое сырье, ювелирные камни (топаз, берилл)
Редкометальные пегматиты средних глубин	3—8	Амфиболитовая фация; кордиерит-амфиболитовая субфация	Расположены вблизи крупных гранитных массивов, в зонах экзоконтактов и на продолжении массивов	Проявлены весьма интенсивно	Наблюдаются локально	Li, Rb, Cs, Tl, Be, B, F, P, Ta > > Nb, Bi, Sn, Sb	Сподумент, петалит, лепидолит, берилл, танталит, касситерит, воджинит, микролит, поллуцит
Слюдоносные пегматиты больших глубин	7—10	Амфиболитовая фация; гранат-амфиболитовая субфация	Не ясная, часто отсутствует	Проявлены локально	Редки пустоты растворения	Be, B, P, Nb > > Ta, U, TR	Мусковит, керамическое сырье
Керамические (редкоземельные) пегматиты весьма больших глубин	Более 10	Гранулитовая фация	Не проявлена; иногда пегматиты тесно связаны с полями развития мигматитов	Не проявлены	Отсутствуют	Th, TR, P, Ti	Керамическое сырье

рышах как типично хрусталеносных (берилл, топаз), так и редкометальных (кунцит, воробьевит, рубиллит и др.) пегматитов. Точно так же некоторые слюдоносные пегматиты содержат редкометальное оруденение (берилл, колумбит и др.), а редкометальные — мусковит. Поэтому близкие по составу пегматиты могут появляться в полях, принадлежащих двум формациям, приобретая в каждой из них свои особенности.

Таким образом, пегматиты, возникающие в различных структурных этажах земной коры и принадлежащие к разным формациям, характеризуются разными геологическими условиями нахождения и отличаются друг от друга по взаимоотношениям с материнскими гранитами, характеру взаимодействия с вмещающими породами, внутреннему строению, механизму образования, минеральному составу, геохимическим особенностям и практическому значению. Поэтому не могут существовать единые для всех пегматитов закономерности размещения и поисковые критерии безотносительно к их формационной принадлежности. Каждый формационный тип пегматитов характеризуется специфическими условиями локализации.

Пегматиты редкометальной и слюдоносной формаций обычно группируются в поля, протягивающиеся на километры и даже десятки километров. Отдельные поля во многих провинциях представлены гигантскими поясами, нередко совмещающимися с дайковыми поясами жильных гранитов. Поля и пояса приурочены к определенным тектоническим структурам — узким протяженным прогибам типа геосинклинальных трогов на докембрийских платформах и срединных массивах или же к фанерозойским эвгеосинклинальным зонам. Эти прогибы характеризуются относительно небольшой мощностью (3—9 км) выполняющих их терригенно-эффузивных отложений. Прогибы на древних платформах и щитах отличаются широким распространением пластовых тел основных пород и эффузивов спилит-диабазовой формации, частью превращенных в орто- и параамфиболиты, к которым чаще всего и приурочены пегматиты. В фанерозойских геосинклиналях обычно преобладают ритмичнослоистые толщи флишоидных терригенных пород, среди которых залегают пегматиты.

Редкометальные пегматиты образуются в посторогенный период развития складчатых зон (посторогенные пегматиты), а возникновение слюдоносных пегматитов происходит главным образом в период завершения складчатости (синорогенные пегматиты). Некоторые пегматитовые пояса связаны с зонами активизации более древних прогибов, т. е. с областями полициклического развития.

В днищах троговых прогибов обычно формируются гранитогнейсовые купола, а в их верхних структурных этажах — трещинные массивы аллохтонных гранитов, четко приуроченные к глубинным разломам, которые обычно проходят по бортам троговых структур. Гранитоидные комплексы, с которыми связа-

ны пегматиты, имеют либо анатектическое (керамические, часто слюдоносные пегматиты), либо палингенное (редкометальные и хрусталеносные пегматиты) происхождение. Имеющиеся для таких гранитов данные о соотношении $^{87}Sr/^{86}Sr$ свидетельствуют об их коровой природе [7].

Таким образом, пегматитовые поля и пояса закономерно связаны с геосинклинальными системами и проходящими по их бортам глубинными разломами. Вдоль последних локализуются тепловые потоки, вызывающие расплавление метаморфических пород на нижних структурных этажах земной коры и подъем гранитной магмы в более верхние этажи с обогащением ее по мере подъема летучими, в первую очередь водой. Как правило, чем более четко проявлен тектонический контроль в размещении пегматитовых полей, тем больше их размеры.

Устанавливается пространственная связь различных пегматитовых формаций с породами определенной фации регионального и регионально-контактового метаморфизма. В земной коре проявляется закон изофациального соответствия метаморфизма вмещающих пород и определенных пегматитовых формаций [9]. Так, мусковитовые пегматиты приурочены к поясам дистен-силлиманитовой фациальной серии, редкометальные — к поясам андалузит-кордиеритовой серии, а редкометально-мусковитовые пегматиты контролируются породами дистен-андалузит-силлиманитовой серии. Это выдерживается не только в областях одноактного проявления метаморфизма, но и в зонах его полициклического развития с широким проявлением диафтореза. Соответствие фаций метаморфизма вмещающих пород и формаций пегматитов имеет первостепенное значение для прогнозирования и проведения поисковых работ, поскольку оно позволяет на основании изучения минералов, характерных для разных фаций метаморфизма, выделять участки обнаружения пегматитов различных типов.

Пегматиты и граниты

Вопрос о соотношении гранитов и пегматитов — один из фундаментальных в учении о пегматитах. Имеющиеся данные [12] позволяют утверждать, что соотношения гранитов и пегматитов различных формаций существенно разные и отвечают следующим закономерностям.

1. Хрусталеносные пегматиты малых глубин залегают в материнских гранитах заключительных интрузивных фаз палингенных дифференцированных гранитных комплексов или в краевых зонах гибридных гранитов рапакиви, прорывающих массивы габбро-анортозитов. Они связаны постепенными переходами с самими гранитами и относятся, по Н. П. Ермакову, к пегматитам камерного типа. Локализуются хрусталеносные пегматиты под мелкими куполами гранитов, в участках изогнутости кровли или волнистых перегибов пологопадающего контакта висячего бока гранитного тела, т. е. в местах, благоприятных для на-

копления в застывающем гранитном массиве летучих компонентов. Граниты, как правило, лейкократовые, аляскитовые, повышенной щелочности, реже (Коростеньский массив) они представлены гибридными фаялитовыми разностями, обогащенными закисным железом. Пегматиты обычно шлировые, реже выжатые на незначительное расстояние, богатые миароловыми пустотами; располагаются часто группами.

2. Поля редкометальных пегматитов средних глубин локализуются вблизи крупных трещинных гранитных массивов, принадлежащих к дифференцированным магматическим комплексам палингенного аллохтонного типа. Расположены чаще всего на продолжении гранитных массивов, иногда в зонах развития контактного метаморфизма, в участках прогибов кровли. В некоторых провинциях протерозойских пегматитов граниты, с которыми можно было бы связывать пегматиты, отсутствуют либо пегматиты и граниты пространственно разобщены, но приурочены к единым тектоническим зонам. Хотя каждая интрузивная фаза дифференцированных комплексов может сопровождаться своими пегматитовыми проявлениями, все крупные поля с промышленным оруденением формируются в заключительные этапы становления магматических комплексов в качестве их конечных дифференциатов. Такой вывод следует также из рассмотрения геохимической эволюции последовательно образующихся интрузивных фаз и редкометальных пегматитов. В последних всегда концентрируются элементы, накапливающиеся по мере перехода от ранних интрузивных фаз к поздним (Li, Rb, Cs, Be, Sn, W, Ta, F), и исчезают элементы, содержания которых убывают при переходе от первых фаз к последним. Учитывая значительный объем пегматитов крупного поля, сопоставимый с объемом мелких гранитных куполов, редкометальные пегматиты можно рассматривать как конечные дифференциаты магматических комплексов.

3. Взаимоотношения слюдоносных пегматитов больших глубин с гранитами весьма сложны. В некоторых провинциях граниты, с которыми можно было бы связывать слюдоносные пегматиты, вообще отсутствуют; в других — широко распространены пегматоидные плагиограниты (гранит-пегматиты) либо гнейсо-граниты, слагающие значительные площади; пегматоидные граниты в отдельных участках переходят в пегматиты. Плагиограниты изобилуют реликтами переработанных метаморфических пород; на многих участках, где увеличивается содержание реликтов вмещающих гнейсов, плагиограниты приобретают характер своеобразных мигматитов («гигантомигматиты», по Н. В. Петровской). В целом эти породы резко отличаются от аллохтонных гранитоидов, с которыми связаны редкометальные пегматиты, и напоминают типичные автохтонные, анатектические образования, возникающие при ультраметаморфизме. Они могут появляться в результате селективного плавления плагиогнейсов или «магматического замещения» метаморфических

пород. Приведенные факты послужили обоснованием ультраметаморфогенной гипотезы происхождения пегматитов.

4. Керамические (редкоземельные) пегматиты весьма больших глубин, как правило, залегают среди мигматитов гранулитовой фации метаморфизма и не имеют какой-либо видимой связи с гранитными массивами. Местами в пегматитовые тела переходят жильные мигматиты (вениты); возникновение пегматитов вследствие ультраметаморфизма не вызывает сомнений.

5. Редкометальные пегматиты обнаруживают сходство с так называемыми редкометальными литий-фтористыми гранитами («апогранитами», по А. А. Беусу). Последние, как и пегматиты, возникают в конечные этапы становления гранитных интрузивных комплексов, обогащены и обеднены одними и теми же элементами, характеризуются одной и той же вертикальной геохимической зональностью. Однако пегматиты образовались в условиях значительных глубин, тогда как «редкометальные» литий-фтористые граниты являются гипабиссальными образованиями, возникшими на глубинах 0,5—2,5 км. О малой глубинности их формирования свидетельствуют отходящие от некоторых из них дайки, краевые части которых содержат стекло топазового состава — онгониты [17]. Таким образом, «редкометальные» граниты могут рассматриваться как гипабиссальные аналоги редкометальных пегматитов [10].

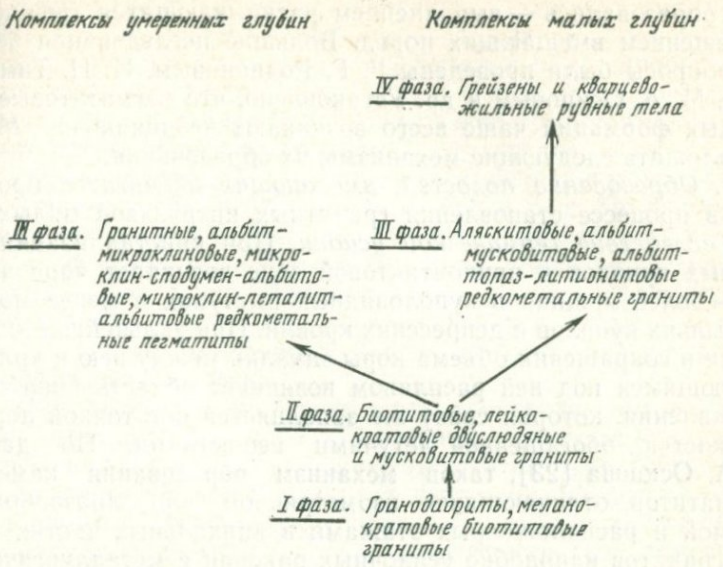
Из приведенных данных следует, что пегматиты различных формаций возникают разными путями. В одних случаях (хрусталеносные пегматиты) они как бы представляют фации гранитов, обогащенные летучими веществами, в других (редкометальные пегматиты) — являются конечными продуктами становления дифференцированных гранитных комплексов, в третьих (керамические, частично слюдоносные) — возникают вследствие ультраметаморфизма.

Пегматиты и гидротермальные рудные жилы

В районах развития пегматитов весьма больших и больших глубин гидротермальные рудные жилы, как правило, не встречаются. Редкометальные пегматиты и гидротермальные жилы с оловянной, вольфрамовой и бериллиевой минерализацией наблюдаются в пределах единых провинций, преимущественно в фанерозойских складчатых поясах; их расположение характеризуется следующими закономерностями.

Развиты они чаще всего в различных участках единых провинций: пегматиты локализуются в наиболее эродированных областях, гидротермальные рудные жилы приурочены к апикальным куполам гранитных массивов, что отражает различную глубину их становления.

Пегматиты никогда не переходят в гидротермальные рудные жилы. В тех редких случаях, когда пегматиты и гидротермальные рудные жилы встречаются на одних и тех же участках, руд-



Фиг. 1. Схема последовательности формирования дифференцированных гранитных комплексов с редкометальным оруденением

ные жилы пересекают редкометальные пегматиты, иногда образуют в них прожилки или лестничные жилы. Если оловоносные пегматиты пересечены лестничными кварцевыми жилами с касситеритом (месторождение Чальче, Калбинский хребет), минералы пегматитов и гидротермальных рудных жил всегда отличаются по типоморфным особенностям.

Массивы «редкометальных» гранитов связаны неразрывными переходами с гидротермальными рудными жилами. Последние приурочены к надинтрузивным зонам гранитных куполов, иногда расположены вдоль пологих трещин в куполах грейзенизированных гранитов (месторождение Цинновец, ЧССР).

Указанные закономерности подтверждают высказывания А. Е. Ферсмана о том, что пегматиты и гидротермальные рудные жилы представляют собой результат двух процессов, протекавших как бы параллельно, в различных условиях и на разных глубинах. Общая схема последовательности формирования дифференцированных гранитных комплексов с редкометальным оруденением представлена на фиг. 1.

Механизм образования пегматитовых тел

Значительное внимание в последние годы было обращено на структуры пегматитовых полей и происхождение форм пегматитовых тел. Поскольку пегматиты во многих случаях характеризуются значительными размерами и протягиваются нередко на километры при значительной мощности, то возникает вопрос, как

они образовались — выполнением раскрывающихся трещин или замещением вмещающих пород. Большие исследования по этому вопросы были проведены Г. Г. Родионовым, И. Н. Тимофеевым, М. А. Осиповым и др. Установлено, что пегматитовые тела разных формаций чаще всего возникают неодинаково. Можно предложить следующие механизмы их образования.

1. *Образование полостей, вмещающих пегматиты,* происходит в процессе становления гранитных интрузивов малых глубин *вследствие термической усадки.* При кристаллизации гранитных куполов в приконтактовой зоне возникает кора закалки — более мощная в куполовидных выступах и менее мощная в крыльях куполов и депрессиях кровли. При дальнейшем охлаждении и сокращении объема коры закалки между нею и кристаллизующимся под ней расплавом возникает область пониженного давления, которая сразу же заполняется остаточной поровой жидкостью, обогащенной летучими веществами. По данным М. А. Осипова [23], таков механизм образования камерных пегматитов, отличающихся изометричной или линзообразной формой и расположенных этажами в апикальных частях куполов гранитов наподобие усадочных раковин в металлургических отливках. Явления термической усадки происходят и в зонах экзоконтакта куполов, что приводит к поступлению в образующиеся контракционные трещины остаточных расплавов и формированию выжатых пегматитов самой различной формы.

2. *Образование вмещающих пегматиты полостей* связано с появлением *трещин разрыва* или *скалывания* при развитии дизъюнктивных дислокаций в консолидированных складчатых областях. Этот механизм наиболее характерен для постскладчатых редкометальных пегматитов, для которых типичны плито-, линзо-, реже трубо- или штокообразные тела. Пегматиты формируются путем заполнения раскрывающихся полостей. При внедрении пегматитового вещества в сложно построенные складчатые сооружения иногда наблюдается дополнительное смятие податливых и пластичных пород с появлением в экзоконтактах вторичной мелкой гофрировки, исчезающей по мере удаления от пегматитовых тел, что свидетельствует об интрузивной силе внедряющегося вещества и является показателем заполнения открывающихся полостей расплавом, а не раствором. Плитообразная форма жил часто осложняется появлением угловатых, ступенчатых, изгибающихся контактов, флексурообразных изгибов, а также ветвлением жил. Каждая из ветвей, в свою очередь, нередко ветвится и разделяется на прожилки, которые иногда вновь соединяются, захватывая прослои — ксенолиты вмещающих пород. При интенсивном развитии метасоматических процессов некоторые ксенолиты вмещающих пород могут быть нацело изменены и превращены в мелкозернистый альбит-слюдистый агрегат. В этом случае объем пегматитовых тел увеличивается за счет ассимиляции вмещающих пород, хотя в целом подобные явления играют весьма небольшую роль.

3. *Раскрытие вмещающих пегматиты полостей связано с процессами складкообразования.* Подобным механизмом Г. Г. Родионов [24] объясняет морфологию ряда синорогенных слюдоносных пегматитов. При образовании антиклинальных складок изгиба в слоистых породах разной компетентности происходит разрыв растянутого пласта и отслоение сжатого. При этом возникают продольно-секущие тела, форма которых может быть клино-, плито-, трубо-, седловидной и т. д. По форме локальных складчатых структур можно выделять различные структурно-морфологические типы пегматитов, имеющие различное практическое значение. Пегматиты этих типов образуются в основном путем выполнения раскрывающихся полостей и в небольшой степени путем переработки ксенолитов вмещающих метаморфических пород.

4. *Образование пегматитовых тел происходит путем замещения вмещающих пород.* Пегматиты на весьма больших и больших глубинах часто образуются путем переработки вмещающих пород. В полях развития ультраметаморфизма местами наблюдается явление укрупнения мигматитов, их слияния и перерастания в пегматиты [1]. Пегматитовые тела замещения характеризуются нечеткими контактами, постепенными переходами от гнейсов к пегматитам, унаследованной гнейсовидной текстурой, широким развитием кристаллобластовых и ситовидных структур, сохранением минералов и минеральных ассоциаций, свойственных замещенным породам субстрата. Критерии, позволяющие отличать пегматитовые тела, возникающие путем замещения вмещающих пород, от тел выполнения полостей, разработаны Б. С. Кингом [36], Г. Е. Гудспидом [34], Г. Рамбергом [38], Р. Кретцем [37] и обобщены И. Н. Тимофеевым [12]. Примерами подобных тел могут служить некоторые слюдоносные пегматиты Мамско-Чуйской провинции, слагающие целые массивы; по реликтам, останцам и «теневым структурам» в таких телах можно проследить детали строения метаморфической толщи, по которым они образовались [29]. Подобные тела могли возникать либо путем селективных выплавок гнейсов, либо путем «магматического замещения», по Д. С. Коржинскому. Наиболее вероятно образование их вследствие ультраметаморфического преобразования пород субстрата в зонах мощных разломов с частичным переплавлением, а иногда и некоторым перемещением возникающих продуктов.

Внутреннее строение пегматитовых тел

Одной из самых характерных черт пегматитов является тенденция к проявлению в них зональности. Эта зональность неоднократно отмечалась А. Е. Ферсманом, ей посвящены монография американских исследователей Е. Н. Камерона, Р. Г. Джанса, А. Г. Мак-Нейра, Л. Р. Пейджа [16], а также работы К. А. Власова, А. А. Беуса, А. И. Гинзбурга, К. Л. Бабае-

ва, Г. Г. Родионова, Н. П. Ермакова, Е. К. Лазаренко с соавторами, М. В. Кузьменко, Н. А. Солодова, И. Б. Недумова, Б. М. Шмакина, А. С. Никанорова и многих других.

Не останавливаясь на деталях зонального строения пегматитов, поскольку они достаточно хорошо известны и многократно описывались в литературе, укажем на следующие важные закономерности.

1. К. А. Власов [3] впервые показал, что на степень дифференциации пегматитов существенное влияние оказывает форма их тел. Можно сформулировать следующее правило К. А. Власова: чем ближе форма пегматитовых тел в плане приближается к окружности, тем более четко в них проявлена зональность. Согласно этому правилу, округлые, штокообразные и трубчатые тела обычно полнодифференцированные, в плитообразных же телах проявляется лишь тенденция к зональности.

2. Процессы замещения в зональных телах наиболее интенсивно проявлены вокруг кварцевых «ядер» пегматитов и особенно под ними. В камерных пегматитах под кварцевыми ядрами обычно расположены миароловые пустоты. Эти явления объясняются Ю. А. Долговым [14] разницей в коэффициентах термического сжатия кварца и полевого шпата в диапазоне температур 500—300° С. Вследствие большей термической усадки кварца по сравнению с полевым шпатом при охлаждении пегматита между кварцем и полевым шпатом образуются зазоры, тем более широкие, чем крупнее их выделения. Возникающий при этом вакуум обусловливает проникновение в образующиеся полости поровых растворов с падением температуры, поскольку этот процесс является адиабатическим. Процессы гидротермального замещения в пегматитах, возникающих на малых глубинах (где контракционные полости вследствие высокой пластичности пород существуют недолго), всегда протекают на определенном этапе пегматитового процесса и проявляются обычно по границам полевого шпата и кварца, особенно вокруг кварцевых ядер или крупных блоков кварца в крупноблоковых и пегматоидных зонах.

3. Редкометальные пегматиты плитообразной формы, обогащенные литием и натрием, имеют весьма характерное внутреннее строение, обусловленное расположением удлиненных индивидов минералов примерно перпендикулярно (обычно под углами 60—90°) к контактам; это типично для кристаллов микроклина, часто для сподумена, иногда турмалина и берилла. Рост кристаллов этих минералов начинается непосредственно от контактов тел (турмалин, берилл, реже сподумен) или от границы приконтактовой мелкозернистой аплитовидной зоны; при этом часто возникают конические (турмалин, берилл) либо расширяющиеся по направлению к центральной части тела кристаллы (сподумен, микроклин). Пегматиты отличаются однородностью, отсутствием зональности (наблюдается только приконтактовая зона мелко- или среднезернистого пегматита), но для них нео-

бычайно характерна структура, при которой все кристаллы сподумена (количество которого нередко достигает 20—25%) размером от 5—10 см до 1 м и более вытянуты почти перпендикулярно к контактам. Эта ориентировка выдерживается и в телах мощностью 10—40 м и более. Зональность выражается только в укрупнении размеров выделений сподумена и блоков микроклина в направлении центральной части тел. Вытянутость кристаллов в одном направлении, по-видимому, обусловлена ориентирующим влиянием поверхности контакта [26]. Таково внутреннее строение наиболее крупных промышленных тел сподуменовых пегматитов.

4. Пегматитовые тела, приуроченные к четко выраженным тектоническим зонам, имеют плитообразную форму, в них отсутствует зональность; строение таких тел весьма неоднородное — наряду с крупнозернистыми могут наблюдаться блоковые, мелкозернистые (сахаро- и аплитовидные) агрегаты в массе крупнозернистого пегматита часто того же состава. В других случаях крупнозернистые агрегаты развиваются по мелкозернистому аплитоподобному агрегату. Текстуры таких пегматитов часто пятнистые, участково-полосчатые, брекчиевидные. В пегматитах появляется большое количество генераций одних и тех же породообразующих минералов. Это позволяет выделить ряд этапов становления пегматитов, разделенных интерминерализационными тектоническими подвижками. В целом внутреннее строение таких пегматитов отличается крайним непостоянством минеральных комплексов; невыдержанность их по простиранию и падению является результатом формирования тел в крайне неспокойных тектонических условиях [2, 5, 19, 26].

Закономерности строения зональных пегматитов: явления пересечения внутренними зонами краевых, накопление в одних и тех же минералах по мере удаления от контакта и перехода к осевым зонам определенных элементов-примесей (например, рубидия в калиевых полевых шпатах), постепенное падение температуры гомогенизации газово-жидких включений в минералах из этих же зон, характер роста минеральных индивидов — все это свидетельствует о том, что пегматиты в целом образовались путем последовательной кристаллизации от периферии к центру в относительно замкнутой системе. В то же время в тектонических зонах формирование пегматитов происходит в условиях многократных приоткрываний трещин и брекчирования уже закристаллизовавшихся пегматитов с привносом вещества из более глубоких зон той же пегматитовой системы, вскипания расплавов, перекристаллизации и замещения ранее образовавшихся минералов.

Минеральный состав пегматитов и геохимическая эволюция процесса

Детальные минералогические исследования, проведенные на многочисленных различных пегматитовых месторождениях мира, подтвердили основное положение А. Е. Ферсмана о том, что в ходе пегматитового процесса закономерно происходит смена минеральных парагенезисов, изменение типоморфных особенностей минералов и единая геохимическая эволюция. За прошедшие годы в пегматитах открыты десятки новых минералов, проведено фундаментальное изучение новых и ранее известных минералов пегматитов. Эти исследования внесли много нового в понимание условий образования минералов пегматитов, уточнили ряд положений А. Е. Ферсмана, но не изменили его представлений коренным образом. Остановимся на наиболее интересных результатах.

1. Минералы и минеральные ассоциации по происхождению могут быть разделены на пять групп: образовавшиеся вследствие взаимодействия пегматитового расплава—раствора с вмещающими породами («ксенолитные» минералы); образовавшиеся путем последовательной кристаллизации из расплава—раствора; образовавшиеся при автометасоматических процессах из остаточных растворов после кристаллизации основной массы породообразующих минералов; «случайные» для пегматитов, связанные с проявлениями вдоль трещин поздних гидротермальных процессов; эти минералы не являются «пегматитовыми» и закономерно не появляются на определенных стадиях развития пегматитового процесса, их можно называть «постпегматитовыми»; связанные с образованием на пегматитах коры выветривания (зоны окисления), с широким развитием гипергенных фосфатов железа и марганца; марганцево-фосфатный (VI тип пегматитов, по А. Е. Ферсману) отвечает «фосфатной» зоне окисления.

В различных пегматитовых формациях роль каждой из указанных пяти групп резко различна. Так, первая группа в хрусталеносных внутригранитных пегматитах практически не развита, но широко распространена в наиболее глубинных пегматитах, возникающих за счет переработки вмещающих пород.

2. Количество минеральных видов, выявленных в гранитных пегматитах, весьма велико (около 210), но породообразующими, определяющими основные процессы минералообразования, являются только плагиоклаз (от альбит-олигоклаза до андезина), калиевый полевой шпат (ортоклаз-микроклин), кварц, сподумен или петалит, альбит и в некоторых пегматитах — слюды (мусковит, лепидолит). Кварц является сквозным минералом. Пегматиты различных формаций отличаются прежде всего содержаниями породообразующих минералов, по которым они могут быть разделены на минеральные типы; с каждой ассоциацией породообразующих минералов связаны определенные акцессор-

ные и рудные минералы (табл. 2). Некоторые исследователи (Н. А. Солодов [28] и др.) называют минеральные типы по составу главнейших породообразующих минералов, другие (А. И. Гинзбург [6]) — по важнейшим рудным минералам.

Все слюдоносные пегматиты содержат примерно в равных количествах ранние плагиоклаз и калиевый полевой шпат, тогда как в редкометальных и хрусталеносных пегматитах резко преобладает калиевый полевой шпат. В редкометальных пегматитах важнейшую роль играют силикаты лития — сподумен или петалит, количество которых достигает 18—25%. Судя по экспериментальным данным [33], сподумен может образовываться при давлениях не менее 5—7 кбар, но примеси в нем железа резко снижают интервалы давления, при которых он устойчив. Петалит же может существовать при более низких давлениях, следовательно, петалитсодержащие пегматиты формируются на меньшей глубине и при более низких давлениях, чем сподуменовые. В то же время петалит является относительно неустойчивым минералом и с понижением температуры либо замещается сподуменом, либо распадается на агрегат сподумена и кварца с образованием специфических псевдоморфоз.

На основе анализа последовательности выделения породообразующих минералов и сопровождающих их минеральных ассоциаций выделяются различные стадии пегматитового процесса: кальциево-натриевая (образование олигоклаза), калиевая (появление микроклина), литиевая (возникновение сподумена или петалита), кремниевая (появление основной массы кварца, гидролиз полевых шпатов), поздняя натриевая (развитие альбита), калиевая (грейзенизация) или калиево-литиевая (появление литиевых слюд). Завершается процесс развитием поздних слюдок (жильбертит, серицит, онкозин) и литиевого хлорита — кукеита, замещающих вместе с кварцем ранее образовавшиеся силикаты. Ход пегматитового процесса в значительной степени определяется режимом основности—кислотности минералообразующей среды.

3. Исследования последних лет подтвердили основные выводы А. Е. Ферсмана о закономерном изменении типоморфных черт минералов пегматитового процесса. Можно считать доказанными следующие положения.

Минералы пегматитов всегда отличаются по некоторым типоморфным особенностям от минералов гидротермальных жил и гранитов, что не позволяет рассматривать пегматиты как переработанные гидротермами граниты.

Минералы и минеральные ассоциации разных пегматитовых формаций различаются по элементам-примесям, структурным особенностям и ряду свойств. Типоморфные черты минералов могут быть использованы для распознавания формационной принадлежности пегматитов по безрудным телам, встречающимся во всех пегматитовых полях. Наиболее важными признаками являются: состав гранатов, соотношение микроклина и кварца

Таблица 2

Минеральные типы гранитных пегматитов

Формация пегматитов	Минеральный тип	Породообразующие минералы	Полезные минералы	Геохимическая специализация	Тип пегматитов, по А. Е. Ферсману
Хрусталеносные пегматиты малых глубин	1. Хрусталеносные, флюоритовые	Микроклин, кварц	Пьезокварц, оптический флюорит	F, TR	IV тип
	2. Топаз-бериллиевые хрусталеносные	То же	Пьезокварц, ювелирные камни (топаз, берилл)	F, Be, Li	То же
Редкометальные пегматиты средних глубин	1. Лепидолит-микролитовые	Топаз, альбит, лепидолит, кварц	Лепидолит, пирохлор-микролит, колумбит-танталит, касситерит, берилл	F, Li, Rb, Cs, Ta, Nb, Sn, Be	Литиевый подтип V типа
	2. Петалит-воджинит-танталитовый	Микроклин, альбит, петалит, кварц	Танталит, воджинит, микролит, петалит, эвкриптит, амблигонит, сподумен, лепидолит, берилл, поллуцит	Ta > Nb, Sn, Li, B, F, P, Rb, Cs, Tl, Be, Sb, Bi	То же
	3. Сподумен-берилл-танталитовый	Микроклин, альбит, сподумен, кварц	Танталит, касситерит, сподумен, амблигонит, лепидолит, берилл, поллуцит	Ta > Nb, Sn, Li, Rb, Cs, Tl, F, B, P, Sn, Be	»
	4. Сподуменовый	Альбит, сподумен, кварц (микроклин)	Сподумен, касситерит, танталит, берилл	Li, B, P, Rb, Sn, Be, Ta, Nb	»
	5. Танталит-касситеритовый	Микроклин, альбит, кварц	Касситерит, колумбит-танталит, берилл	Ta, Nb, Sn, Be, B, P	Na-подтип V типа
	6. Берилл-колумбитовый	Микроклин (альбит) Кварц	Берилл, колумбит, касситерит	Be, Nb > Ta, Sn, B, P	То же
Слюдоносные пегматиты больших глубин	1. Берилл-мусковитовый	Плагиоклаз Микроклин Кварц	Мусковит, берилл, колумбит, уранинит	Be, B, Nb, Ta, U	
	2. Мусковитовый	Плагиоклаз Микроклин Кварц	Мусковит	B, P, Be	III тип (шерл-мусковитовый)
	3. Редкоземельно-мусковитовый	Плагиоклаз Микроклин Кварц	Мусковит, монацит, ксенотим, эвксенит	TR, Th, P, B	II тип
Керамические (редкоземельные)	1. Монацитовые пегматиты	Плагиоклаз Микроклин Кварц	Керамическое сырье	TR, Th, P	I тип
	2. Ортитовые пегматиты	Плагиоклаз Кварц	То же		То же

в графических пегматитах, содержание альбитовой составляющей в калиевых полевых шпатах, отношения в полевых шпатах Ba/Sr, Ba/Rb, K/Rb, K/Ba, Rb/Cs, отношения в биотитах и турмалинах Fe/Mg, содержания в них Ti, Zn, Sc, Li и др.

«Сквозные минералы» пегматитов каждой формации, выделяющиеся в различные стадии процесса, всегда обладают индикаторными свойствами. Так, микроклины различаются по содержаниям Rb, Tl, Cs, турмалины — по составу и окраске, берилы — по содержанию щелочей (Na, Li, Cs), колумбиты — по отношениям Ta/Nb и Fe/Mn, а также цвету черты и т. д. Эти типоморфные особенности минералов позволяют «маркировать» ход развития процесса и могут быть использованы в качестве поисково-оценочных критериев [8].

4. В пегматитовых полях каждой формации наблюдается горизонтальная и вертикальная зональность в размещении пегматитов различных минеральных типов и в проявлении в них разных стадий процесса; это позволяет говорить о существовании единой эволюции и разной степени «вызревания» [4] пегматитового процесса, определяющих характер минерализации. Поскольку степень «вызревания» процесса зависит от фугитивности и режима летучих, существует тенденция к появлению наиболее минерализованных пегматитов в апикальных участках пегматитовых полей, локализации их в местах раздувов и в различных структурных ловушках, благоприятствующих концентрации летучих веществ. На ход эволюции пегматитового процесса оказывает влияние и состав вмещающих пород. Резко контрастная среда (вмещающие породы — анортозиты, габбро-амфиболиты) способствует интенсивному рудообразованию, поскольку она оказывает влияние на изменение основности — кислотности пегматитообразующих расплавов—растворов.

Вертикальная зональность является следствием закономерной смены характера оруденения пегматитов с глубиной. Так, в последние годы установлено, что промышленное танталовое оруденение с глубиной сменяется литиевым. Эта закономерность особенно четко проявлена в пологозалегающих телах, в которых верхние жилы резко обогащены танталом, а находящиеся под ними жилы бедны им, но к ним приурочено промышленное литиевое оруденение.

5. Минеральный состав пегматитов обусловлен не только их формационной принадлежностью и образованием на разной стадии «вызревания» процесса, но и второстепенным влиянием состава вмещающих пород (появление «ксенолитных» минералов) и геохимической специализацией рудной провинции. Например, редкометальные пегматиты одних провинций обогащены висмутом, других — мышьяком или даже сурьмой, третьих — вольфрамом или цезием, тогда как совершенно аналогичные месторождения иных провинций практически не содержат минералов этих элементов.

6. Самая характерная черта пегматитов разных регионов, возрастов и формаций заключается в том, что в их формировании прослеживается строго определенная геохимическая эволюция, впервые установленная А. Е. Ферсманом. Громадный новый фактический материал позволяет ее несколько уточнить и использовать в практических целях. В ходе развития пегматитового процесса содержание одних элементов закономерно убывает (Mg, Fe, Ti, Zn, Sc, Ba), количество других возрастает (Rb, Tl, Cs, Ga, Ta, Pb, Bi, Sb). Весьма своеобразно ведет себя марганец, содержание которого постепенно растет и становится повышенным на стадии альбитизации, а затем постепенно убывает. Отношения $Fe^{2+}/Fe^{3+}/Mn^{2+}$ определяют всю гамму цветов минералов пегматитов и являются фактором изменения их свойств. В ходе эволюции пегматитового процесса закономерно меняются также отношения Nb/Ta (накопление тантала к концу процесса), Rb/Cs, TR_{Ce}/TR_{Y}, Zr/Hf, Ba/Sr и др. Различные процессы замещения приводят к некоторому перераспределению элементов, которое может осложнять общую картину. Так, например, процессы замещения железосодержащих минералов приводят к переводу части железа в растворы, следствием чего оказывается появление в самые поздние гидротермальные стадии железосодержащих минералов; таково, например, образование железосодержащих хлоритов, появление черных каемок на рубеллитах и т. д.

Следствием проявления геохимической эволюции являются: появление на каждой стадии пегматитового процесса минеральных ассоциаций с характерными типоморфными особенностями; например, к концу процесса образования редкометальных пегматитов, когда в остаточных растворах практически не остается железа, становится возможным формирование таких необычных минералов, как соединения тантала и алюминия (симпсонит), тантала и висмута (угандит), тантала и олова (воджинит, торолит, старингит), тантала и сурьмы (стибиотанталит, холтит, цезстибтантит) и т. д.; возможность оценивать по индикаторным отношениям элементов в породообразующих минералах (например, по отношениям K/Rb, Rb/Cs в микроклинах, лепидолитах) появление тех или иных минералов в пегматитах; возможность использовать ряд минералов (турмалин, гранат и др.) как индикаторы оруденения.

Околопегматитовые изменения вмещающих пород

Хотя пегматитовый процесс в целом может протекать в замкнутой системе, между заполняющим полости расплавом—раствором и вмещающими породами всегда осуществляется определенный тепло- и массообмен, интенсивность которого зависит от ряда факторов: состава вмещающих пород, степени их трещиноватости, обогащенности расплава летучими веществами, глубинности формирования и размеров тел пегматитов. Массооб-

мен приводит, с одной стороны, к выносу летучих соединений (воды, щелочных элементов, фтора) из пегматитов в зоны экзоконтакта, а с другой — к обогащению преимущественно экзоконтактовых зон пегматитов рядом компонентов вмещающих пород (Al_2O_3, CaO, MgO, FeO, TiO_2 и др.).

При формировании хрусталеносных камерных внутригранитных пегматитов эти процессы играют небольшую роль, поскольку пегматиты по составу мало отличаются от гранитов. Тем не менее вмещающие граниты иногда изменяются на поздних стадиях пегматитового процесса, особенно вокруг нижних частей пегматитовых камер, главным образом под ними. Эти изменения были детально изучены на примере пегматитов Волыни [18] и заключаются в обогащении гранитов биотитом (появлении меланократовых разностей гранитов), в выщелачивании кварца и образовании «пористых» гранитов, а также в развитии микроклинизации (зон «сиенитизации»). Мощность зоны измененных гранитов под крупными пегматитовыми камерами составляет 12—15 м. Появление в гранитах зон выщелачивания кварца является признаком продуктивности камерных пегматитов, поскольку переотложение кремнезема способствует росту в заноpышах крупных кристаллов кварца.

Для редкометальных пегматитов можно указать следующие особенности изменения вмещающих пород.

1. При залегании пегматитов в гранитах или кварцитах изменения этих пород весьма незначительны и проявляются на расстоянии не более 2—5 см от контакта.

2. При образовании пегматитов в мраморах последние вокруг пегматитов слабо перекристаллизованы, серые (с органическим веществом) мраморы становятся белыми, на контактах пегматитов и мраморов образуется маломощная (несколько сантиметров) зона, состоящая из цоизита, апатита, маргарита, флюорита, в пегматитах появляется много графита и плагиоклаза.

3. Наиболее интенсивны процессы изменения при образовании пегматитов в основных породах (габбро, амфиболитах). В этом случае изменение вмещающих пород нередко прослеживается на расстоянии до 25—30 м и более. Около пегматитовых тел последовательно образуются зоны турмалинизации, биотитизации или хлоритизации и развития литиевого амфибола — гольмквистита. Непосредственно в зоне экзоконтакта появляются цоизит-эпидот, апатит, иногда турмалин. Из пегматитов в большом количестве выносятся калий, литий, рубидий, цезий, в связи с чем вокруг пегматитовых тел возникают мощные геохимические ореолы щелочных металлов, причем ореолы цезия и рубидия обычно меньше ореолов лития. Детальные минералого-петрографические и геохимические исследования показывают, что вмещающие породы изменяются синхронно с развитием пегматитового процесса; наибольшая интенсивность их преобразования совпадает с развитием в пегматитах метасоматических процессов. При наличии в пегматитах поллуцита цезий (совмест-

но с фтором из пегматитов) в значительных количествах может выноситься и входить в состав возникающих непосредственно в экзоконтактах пегматитовых тел богатых фтором цезиевых биотитов; содержание Cs_2O в них может достигать 6% и более. В результате образуются специфические биотитовые цезиевые слюдиты, которые представляют новый тип цезиевого сырья [11, 22]. Возникающие вокруг пегматитов ореолы могут создаваться как диффузионным, так и инфильтрационным процессами; форма геохимических ореолов часто сложная и зависит от характера трещиноватости пород.

Вынос из пегматитов щелочей при прочих равных условиях зависит от кристаллохимических особенностей породообразующих минералов вмещающих пород, изоморфной емкости их по отношению к выносимым элементам. Одни породы активно поглощают компоненты летучих соединений, способствуя их выносу из пегматитов и образованию обширных ореолов рассеяния, другие породы служат своего рода барьерами, препятствующими выносу летучих соединений из пегматитов, а это сказывается на их содержании в рудных телах.

При образовании слюдоносных пегматитов роль вмещающих пород весьма велика. Давно известно, что пегматиты с максимальным содержанием мусковита чаще всего приурочены к высокоглиноземистым гнейсам, богатым кианитом, иногда силлиманитом. При гидролизе полевых шпатов и развитии кварц-мусковитового комплекса происходит вынос из пегматитов калия, кремнекислоты и воды. Этот процесс в значительной степени регулируется способностью боковых пород воспринимать выносимые компоненты или некоторые из них. Наиболее благоприятны для интенсивного слюдообразования в пегматитах высокоглиноземистые кианитовые плагиогнейсы. Геохимические ореолы рудных элементов вокруг слюдоносных пегматитов практически не образуются, но вмещающие породы характеризуются резко повышенными содержаниями воды и углекислоты, появлением ореолов «пропаривания»; это позволяет успешно применять при поисках слепых тел декрептометрию.

Значительная часть слюдоносных пегматитов, как уже указывалось, образуется за счет переработки вмещающих пород.

Физико-химические условия образования пегматитов

Исследования последних лет характеризуются широким развитием экспериментальных работ, применением для расшифровки условий образования пегматитов методов термобарометрии, которые позволяют количественно оценить физико-химические параметры пегматитового процесса.

В раскрытии всей сложности образования пегматитов большую роль играют следующие данные, полученные при изучении гранитной системы с летучими и легкоподвижными компонентами.

1. Представления о возможности существования особого пегматитового расплава, предельно насыщенного водой, после опытов Р. У. Горансона, установившего незначительную растворимость воды в силикатном расплаве, были отвергнуты, чему способствовало критическое рассмотрение хода кристаллизации силикатной системы с водой, проведенное А. Н. Заварицким. Между тем изучение этой же системы при более высоких давлениях показало, что при давлениях более 4 кбар растворимость воды существенно увеличивается. Работами О. Ф. Таттла показано, что в присутствии избытка щелочей растворимость воды резко увеличивается и при более низких давлениях. Водонасыщенные магмы при этом могут переходить в гидротермальные растворы. Эти явления имеют место в случае, когда в ходе кристаллизации расплава появляется избыток щелочей над глиноземом; происходит концентрация в остаточных растворах щелочных силикатов. Добавки лития и фтора способствуют переходу силикатного расплава в водный раствор. Таким образом, на ход кристаллизации существенно влияет агпаитность расплавов, обогащенность их щелочами и фтором. При кристаллизации агпаитовых магм расплавы могут непрерывно переходить в раствор без критических явлений. Возможно, этим объясняется отсутствие четких критериев, позволяющих различать пегматиты агпаитовых магм от гидротермальных образований.

2. Экспериментально доказано, что добавки к гранитному расплаву щелочей, особенно лития, а также фтора, играющих роль плавней, приводят к снижению температуры начала кристаллизации. Так, при добавлении к граниту 1% Li_2O температура его плавления снижается до 570° С; тем самым при кристаллизации богатых литием расплавов резко сокращается разрыв между магматической и гидротермальной стадиями процесса, и в образовании пегматитов, особенно редкометальных, большую роль могут играть низкотемпературные легкоплавкие магматические расплавы. Растворимость воды в таких фторсодержащих расплавах повышенная.

3. Как справедливо указывает А. С. Никаноров [20], в последние годы получено много новых данных, облегчающих понимание эвтектической кристаллизации. Старые представления о том, что эвтектика обязательно должна привести к образованию структур типа графических, оказались неверными. В эвтектических образованиях выделяются основная матрица (в пегматитах — полевой шпат) и дисперсная фаза, образующая вростки в матрице (в пегматитах — кварц). Формы вростков дисперсной фазы обусловлены скоростью роста матрицы, зависящей не только от хода процесса, но и от присутствия в матрице определенных элементов-примесей (чаще всего щелочей, особенно натрия), играющих роль модификаторов. Графические структуры возникают только при определенном соотношении скоростей роста матрицы и дисперсной фазы, во всех

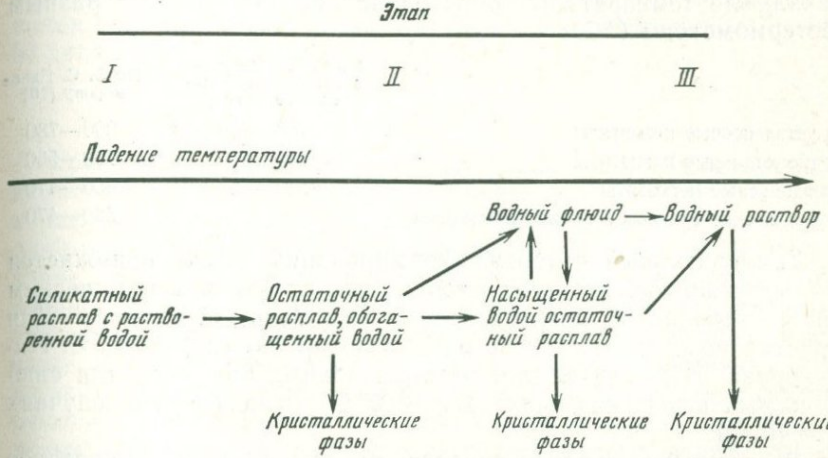
других случаях могут возникать структуры иного типа вплоть до образования изометричных зерен. Наряду с обычной, так называемой регулярной эвтектикой, при которой возникают графические структуры, выделяются нерегулярные, неупорядоченные эвтектики, при которых образуются структуры, напоминающие неясногра фические, апографические, пегматоидные; до последнего времени они рассматривались как результаты перекристаллизации и метасоматоза. Переход (перерождение) регулярных эвтектик в нерегулярные может быть вызван влиянием элементов-модификаторов, изменяющих условия роста. С этих позиций эвтектическими следует считать не отдельные графические зоны, в пегматитовые тела в целом, если их валовой состав приближается к эвтектическому. Смену разных структур пегматитов от периферии к центру А. С. Никаноров [20] объясняет снижением скорости кристаллизации пегматитов во времени и влиянием элементов-модификаторов (натрий, вода, литий и др.).

4. По данным Р. Г. Джанса и К. В. Бэрнема [35], в ходе кристаллизации в замкнутой системе пегматитового расплава, содержащего 1—2% воды, по мере выделения безводных минералов (полевого шпата, кварца) остающийся расплав обогащается водой до полного насыщения. При дальнейшей кристаллизации будет выделяться водная фаза, сосуществующая с насыщенным водой расплавом. Таким образом, на определенной стадии развития процесса по мере падения температуры происходит отделение воды от остаточного расплава или флюида («сбрасывание» воды, по Н. И. Хитарову); становится возможным одновременное существование выделившейся твердой фазы, остаточного расплава и водной паровой фазы. Вследствие этого в одно и то же время в пегматитовом теле могут происходить фракционная кристаллизация из расплава и замещение под воздействием водных флюидов. Р. Г. Джанс и К. В. Бэрнем считают, что в этот период и возникают гигантские кристаллы минералов, столь характерные для многих пегматитов. В дальнейшем при кристаллизации количество водной фазы все больше увеличивается, она начинает превалировать, и процесс становится гидротермальным. Схематически ход кристаллизации магматического расплава, содержащего некоторое количество воды (порядка 1—2%), изображен на фиг. 2.

Таким образом, в ходе развития пегматитового процесса в замкнутой системе выделяются три этапа: I — магматический — кристаллизация происходит из расплава; II — надкритический — сосуществуют остаточный расплав, предельно насыщенный водой, и водный флюид или же два несмешивающихся флюида (водный силикатный и водный); III — гидротермальный — кристаллизация происходит из водного раствора. На этом этапе наиболее широко развиты метасоматические процессы и ранее образовавшиеся кристаллические фазы — минералы интенсивно замещаются. При становлении формаций пегмати-

тов различной глубинности роль этих трех этапов, естественно, различна.

Существенно влияние на ход процесса других летучих веществ, в первую очередь углекислоты, хлора и фтора. Поскольку повышение содержания углекислоты приводит к понижению растворимости воды в гранитном расплаве, постольку в расплавах, обогащенных углекислотой, отделение водной фазы будет происходить при более высоких температурах и раньше, чем в пегматитовых расплавах, не содержащих углекислоту. Фтор,



Фиг. 2. Схема кристаллизации магматического расплава, содержащего воду

наоборот, способствует большей растворимости воды в расплавах, и повышенные его содержания будут способствовать растянутости магматического этапа и отделению водного флюида при более низких температурах. Повышенные содержания фтора могут привести к ликвации и расслоению остаточного расплава на силикатный и существенно фтористый. Если в существенно фтористом расплаве концентрируется калий, то этот расплав способен в большом количестве растворять воду [13]; водный флюид в этом случае может и не отделяться.

На протяжении последних лет, главным образом благодаря исследованиям Н. П. Ермакова, Ю. А. Долгова, Л. Ш. Базарова, И. Т. Бакуменко, А. И. Захарченко, В. А. Калюжного, В. М. Макагона, А. С. Таланцева, В. Н. Труфанова и многих других, был получен громадный фактический материал по температурам гомогенизации газово-жидких включений в минералах пегматитов, который был сопоставлен с результатами использования других геотермометров. Полученные данные применительно к различным формациям пегматитов были частично обобщены в работах Н. П. Ермакова, В. А. Калюжного, Е. К. Лазаренко и др., А. С. Никанорова, Г. Г. Родионова с соавторами, Л. Н. Россовского, Б. М. Шмакина и В. М. Мака-

гона [31, 32]. Несмотря на ряд расхождений, обусловленных несовершенством применявшихся методов и отсутствием в некоторых работах, основанных на методах гомогенизации, поправок на давление, можно сделать следующие выводы.

Пегматитовый процесс в целом развивается на фоне постепенного понижения температуры в интервале от 800—700 до 200—150° С; при этом для разных формаций пегматитов температура начала их формирования неодинакова. Г. Г. Родионов с соавторами [25] и А. С. Никаноров [20] приводят следующие начальные температуры образования пегматитов, по разным геотермометрам (° С):

	По Г. Г. Родионову и др. [25] (графический пегматит)	По А. С. Никанорову [20]
Хрусталеносные пегматиты	780—700	800—780
Редкометальные пегматиты	650—600	700—560
Слюдоносные пегматиты	510—480	560—470
Керамические (редкоземельные) пегматиты	—	560—470

Температурный интервал формирования резко понижается от хрусталеносных пегматитов малых глубин к керамическим (редкоземельным) пегматитам весьма больших глубин. Для хрусталеносных пегматитов он составляет, по данным А. С. Никанорова, 780—510° С, для редкометальных 560—400, для слюдоносных и керамических 470—300° С (в некоторых случаях 60—40° С).

В зональных телах отчетливо прослеживается постепенное понижение температур образования минералов от периферии к центру и от апикальных частей к нижним. Наиболее низкие температуры образования хрусталеносных тел А. С. Таланцевым определены по минералам занорышевой области ниже кварцевого ядра. Эти температуры показывают, что пегматиты в основном образуются путем последовательной фракционной кристаллизации от стенок полостей к центру.

Формирование пегматитов обычно начинается при избыточном давлении, которое в несколько раз превышает литостатическое и понижается к концу процесса. Давление в газово-жидких включениях в керамических пегматитах составляет 1,5—3 кбар, в слюдоносных — 1,25—2,5 (до 5—7), в редкометальных — 0,06—1,5, в хрусталеносных — 0,03—1,2 кбар.

Расплавные включения, высокие температуры образования (выше точки инверсии кварца), эвтектические структуры и другие данные однозначно свидетельствуют о том, что периферические зоны пегматитовых тел (аплитовидная, среднезернистая, графическая) образовались путем кристаллизации из магматического расплава. Что же касается минералов апографических, пегматоидных, блоковых зон, то детальное изучение состава включений, температур образования, структуры и зональности минеральных индивидов заставляет считать, что они также первоначально возникали из расплавов, а затем подверглись воз-

действию надкритических растворов, иногда достаточно концентрированных. Температура гомогенизации сподумена из блоковых зон разных месторождений варьирует от 410—460 до 550° С [26], т. е. близка к температуре плавления силикатного состава, содержащего 1% Li_2O. Все минералы, связанные с замещающими комплексами, возникают из надкритических или гидротермальных растворов.

Как видно из приведенных данных, температурная градуировка пегматитового процесса и место в ней различных минеральных ассоциаций, определенные современными методами, в целом весьма близки к тем, которые были намечены свыше 50 лет назад А. Е. Ферсманом [30].

Заключение

Гранитные пегматиты — породы анхиэвтектического состава, обогащенные летучими и подвижными компонентами, могут в различных структурных этажах земной коры возникать различными путями. В верхних структурных этажах их формирование связано с гранитными куполами при локальном обогащении апикальных участков массивов летучими соединениями. Это обогащение может быть обусловлено разными причинами, чаще всего образованием под корой закалки усадочных полостей, в которые устремляются летучие вещества; так формируются внутригранитные хрусталеносные камерные или миароловые пегматиты. В тектонически неспокойных условиях пегматитовый материал может быть «выжат» за пределы камер с образованием жильных тел.

В средних структурных этажах, на глубинах порядка 3—8 км, пегматитообразующие расплавы возникают вследствие далеко зашедшей дифференциации палингенных аллохтонных гранитных комплексов. Пегматиты локализуются в узких тектонических зонах и представлены полями, протягивающимися на многие километры. Такие поля можно рассматривать как результат особой фазы развития интрузивных комплексов. В них находит свое завершение геохимическая эволюция, четко прослеживаемая от ранних интрузивных фаз к поздним, и концентрируются те редкие элементы, которые накапливаются в расплаве к концу интрузивного процесса.

В нижних структурных этажах земной коры (в глубинных условиях) возникновение пегматитообразующих расплавов связано с процессами ультраметаморфизма. Под воздействием повышенных тепловых потоков, сопровождаемых и привносом летучих, развиваются явления анатексиса и возникают расплавы, по составу близкие к эвтектическим. Не исключена возможность формирования в этом случае пегматитов вследствие метаморфической дифференциации без образования расплавов.

Пегматитовый процесс развивается в относительно замкнутой системе. Об этом свидетельствуют единая четко выражен-

ная зональность пегматитовых тел, существование строго выдержанной для всех пегматитов мира единой геохимической эволюции, появление тех или иных минеральных ассоциаций только на определенных этапах развития пегматитового процесса, отсутствие каких-либо подводящих каналов, по которым могли быть привнесены те или иные элементы пегматитов из глубин. В то же время между пегматитовым расплавом и вмещающими породами всегда происходит тепло- и массообмен, в первую очередь зависящий от состава вмещающих пород и физико-химической обстановки формирования пегматитов. Поэтому строго замкнутым пегматитовый процесс никогда не бывает. Вокруг редкометальных пегматитов в связи с выносом щелочей образуются геохимические ореолы лития, рубидия и цезия. В определенных условиях в экзоконтактах могут возникать зоны биотитовых слюдитов, обогащенные цезием,— цезиевые руды нового типа.

В ходе пегматитового процесса вследствие разницы в термической усадке кварца и полевого шпата по границам их выделений образуются трещины, способствующие вскипанию остаточных растворов и развитию процессов замещения. Поскольку пегматиты часто приурочены к долгоживущим тектоническим зонам, формирование их нередко сопровождается интерминерализационными подвижками. Последние приводят к дроблению ранее образовавшихся участков пегматитового тела и делают возможным поступление из более глубоких частей тел новых порций расплавов—растворов, их вскипание и взаимодействие с ранее образовавшимися минералами. В результате внутреннее строение пегматитовых тел резко усложняется, появляются атакситовые, полосчатые и линзовидно-полосчатые текстуры, участки дробления. Последние цементируются, и их структура преобразуется в аплитоподобную или сахаровидную.

Пегматитовый процесс начинается как магматический, а завершается как гидротермальный. В его становлении можно выделить три этапа: магматический (кристаллизация из силикатного расплава); надкритический (кристаллизация из остаточного расплава, предельно насыщенного водой, при сосуществовании отделившегося водного флюида, способствующего развитию перекристаллизации и метасоматоза); гидротермальный (образование минералов из водных растворов). При высоких содержаниях лития и фтора возможны явления ликвации и отделения расплава, богатого литием и фтором. В пегматитах различной глубинности роль этих трех этапов различна.

В гипабиссальных условиях вместо пегматитов возникают их аналоги — «редкометальные» граниты и онгониты. Пегматиты не переходят в гидротермальные рудные жилы, тогда как «редкометальные» граниты тесно с ними связаны и образуют с ними единую рудно-магматическую систему.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Бабошин В. А.* О возможных формах проявления литологического контроля пегматитов слюдоносных областей.— Тр. ВСЕГЕИ, 1969, **147**, вып. 2, с. 7—20.
2. *Барсанов Г. П., Теремецкая А. Г., Чернуха Ф. П.* Некоторые особенности внутреннего строения и генезиса одного из полей редкометальных пегматитов Восточного Саяна.— Вестн. МГУ. Сер. 4, Геология, 1970, № 6, с. 18—30.
3. *Власов К. А.* Значение форм гранитных пегматитов.— Докл. АН СССР, 1943, **41**, № 9, с. 339—402.
4. *Власов К. А.* Факторы образования различных типов редкометальных пегматитов.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1956, № 1, с. 65—89.
5. *Гинзбург А. И.* О некоторых группах гранитных пегматитов, образовавшихся в различных геологических условиях.— Разведка недр, 1952, № 2, с. 6—16.
6. *Гинзбург А. И.* Типы месторождений редких элементов.— В кн.: Геология месторождений редких элементов. М.: Госгеолтехиздат, 1961, вып. 14, с. 26—86.
7. *Гинзбург А. И.* Источники рудного вещества в эндогенных месторождениях литофильных редких элементов.— Геология руд. месторождений, 1975, № 4, с. 44—52.
8. *Гинзбург А. И.* Практические аспекты учения о типоморфизме минералов.— В кн.: Труды 2 Совещания по типоморфизму. М.: Наука, 1980, с. 3—10.
9. *Гинзбург А. И., Родионов Г. Г.* О глубинах образования гранитных пегматитов.— Геология руд. месторождений, 1960, № 1, с. 45—54.
10. *Гинзбург А. И., Фельдман Л. Г.* Геохимическая направленность процессов формирования редкометальных гранитов и пегматитов.— В кн.: I Международный геохимический конгресс: Доклады. М.: ГЕОХИ АН СССР, т. III, кн. 2, 1972, с. 261—274.
11. *Гинзбург А. И., Луговской Г. П., Рябенко В. Е.* Цезиевые слюды — новый тип оруденения.— Разведка и охрана недр, 1972, № 8, с. 3—7.
12. *Гинзбург А. И., Тимофеев И. Н., Фельдман Л. Г.* Основы геологии гранитных пегматитов. М.: Недра, 1979. 293 с.
13. *Глюк Д. С., Анфилов В. Н.* Фазовые равновесия в системе гранит—H_2O—KF при давлении паров воды 1000 кг/см^2.— Геохимия, 1973, № 10, с. 1560—1565.
14. *Долгов Ю. А.* Давление и температура в процессе формирования камерных пегматитов.— Докл. АН СССР, 1968, **178**, № 5, с. 1171—1174.
15. *Заварицкий А. Н.* Основной вопрос физической химии процесса образования пегматитов.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1944, № 5, с. 12—40.
16. *Камерон Е. Н., Джанс Р. Г., Мак-Нейр А. Г., Пейдж Л. Р.* Внутреннее строение гранитных пегматитов. М.: Изд-во иностр. лит., 1951. 147 с.
17. *Коваленко В. И., Коваленко Н. И.* Онгониты. М.: Наука, 1976. 120 с.
18. *Лазаренко Е. К., Павлишин В. И., Латыш В. Т., Сорокин Ю. Г.* Минералогия и генезис камерных пегматитов Волыни. Львов: Вища школа, 1973. 358 с.
19. *Недумов И. Б.* Магматизм и пегматитообразование. М.: Наука, 1975. 236 с.
20. *Никаноров А. С.* Гранитные пегматиты. М.: Недра, 1979. 168 с.
21. *Никитин В. Д.* К теории генезиса пегматитов.— Зап. Ленингр. горн. ин-та, 1955, вып. 2, с. 44—117.
22. *Овчинников Л. Н., Полетаев И. А., Рябенко В. Е.* и др. О цезиевом биотите как о возможном источнике промышленного получения цезия и других щелочных металлов.— Докл. АН СССР, 1972, **206**, № 3, с. 698—701.
23. *Осипов М. А.* Усадочные явления в остывающих магмах как причина образования камерных пегматитов.— Геология руд. месторождений, 1967, № 6, с. 28—40.
24. *Родионов Г. Г.* Типы слюдоносных пегматитов и их промышленная оценка. М.: Госгеолтехиздат, 1959. 83 с.
25. *Родионов Г. Г., Калугин Е. Н., Бушев А. Г.* Магматогенные пегматиты и

некоторые вопросы их генезиса.— В кн.: Слюдяные пегматиты. М.: ВИМС, 1974, с. 21—80.
26. *Россовский Л. Н.* Закономерности формирования месторождений сподуменовых пегматитов.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1979, № 8, с. 37—52.
27. *Соколов Ю. М.* Метаморфогенные мусковитовые пегматиты. Л.: Наука, 1970. 186 с.
28. *Солодов Н. А.* Внутреннее строение и геохимия редкометальных пегматитов. М.: Изд-во АН СССР, 1962. 223 с.
29. *Тимофеев И. Н.* Формы реликтовых образований в пегматитах месторождения Большое Северное.— Тр. ИГЕМ АН СССР, 1961, вып. 48, с. 55—60.
30. *Ферсман А. Е.* Пегматиты. 3-е изд. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940, т. 1. 712 с.
31. *Шмакин Б. М.* Мусковитовые и редкометально-мусковитовые пегматиты. Новосибирск: Наука, 1976. 368 с.
32. *Шмакин Б. М., Макагон В. М.* Физико-химические условия процессов формирования мусковитовых пегматитов.— В кн.: I Международный геохимический конгресс: Доклады. М.: ГЕОХИ АН СССР, 1972, т. III, кн. 2, с. 410—419.
33. *Штернберг А. А., Иванова Т. Н., Кузнецова В. А.* Сподумен — минерал-профундометр.— Докл. АН СССР, 1972, 202, № 1, с. 175—178.
34. *Goodspeed G. E.* Dilation and replacement dikes.— J. Geol., 1940, 48, p. 175—195.
35. *Jahns R. H., Burnham C. W.* Experimental studies of pegmatite genesis: I. A model for the derivation and crystallization of granitic pegmatites.— Econ. Geol., 1959, 64, p. 843—864.
36. *King B. C.* The foem and structural features of aplite and pegmatite dikes and veins in the Osiarea of the Northern provinces of Nigeria and the criteria that indicate a nondilational mode of emplacement.— J. Geol., 1948, 56, p. 459—475.
37. *Kretz R.* Study of pegmatite bodies and enclosing rocks. Yellowknife — Beaulieu region, district of Mackenzie.— Bull. Geol. Surv. Canada, 1968, 159, p. 109.
38. *Ramberg H.* Pegmatites in West Greenland.— Geol. Soc. Amer. Bull., 1956, N 67, p. 185—214.

УДК 553.042.(091)

Г. А. МИРЛИН

СОВРЕМЕННЫЕ ПРОБЛЕМЫ МИНЕРАЛЬНЫХ РЕСУРСОВ

Индустриальное могущество современного государства и технический прогресс промышленности в значительной мере определяются степенью использования минеральных богатств, извлекаемых из недр. Это положение, которое в настоящее время звучит аксиомой, более полувека тому назад высказывалось и развивалось такими корифеями советской геологической науки, как В. И. Вернадский, А. Е. Ферсман, И. М. Губкин, А. Д. Архангельский. В годы первых пятилеток и первых шагов индустриализации СССР Александр Евгеньевич Ферсман с присущей ему энергией и темпераментом аргументировал необходимость широкого и вместе с тем наиболее рационального использования минерально-сырьевых богатств страны в интере-

сах развития социалистической экономики Советского государства. Трудно переоценить роль А. Е. Ферсмана в постановке и разрешении многих трудных проблем минерального сырья, возникавших в те годы. Он умел блестяще сочетать фундаментальные теоретические исследования с решением вопросов, имевших чисто прикладной характер, крайне актуальных для горнодобывающей промышленности того времени.

Одной из самых важных идей, которую с большой настойчивостью развивал А. Е. Ферсман, была идея о необходимости освободить экономику страны от завода «чужеземного сырья» и обеспечить Советскую республику возможностью самостоятельно снабжать себя всеми главнейшими видами сырья [16]. Как и другие положения А. Е. Ферсмана о значении минеральных богатств для технического прогресса страны, идея о полной независимости Советского государства от зарубежных сырьевых источников сохранила свое значение и в наши дни.

Происходящее в настоящее время в большинстве стран мира интенсивное развитие промышленности выдвинуло в качестве одной из сложнейших научно-технических и экономических проблем современности проблему выявления и подготовки новых крупных и надежных источников минерального сырья. Проблема обеспеченности дальнейшего развития человеческого общества минерально-сырьевыми ресурсами приобрела во второй половине XX в. глобальный характер.

Еще в 1926 г. А. Е. Ферсман подсчитал, что человек «истребил» за свою историю 50 млрд. т угля, добыл 2 млрд. т железа, 80 млн. т меди, свинца и цинка, и даже золота он извлек 20 тыс. т. Позднее было подсчитано, что только в течение первой половины XX столетия из земных недр было извлечено полезных ископаемых больше, чем за всю предшествующую историю человеческой цивилизации. Однако вторая половина XX в. и особенно последнее двадцатилетие (1961—1980 гг). характеризуются еще более ускоренными темпами роста потребления минерального сырья и громадными масштабами его добычи (см. фигуру). На диаграмме по углю, нефти, природному газу, железной руде, калийным солям и фосфатным рудам приведены данные о мировой добыче; по остальным полезным ископаемым — без социалистических стран. Данные по углю учитывают добычу каменного и бурого угля, в основном в пересчете на товарный уголь. Данные по нефти включают добычу газового конденсата. По железной руде, бокситам, калийным солям и фосфатным рудам указана товарная руда. По меди, цинку, никелю и золоту указан извлекаемый металл; данные по урану (U_3O_8), вольфраму (WO_3) и молибдену приведены по их содержанию в концентрате; по алмазам и асбесту указан извлекаемый минерал. Подсчет добычи за период 1901—1980 гг. проведен по данным, публикуемым в статистических сборниках ЦСУ СССР, в БИКИ МВТ СССР и др.; за период до 1900 г. — ориентировочная оценка.

Во-первых, из диаграммы видно, что суммарное количество минерального сырья, добытого из земных недр в течение нашего столетия, во много раз превосходит указанные выше величины «истребленных человеком» минеральных богатств.

Во-вторых, приведенные цифры свидетельствуют о необычайно быстром, почти экспоненциальном характере роста потребления и добычи многих полезных ископаемых, при котором в каждый следующий временной период (в данном случае — в каждые 20 лет XX в.) происходит гигантское ускорение извлечения минеральных богатств из земных недр. Именно такой «взрывоподобный» характер роста потребления и добычи минерального сырья послужил основанием для тревоги многих исследователей (особенно в США и других промышленно развитых западных странах) по поводу «конечности» минеральных ресурсов.

В-третьих, из приведенных материалов следует, что из всего объема минерального сырья, извлеченного из недр планеты, наибольшее количество приходится на 1961—1980 гг.: свыше 37% угля, 48% железной руды, почти 73% нефти, около 78% природного газа. Из общего количества урана, добытого из недр капиталистических и развивающихся стран с начала его использования в крупных промышленных масштабах, свыше 77% также приходится на последний 20-летний период. В связи с быстрым ростом производства алюминия как одного из лучших конструкционных материалов с громадным ускорением росла (и продолжает расти сейчас) добыча бокситов: за 1961—1980 гг. она почти в 4 раза превысила суммарную добычу за предшествующие 60 лет и составила около 80% всей добычи бокситов с начала века. Ускоренными темпами развивалось производство металлов, связанных с научно-техническим прогрессом в промышленности, особенно с развитием качественной металлургии, электротехники, приборо- и машиностроения: за последнее 20-летие добыча и производство молибдена, являющегося одним из важнейших легирующих металлов, составили 70% его количества, произведенного с начала XX в., никеля — около 64, вольфрама — 47%. С каждым новым 20-летием ускоренно увеличивались добыча и производство меди, цинка, алмазов, асбеста, калийных солей, фосфатных руд и многих других полезных ископаемых. Несколько более медленными темпами, но тоже со значительным ускорением увеличивалась добыча свинца, олова, ртути, золота.

Показательны данные о росте мировой добычи минерального сырья в период после окончания второй мировой войны:

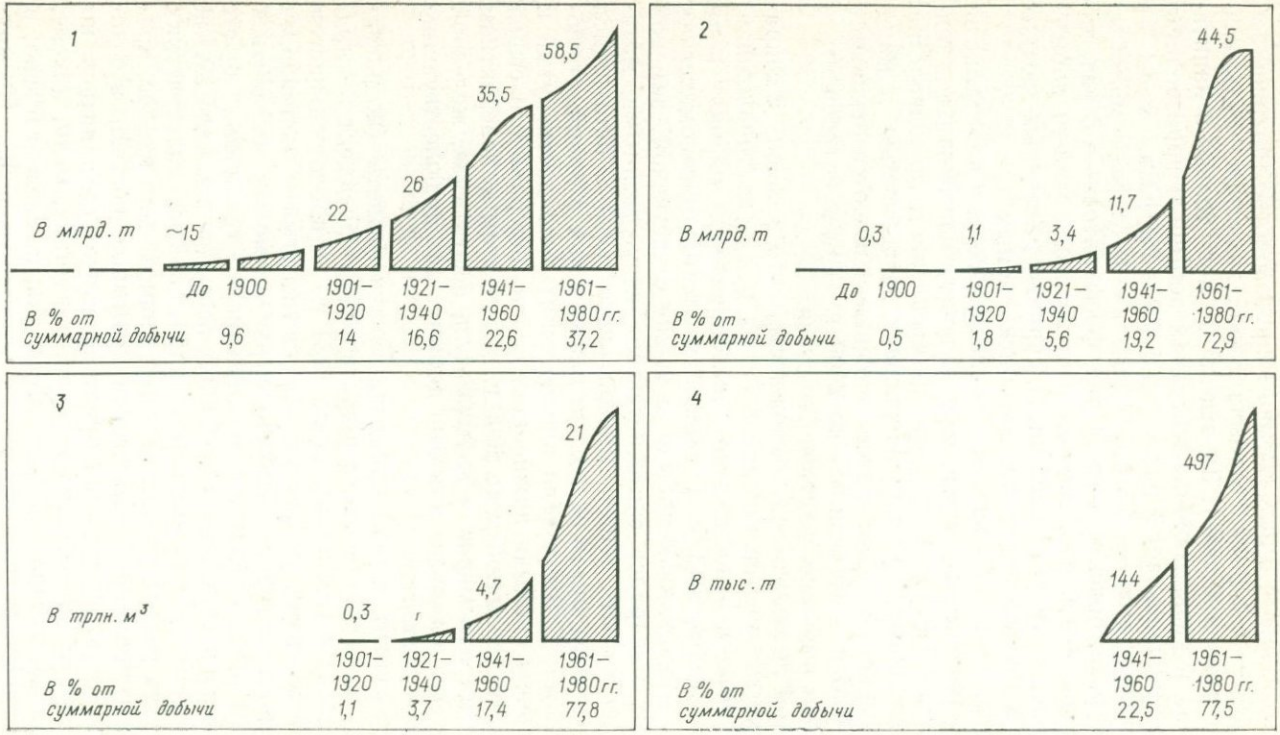
Минеральное сырье	1950 г.	1960 г.	1970 г.	1980 г.
Уголь, млрд. т	1,8	2,6	2,9	3,7
Нефть, млрд. т	0,5	1,1	2,3	3,0
Природный газ, трлн. м^3	0,2	0,5	1,1	1,6
Железная руда (товарная), млрд. т	0,3	0,5	0,8	0,9

Из этих данных видно, что за последние 30 лет мировая добыча угля увеличилась более чем в 2 раза, нефти — в 6 раз, природного газа — в 8 раз, добыча и производство товарной железной руды — в 3 раза (добыча сырой железной руды возросла примерно в 4 раза). За эти же 30 лет только в капиталистических и развивающихся странах добыча и производство свинца увеличились в 1,7 раза, цинка — в 2,4 раза, меди — в 2,8 раза, вольфрама — в 3,3 раза, никеля — в 4,6 раза, молибдена — в 6,8 раза, бокситов — в 11 раз, фосфоритов — в 5 раз, калийных солей — в 6 раз. Значительно возросли уровни добычи и производства титана, кобальта, сурьмы, различных редких металлов и многих других полезных ископаемых.

Несмотря на проявившиеся в последние годы в капиталистических странах острые кризисные явления, общемировая тенденция характеризуется ростом промышленного производства, сопровождающимся увеличивающейся потребностью в минеральном сырье. В связи с этой тенденцией имеются основания полагать, что и в оставшийся до 2000 г. период потребность в минеральном сырье не будет сокращаться.

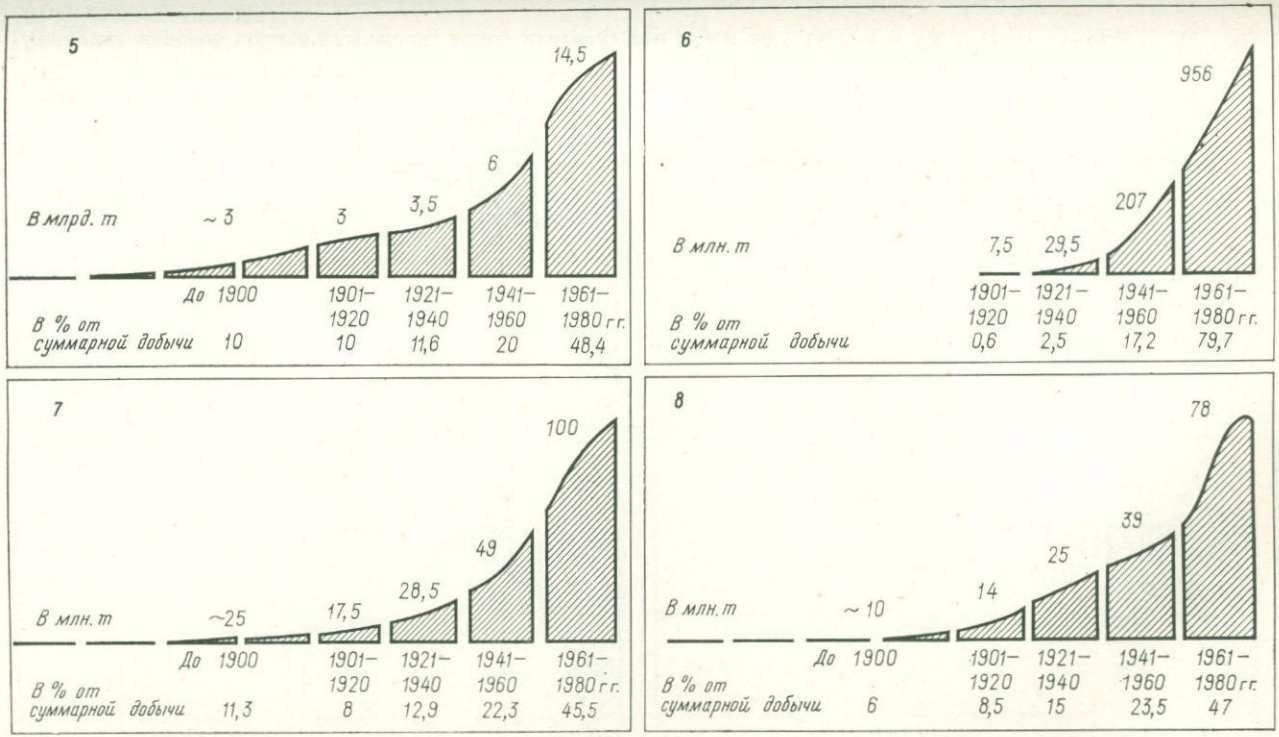
При этом не исключена возможность, что в связи с сокращением фонда месторождений богатых руд и месторождений, расположенных в относительно благоприятных районах и на доступных глубинах, с ухудшением технико-экономических условий и удорожанием добычи, а также с частичной заменой дефицитных минералов синтетическими искусственными материалами темп роста добычи минерального сырья в оставшийся до 2000 г. период будет несколько меньше, чем в предшествующие десятилетия. Даже если предположить, что достигнутый к 1980 г. уровень добычи важнейших видов минерального сырья оставался бы неизменным до 2000 г., то и в этом маловероятном случае суммарная мировая добыча угля, нефти, газа, железной руды значительно превысила бы добычу за предшествующие 20 лет (1961—1980 гг.).

Однако, учитывая рост народонаселения планеты (по расчетам ООН, население земного шара в 2000 г. превысит 6 млрд. человек против 4,4 млрд. в начале 1981 г.) и продолжающееся увеличение мирового производства, достигнутый к настоящему времени уровень мировой добычи сырья не может оставаться неизменным и, несмотря на возникающие трудности, будет увеличиваться в оставшийся до 2000 г. период и в начале XXI в. Даже с учетом роста мирового производства пластических масс и других синтетических конструкционных материалов, производимых современной химической промышленностью, в течение еще длительного периода будет не только сохраняться, но и увеличиваться потребность в стали, алюминии, меди, никеле, свинце, цинке, титане, редких металлах, и, следовательно, в соответствующем рудном сырье для их производства. Несмотря на осуществляемое во многих странах мира развитие ядерной энергетики, потребность в угле, нефти и газе, являющихся

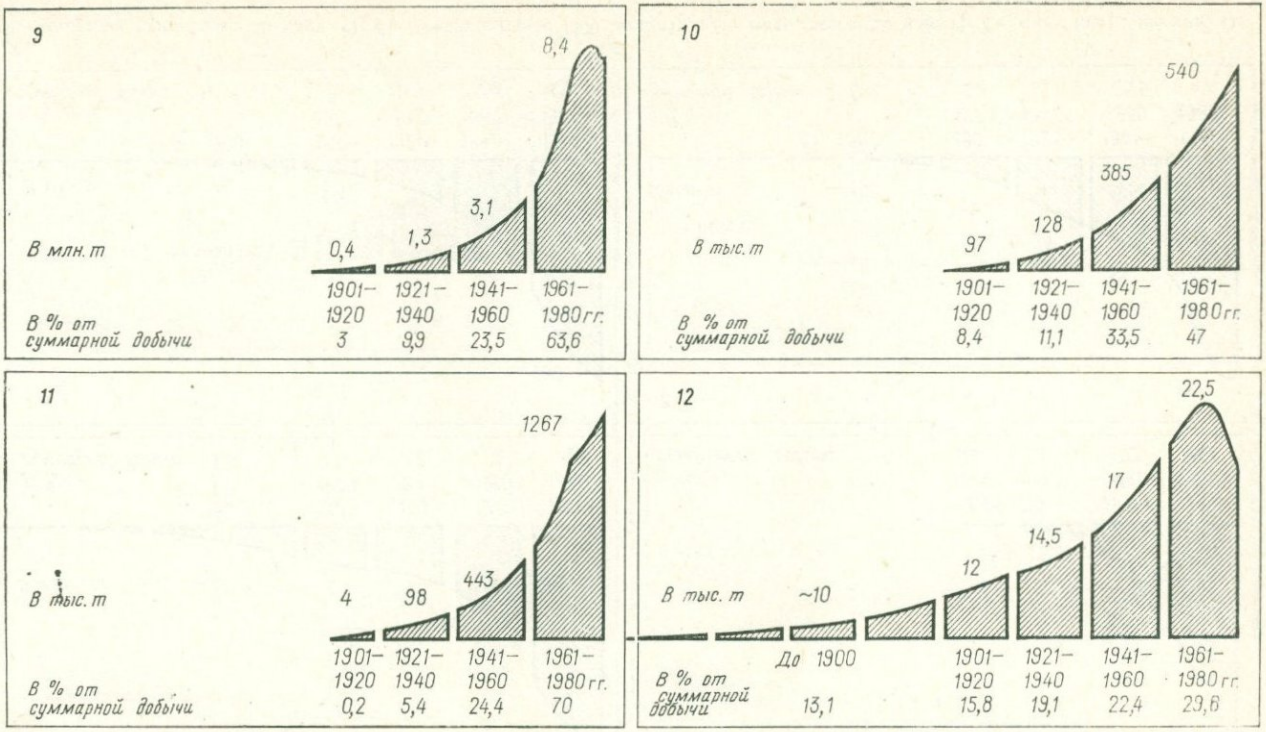


Динамика мировой добычи важнейших видов минерального сырья до 1900 г. и в XX в. (1901—1980 гг. по 20-летним периодам)

1 — уголь (всего 157 млрд. т); *2* — нефть (всего 61 млрд. т); *3* — природный газ (всего 27 трлн. м³); *4* — уран U_3O_8 (всего 641 тыс. т);

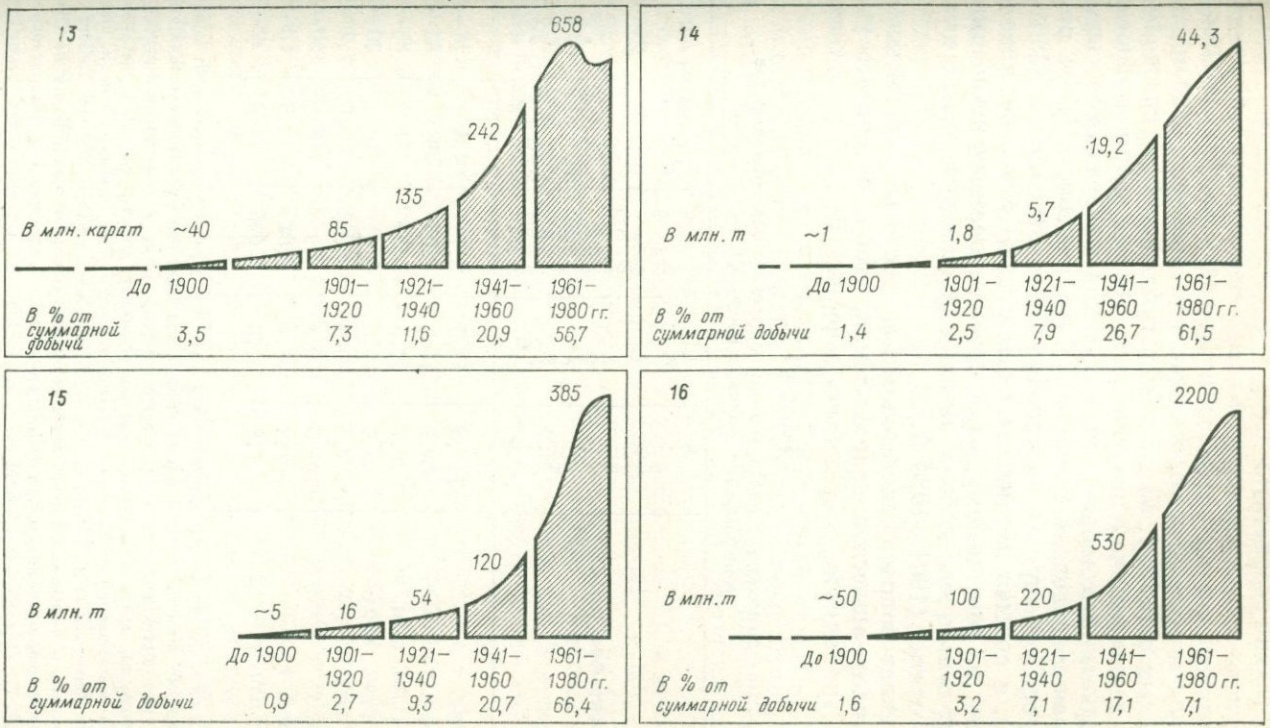


5 — железная руда (всего 30 млрд. т); *6* — бокситы (всего 1200 млн. т); *7* — медь (всего 220 млн. т); *8* — цинк (всего 166 млн. т);



Динамика мировой добычи важнейших видов минерального сырья до 1900 г. и в XX в. (1901—1980 гг. по 20-летним периодам)

9 — никель (всего 13,2 млн. т); *10* — вольфрам WO_3 (всего 1150 тыс. т); *11* — молибден (всего 1812 тыс. т); *12* — золото (всего 76 тыс. т);



13 — алмазы (1160 млн. карат); *14* — асбест (всего 72 млн. т); *15* — калийные соли K_2O (всего 580 млн. т); *16* — фосфатные руды (3100 млн. т)

не только топливом, но и важнейшим технологическим сырьем для химической промышленности, будет в ближайшие десятилетия постоянно возрастать.

На основе выполненных во многих странах мира прогнозов добыча минерального сырья за оставшийся до 2000 г. 20-летний период может быть ориентировочно оценена в размерах, приведенных в табл. 1. Указанные в табл. 1 цифры, скорее, несколько занижены, чем преувеличены. Вместе с тем из прогнозов следует, что добыча многих видов минерального сырья, ожидаемая в последнем 20-летии XX в., примерно в 1,2—2 раза превзойдет добычу за предшествующее 20-летие (1961—1980 гг.), а добыча нефти, природного газа, бокситов, никеля, молибдена и, по-видимому, ряда других полезных ископаемых превысит суммарную добычу их из недр за весь период с начала XX столетия (1901—1980 гг.).

Возникает вопрос, достаточны ли ресурсы минерального сырья, содержащиеся в недрах Земли, чтобы обеспечить указанный громадный рост добычи в период до 2000 г., а также

Таблица 1

Прогноз возможного роста добычи некоторых важнейших видов минерального сырья в конце XX в.

Минеральное сырье	Добыто с начала века (1901—1980 гг.)	В том числе за 1961—1980 гг.	Среднегодовой уровень добычи (по данным за 1979—1981 гг.)	Прогноз на 1981—2000 гг.	
				в случае сохранения до 2000 г. уровня, достигнутого в 1979—1981 гг.	в случае небольшого роста
Уголь, млрд. т	141,5	58,5	3,7	74	76—78
Нефть, млрд. т	60,7	44,5	3,05	61	62—63
Природный газ, трлн. м^3	26,7	21,0	1,55	31	33—35
Железная руда, млрд. т	26,6	14,5	0,9	18	20—23
Бокситы, млрд. т	1,2	0,96	0,075	1,5	1,8—2
Медь, млн. т	195,5	100,3	5,9	118	130—140
Никель, млн. т	13,2	8,4	0,54	10,8	13—14
Молибден, млн. т	1,8	1,3	0,095	1,9	2—2,2

Примечание. По углю, нефти, природному газу и железной руде приведены данные о мировой добыче, по всем остальным полезным ископаемым—без социалистических стран; данные по углю учитывают добычу каменного и бурого угля, в основном в пересчете на товарный уголь; по нефти приводимые данные включают добычу газового конденсата; в данных по железной руде и бокситам указана товарная руда; данные по меди, никелю и молибдену приведены по их содержанию в рудах и в концентратах; подсчет добычи проведен по данным, публикуемым в Бюллетенях иностранной коммерческой информации (БИКИ МВТ, см., например, кн.: Конъюнктура капиталистического хозяйства и основных товарных рынков в 1981 г.; Приложение к БИКИ МВТ. М., 1982. 371 с.) и в ежегодных статистических сборниках ЦСУ СССР («СССР в цифрах» [7], «Народное хозяйство СССР» [5]) за соответствующие годы. Прогноз на 1981—2000 гг.— оценка автора.

чтобы продолжалась их добыча в XXI в. и в последующие периоды. Этот вопрос вполне закономерен, так как в отличие от других природных ресурсов минеральные ресурсы являются в масштабах прошлой и будущей истории человечества невозобновимыми и, строго говоря, ограниченными и конечными.

Проблема ограниченности минеральных ресурсов приобрела особую остроту с середины XX в. Кроме роста промышленного производства, проблема обеспечения минеральными ресурсами дополнительно обостряется крайне неравномерным размещением их месторождений в земной коре, по континентам и странам. Известно, например, что страны Западной Европы находятся в зависимости от импорта из других районов мира таких важных видов минерального сырья, как железная и марганцевая руда, хромиты, медь, бокситы, никель, олово, вольфрам, молибден, слюда, алмазы, а также нефть и газ (кроме Англии, Норвегии и Голландии, разрабатывающих нефтяные и газовые месторождения Северного моря). Практически в полной зависимости от импорта минерального сырья находится экономика Японии. Большими и разнообразными национальными ресурсами минерального сырья обладают Соединенные Штаты Америки, но и они обеспечивают потребности своей промышленности во многих важнейших видах сырья за счет ввоза их из других стран, в том числе в марганцевой руде — на 98%, в кобальте и тантале — на 97, в бокситах и глиноземе — на 93, в хромитах — на 92, в металлах платиновой группы — на 91, в асбесте — на 84, в олове — на 81, в никеле — на 77, в цинке — на 62, в ртути — на 57, в вольфраме и сурьме — на 50%. Располагая значительными ресурсами нефти внутри страны, США в последние годы более 40% своей потребности в нефти и нефтепродуктах покрывают за счет импорта.

Для большинства развитых капиталистических стран мира проблема удовлетворения возрастающей потребности в топливном и рудном сырье становится все более острой и трудноразрешаемой. Эта острота не только обусловлена объективно существующей природной неравномерностью размещения полезных ископаемых в земной коре и сокращением относительно доступных в техническом и экономическом отношениях залежей минерального сырья, но также связана с неустойчивостью и ненадежностью импорта сырьевых ресурсов из развивающихся стран Азии, Африки и Южной Америки. В недрах этих стран сосредоточена значительная часть мировых запасов важнейшего минерального сырья: нефти — более 85% (от суммарных достоверных и вероятных запасов капиталистических и развивающихся стран), природного газа — свыше 70, бокситов — 73, олова — 85, меди — более 65, сурьмы — около 60%.

В отличие от капиталистических стран, экономика Советского Союза практически полностью развивается на собственной сырьевой базе и не зависит от конъюнктурных колебаний, происходящих на мировом рынке минерального сырья. Идеи

А. Е. Ферсмана о самостоятельном обеспечении Советской республики всеми главнейшими видами минерального сырья в наши дни полностью реализованы и претворены в жизнь.

Все отрасли горнодобывающей промышленности СССР достигли в настоящее время высоких уровней развития, при этом темп роста добычи важнейших видов минерального сырья, особенно в последние десятилетия, был еще более значительным, чем в других странах мира (табл. 2).

Конечно, в СССР, как и во всех других странах мира, разведка и промышленная эксплуатация месторождений с каждым годом все более усложняются. Тем не менее горнодобывающая промышленность СССР обеспечивает потребности экономики страны в необходимом топливном и рудном сырье. Более того, Советский Союз является ныне крупным экспортером минерального сырья и получаемых из него продуктов. Выполняя свой интернациональный долг, СССР оказывает странам — членам СЭВ значительную помощь в обеспечении развития их экономики природным газом, нефтью, коксующимся углем, железной рудой и другими видами минерального сырья. Разведанные запасы полезных ископаемых СССР обеспечивают текущие и ближайшие потребности народного хозяйства в сырье, а прогнозные запасы в недрах страны позволяют проектировать развитие горнодобывающих отраслей промышленности на значительный срок вперед.

Главнейшие рубежи развития экономики СССР на 1985 г. и на период до 1990 г. определены решениями XXVI съезда КПСС. Этими решениями предусмотрено довести в 1985 г. добычу нефти (включая газовый конденсант) до 620—645 млн. т, добычу газа — до 600—640 млрд. м³, добычу угля — до 770—

Таблица 2

Динамика добычи важнейших видов минерального сырья в XX в. в России и СССР

Минеральное сырье	1901—1920 гг.	1921—1940 гг.	1941—1960 гг.	1961—1980 гг.	Всего за 1901—1980 гг.
Уголь, млрд. т	0,4* / 2,1	1,4 / 7,3	4,7 / 24,6	12,6 / 66,0	19,1
Нефть, млрд. т	0,2 / 2,2	0,35 / 3,8	1,1 / 12,0	7,55 / 82,0	9,2
Природный газ, трлн. м³	—	0,02 / 0,5	0,21 / 4,5	4,41 / 95,0	4,64
Железная руда, млрд. т	0,1 / 1,9	0,25 / 4,8	0,98 / 18,8	3,87 / 74,5	5,2

* В числителе — количество, в знаменателе — % от суммарной добычи с начала XX в.

Примечание. Подсчет добычи проведен по данным ЦСУ СССР [5, 7], публикуемым в ежегодных статистических сборниках «СССР в цифрах» и «Народное хозяйство СССР» за соответствующие годы. Добыча нефти указана с включением газового конденсата; по углю приведены данные о добыче каменного и бурого углей; данные о добыче железной руды приведены в пересчете на товарную руду.

800 млн. т, произвести 117—120 млн. т готового проката черных металлов, увеличить производство алюминия на 15—20%, меди — на 20—25%, никеля и кобальта — не менее чем в 1,3 раза, увеличивать производство цинка, свинца, титана, магния, драгоценных металлов, а также вольфрамовых и молибденовых концентратов, ниобия и других легирующих элементов [3, с. 149—152]. Как искренне радовался бы А. Е. Ферсман этим цифрам, значительно превышающим известные ему максимальные уровни довоенного 1940 г., в том числе по добыче угля более чем в 4,5 раза, по добыче нефти в 20 раз, по добыче природного газа почти в 200 раз, по добыче железной руды примерно в 9 раз, а также по добыче и производству цветных и редких металлов, фосфатов, калийных солей, асбеста и др.

К настоящему времени во многих странах уже вовлечена в сферу промышленной деятельности значительная часть месторождений и залежей полезных ископаемых, обнаруженных в верхних, наиболее доступных горизонтах земной коры. В связи с непрерывно увеличивающейся добычей и переработкой громадных количеств минерального сырья, а также в связи с разразившимися в 70-х годах в капиталистических странах энергетическим и сырьевым кризисами тревога по поводу истощения топливно-энергетических и других минерально-сырьевых ресурсов резко усилилась. В результате крайне интенсивной эксплуатации многие богатые месторождения стали истощаться. Специалисты многих стран мира стали подсчитывать, на сколько времени хватит запасов нефти, газа, угля, урана, железной руды, цветных металлов. В ряде случаев эти подсчеты оказывались крайне неутешительными: исходя из прогнозных расчетов некоторых исследователей оказывалось, что значительная часть разведанных запасов полезных ископаемых, сосредоточенных в ныне выявленных месторождениях, будет исчерпана уже в период до 2000 г. или в самом начале XXI в. Некоторые специалисты западных стран полагают, что если развитие человеческого общества будет продолжаться с теми же тенденциями, которые наметились в последние десятилетия, то уже в XXI в. рост населения Земли в связи с истощением минеральных, продовольственных и других ресурсов замедлится или прекратится совсем. Исходной посылкой таких прогнозов является утверждение о существовании якобы неустранимого противоречия между ограниченностью земных ресурсов, с одной стороны, и непрерывно растущими темпами их потребления увеличивающимся населением — с другой.

Не отрицая действительного существования очень сложной проблемы обеспечения дальнейшего промышленного развития природными ресурсами, тем не менее вряд ли можно согласиться со столь пессимистическими взглядами на будущее человечества. Напротив, имеются достаточно весомые аргументы в пользу того, что, несмотря на всю сложность и крайнюю остроту, эта проблема все же может быть решена положительно.

Конечно, общий планетарный запас каждого вида минерального сырья с течением времени расходуется и не может быть пополнен. Однако в практическом плане возможность полного физического исчерпания какого-то полезного ископаемого представляется маловероятной или во всяком случае весьма отдаленной. В конкретных месторождениях или даже в отдельных геологических регионах истощение запаса полезного ископаемого, выявленного и разведанного до определенной глубины, конечно, вполне возможно. Известны примеры полного исчерпания разведанных запасов в отдельных месторождениях нефти, золота, серебра, ртути, корунда, малахита, даже железной руды. Вследствие интенсивной и хищнической эксплуатации самых богатых на земном шаре золоторудных месторождений ЮАР запасы их стали истощаться, а добыча золота, достигавшая в 1970 г. 1000 т, упала в 1980 г. до 670 т и имеет тенденцию к дальнейшему падению; глубина шахт на этих месторождениях достигла 3 км и более.

Тем не менее в период до 2000 г. и, вероятно, в первые десятилетия XXI в. главное ограничение роста добычи минерального сырья будет вызвано не физическим истощением запасов в отдельных месторождениях и регионах. Самым важным и решающим фактором, ограничивающим рост добычи сырья, становится экономический фактор, обусловленный непрерывно увеличивающимся усложнением и удорожанием разведки, добычи, обогащения и переработки минерального сырья. Только технический прогресс в добывающей промышленности может и должен стать главнейшим средством ослабления действия этого фактора. Возможность удовлетворить потребность в минеральном сырье зависит от способов добычи, переработки и использования сырья, определяемых уровнем развития науки и техники, а также в значительной мере характером общественных отношений. Постоянное совершенствование технологических процессов радикально повышает эффективность использования полезных ископаемых, в том числе и тех, которые считались в прошлом бедными для промышленного использования.

Полезное ископаемое — понятие историческое, зависящее от уровня развития общества, от уровня экономики и техники. Чем выше техническая вооруженность человечества, тем шире ассортимент полезных ископаемых, тем больше новых видов минерального сырья вовлекается в промышленное производство. Руды или другие минеральные вещества, которые в недавнем прошлом еще не считались полезным ископаемым вследствие отсутствия технических способов их разработки или ее экономической невыгодности, в настоящее время и в будущем с появлением новой техники и технологии становятся важным промышленным сырьем. Элементы и вещества природы становятся полезным природным ресурсом только после того, когда в них появляется потребность и находится способ их практического использования. Нефть стала полезным ресурсом только в

первой половине XIX в., бокситы стали важнейшим видом сырья для производства алюминия только в начале XX столетия. С начала использования урана в качестве источника энергии прошло лишь немногим более 35 лет. В энергетическом балансе возрастает использование подземных горячих вод, а в недалеком будущем — также подземного тепла, энергии вулканов, океанических приливов, внутренней тепловой энергии океана.

Научный и технический прогресс непрерывно открывает новые направления и новые способы удовлетворения потребностей общества в природных ресурсах. Эта тенденция в развитии человечества становится главнейшим и самым надежным «резервом роста».

Несмотря на громадное количество минерального сырья, которое было уже извлечено из земных недр в прошлом и которое предстоит добыть в ближайшем будущем, а также на истощение запасов в отдельных месторождениях или их сокращение в отдельных странах, разведанные и предполагаемые запасы преобладающего числа полезных ископаемых в целом в мире продолжают увеличиваться. Необходимо иметь в виду, что разведкой и добычей затронуты пока преимущественно близповерхностные горизонты земной коры, только самые верхние структурные этажи литосферы. Однако с развитием технических средств относительно более глубокие слои станут крупным резервом для открытия новых месторождений. Наибольшие глубины, с которых в настоящее время добываются твердые полезные ископаемые, обычно не превышают 500—600, реже 1000—1500 м. Только отдельные шахты и единичные рудники достигли 2—3 км и более. Что касается нефти, то в большинстве нефтеносных районов она добывается с глубины 2—4 км, в некоторых районах с глубины 4,5—5 км и только на отдельных промыслах — с глубины более 5 и 6 км. Между тем известны зоны прогибов земной коры, в которых мощные толщи осадочных отложений, могущие служить коллекторами для накопления углеводородов, погружены на глубины 7—10 км и более.

Увеличение глубин разведки и добычи полезных ископаемых, которое становится возможным в связи с созданием современной техникой новых прогрессивных методов и средств проникновения в земные пласты, в том числе с развитием геотехнологических методов добычи, хотя и связано с дополнительными затратами, но является одним из перспективных направлений и крупным резервом для увеличения ресурсов минерального сырья уже в самом ближайшем будущем.

Дальнейшее увеличение запасов полезных ископаемых может быть обеспечено также путем вовлечения в промышленное использование месторождений с относительно бедными рудами или с рудами, требующими более сложных технологических методов обогащения и переработки. Технический прогресс в обогащении и переработке минерального сырья, более совершенные

и экономичные способы разработки месторождений позволяют значительно расширить использование промышленностью относительно бедных руд и руд сложного состава. Например, по мнению американских специалистов, дальнейший прирост запасов меди в США будет осуществлен преимущественно за счет разведки бедных руд, в связи с чем в ближайшие годы среднее содержание меди в разведанных запасах снизится с 0,8—0,9 до 0,5—0,6%, но при этом запасы увеличатся в 1,5—2 раза. В Канаде в связи с вовлечением в переработку более бедных руд среднее содержание меди снизилось с 1,4% в 1965 г. до 0,8% в конце 70-х годов. Несмотря на снижение содержания меди в перерабатываемых рудах, применение более эффективных технологических методов позволяет достичь извлечения металла до 85—90%. Аналогичные тенденции в расширении использования относительно бедных руд (не только меди, но и других металлов) проявились и в других странах.

В связи с проблемой более широкого использования относительно бедных руд на основе применения прогрессивных технологических методов обогащения и переработки нельзя не вспомнить соображения по этому поводу А. Е. Ферсмана, высказанные 50 лет назад. Еще в начале 30-х годов он обращал внимание на необходимость «втягивания в использование низкосортного сырья» и в связи с этим указывал, что «именно здесь место геохимика, который знает свойства природных соединений и который должен вместе с технологом создавать новые ценности» [15, с. 20]. Настойчиво подчеркивая актуальность рационального использования низкосортного сырья, А. Е. Ферсман говорил о неотложной необходимости форсирования новых технологических приемов и использования новых видов сырья, о принципиальной важности «смелых технологических подходов, опрокидывающих старые предельные нормы добычи полезных ископаемых и открывающих совершенно новые перспективы» [16, с. 11]. В наше время к числу таких смелых и перспективных в ближайшем будущем способов использования крупных ресурсов рудного сырья, отличающегося пониженным содержанием полезных компонентов или залегающего на значительных глубинах, могут быть отнесены, например, методы подземного выщелачивания, успешно применяемые при разработке урановых и меднорудных месторождений в США и в других странах, методы подземной выплавки серы, подземной газификации углей и др.

Крупным резервом увеличения ресурсов минерального сырья является комплексное использование месторождений полезных ископаемых, преобладающая часть которых по естественной геохимической природе представляет комплекс нескольких минералов и сложных соединений химических элементов. Известно, например, что во многих железных рудах присутствуют ванадий, кобальт, медь, цинк, сера, фосфор. Из комплексных руд цветных металлов наряду с основными металлами (медь, свинец, цинк,

никель, олово, вольфрам, молибден и др.) при применении соответствующих технологических приемов могут быть попутно извлечены многие другие очень ценные элементы, в том числе золото, серебро, платиноиды, кобальт, редкоземельные и рассеянные элементы. В месторождениях нефти и природного газа содержатся и могут быть использованы промышленностью сера, гелий, бром, иод, а многие месторождения углей являются источником германия. Во многих случаях экономическая и техническая ценность попутных компонентов превышает ценность основного полезного ископаемого. Комплексное освоение месторождений представляет собой одновременно и надежную основу для осуществления природоохранных мероприятий.

Впервые проблема комплексного использования минерального сырья в нашей стране была выдвинута А. Е. Ферсманом в начале 30-х годов, но все положения этой проблемы звучат с необычайной актуальностью и сегодня.

В докладе, подготовленном в 1932 г. для конференции Госплана СССР, посвященной размещению производительных сил страны во второй пятилетке, А. Е. Ферсман указывал на необходимость полного и комплексного использования «всей горной массы, добываемой из земли» [15, с. 14], что диктуется «самими законами геохимии», на целесообразность строительства комбинированных производств «на основе закономерных природных ассоциаций химических элементов», на важность «комбинирования технологических процессов». С настойчивостью и убежденностью он писал: «Я вижу необходимость решительно настаивать на коренном пересмотре использования сырья, на необходимости по-новому заострить научно-техническую мысль и сказать: там поставлено правильно производство, где не пропадает ни грамма добытой горной массы, нет ни грамма отбросов, где ничто не улетает на воздух и не смывается водами» [15, с. 21].

В этом докладе А. Е. Ферсман привел примеры высокоэффективного комплексного использования минерального сырья, в том числе апатит-нефелиновых руд Хибинских месторождений, многокомпонентных сульфидных руд, комплексных руд золоторудных месторождений и др. Высказывая свои идеи о необходимости комплексного использования угля, А. Е. Ферсман уже в те далекие годы утверждал, что «уголь в целом ряде своих сортов, так же как и нефть, является значительно более ценным как сырье химическое, чем как топливо» [15, с. 18].

Утверждая положение о том, что комбинированное использование полезных ископаемых — «это технико-экономическая задача огромного значения, это хозяйственно-организующий принцип отдельных территорий Союза», Александр Евгеньевич вместе с тем с горечью говорил: «Мы еще далеко не овладели методом решений этой задачи, хотя много говорим и принципиально ей сочувствуем. Но мы не умеем и не проводим в жизнь, особенно тогда, когда сталкиваются интересы различных ве-

домств, различных хозяйственных организаций. Здесь нередко живое дело уступает ведомственной неувязке» [15, с. 19].

Между тем А. Е. Ферсман утверждал, что «комплексная идея есть идея в корне экономическая, создающая максимальные ценности с наименьшей затратой средств и энергии, но эта идея не только сегодняшнего дня, это идея охраны наших природных богатств от их хищнического расточения, идея использования сырья до конца, идея возможного сохранения наших природных запасов на будущее. Эта идея дает максимально эффективное использование производительных сил, открывая пути для приложения самых высоких технических методов» [15, с. 13]. Несколько позднее, в 1940 г., А. Е. Ферсман вновь подчеркивал: «Первый и основной вопрос — это переход к комплексному использованию сырья, к полному превращению в практические ценности всей горной массы, извлекаемой с таким трудом из недр земли. Утилизация всех отходов, использование мельчайших примесей, комбинирование технологическое, горнотехническое и химическое — таковы те принципы, которые лежат в основе советского хозяйства... Здесь не надо ни общих слов, ни новых установок, нужна конкретная работа над каждым вопросом, над каждой деталью технологического процесса» [16, с. 11].

За десятилетия, прошедшие с тех дней, когда А. Е. Ферсманом были высказаны эти замечательные слова, в горнодобывающих отраслях промышленности нашей страны проделана большая работа, направленная на комплексное использование минерального сырья. Одновременно осуществляются идеи А. Е. Ферсмана о принципах «территориального использования всего природного сырьевого комплекса» [15] вплоть до создания территориально-производственных комплексов. Тем не менее горькие слова Александра Евгеньевича о том, что мы «принципиально сочувствуем» идее комплексного использования минерального сырья, но практически делаем недостаточно, в том числе из-за столкновения интересов различных ведомств, остаются в силе, к сожалению, и сейчас.

Громадным, еще пока едва затронутым резервом роста минеральных богатств являются недра морских шельфов, склонов и дна Мирового океана. Наряду с биологическими ресурсами, минеральные ресурсы Мирового океана становятся наиболее крупным и надежным источником сырья для развития промышленности в настоящем и еще в большей мере в ближайшем будущем.

Уже в 70-х годах значительная часть мировой добычи нефти (свыше 20%) осуществлялась на морских промыслах. Нефть добывается из подводных месторождений Персидского и Мексиканского заливов, Северного и Каспийского морей. Месторождения нефти и газа обнаружены на шельфах других морей и океанов. По оценке американского геолога Л. Дж. Уикса, под дном океанических и морских акваторий может быть заключено около 155 млрд. т извлекаемой нефти. По расчетам специали-

стов Французского института нефти, мировые извлекаемые ресурсы шельфа до изобаты 200 м составляют 88 млрд. т. Указанные оценки, вполне сопоставимые с размерами разведанных запасов нефти в недрах суши, позволяют считать, что даже ресурсы нефти, являющиеся в настоящее время предметом особой тревоги во всех странах мира, при дальнейшем совершенствовании технологии морской добычи нефти остаются достаточными.

Крупными источниками рудных полезных ископаемых являются морские прибрежные месторождения; в ближайшем будущем с развитием техники добычи их значение возрастет во много раз. Уже в настоящее время прибрежно-морские россыпи в странах Индийского океана служат одним из наиболее крупных поставщиков олова. Ведется (пока в относительно небольших масштабах) разработка морских россыпных месторождений титановых и циркониевых минералов, золота, алмазов.

Особенно большие перспективы увеличения ресурсов рудного сырья в недалеком будущем связываются с железо-марганцевыми конкрециями, которые покрывают громадные площади дна Мирового океана. Суммарное весовое количество указанных конкреций, по некоторым оценкам, достигает 1—2 трлн. т (*Н. В. Логвиненко.* Морская геология. Л.: Недра, 1980. 342 с.). Даже если принять, что только несколько процентов от этого количества может иметь практическое промышленное значение, то и в этом случае ресурсы этих конкреций измеряются миллиардами тонн. Наряду с железом и марганцем конкреции содержат медь, никель, кобальт, иногда цинк, свинец, молибден и другие ценные элементы. При разработке соответствующих технических средств для добычи конкреций со дна океана и необходимых технологических способов их комплексной переработки океанические конкреции могут стать крупным и устойчивым источником рудного сырья.

Наконец, сама морская вода является уже сейчас и в гораздо большей степени станет в будущем также значительным источником многих важных для человека элементов и минеральных соединений. Уже в настоящее время около $^1/_3$ мирового потребления поваренной соли, $^1/_5$ потребления магния и значительная доля потребления брома покрываются использованием в качестве сырья морской воды. В морской воде содержатся также рубидий, литий, индий и другие ценные микроэлементы, которые при разработке эффективных методов извлечения смогут в будущем иметь промышленное значение. Все большее внимание привлекают минеральные рассолы и минерализованные воды лагун, озер, некоторых морей, рифтовых зон, которые являются не только поставщиками брома, иода, поваренной соли, мирабилита, но могут стать также источником таких ценных элементов, как литий, рубидий, цезий, бор, стронций и др., вплоть до золота и урана.

Крупным резервом ближайшего будущего является синтез

минералов — новая отрасль науки и производства, использующая достижения современной физики и химии и имеющая целью компенсировать нехватку отдельных видов природного минерального сырья. Известно, что в СССР, США и в некоторых других странах уже в промышленных масштабах производятся искусственные синтетические алмазы, используемые в качестве высокоэффективного абразивного материала. Широко применяются различные модификации искусственно выращенных кристаллов кварца. Так, синтетический пьезокварц по многим техническим свойствам и параметрам оказывается вполне конкурентноспособным с природными кристаллами кварца, причем производство синтетического пьезокварца обходится во много раз дешевле, чем поиски, разведка, добыча и обработка естественного пьезокварца. Во многих странах ведутся исследования и эксперименты по получению синтетической слюды, кристаллов оптического кварца, производятся искусственные рубины и другие искусственные минералы.

Оценивая современные достижения в области синтеза кристаллического минерального сырья, нельзя не вспомнить блестящие соображения А. Е. Ферсмана, высказанные им более полувека тому назад. Хорошо известно, что Александр Евгеньевич умел ценить «вечную красоту камня», его «гармонию цвета и формы», но он также утверждал, что «будущее камней — в их замечательных технических свойствах» [14, с. 15]. В 1936 г. он уже мечтал, что горный хрусталь скоро будут изготавливать химики. «Изучение свойств камня во всей сложности и разнообразии,— писал А. Е. Ферсман,— сама природа камня, его внутренняя структура, различные свойства, используемые промышленностью, наконец, его синтез — такова одна из важнейших проблем современной минералогии» [13, с. 55]. И далее: «В области синтеза камня важнейшей задачей будущего является получение твердого камня: кварц, циркон, алмаз и корунд — вот самые устойчивые и одни из самых прочных и твердых кристаллических построек, и искусственное получение этих минералов явится крупной победой нашей науки» [там же, с. 57—58]. Александр Евгеньевич предсказывал, что через несколько десятков лет не потребуется с опасностью для жизни взбираться на вершины гор в поисках кристаллов, что можно будет заказывать кристаллы горного хрусталя на государственном кварцевом заводе. Что ж, предсказания А. Е. Ферсмана сбылись почти полностью.

Однако успехи в области получения искусственных синтетических материалов ныне не ограничиваются только производством технических кристаллов кварца, алмаза, рубина, слюды, других минералов. Крупнейшие достижения современной химической промышленности, широко использующей методы органического синтеза, обеспечили возможность производства разнообразных пластических масс и других синтетических конструкционных материалов, относительно недорогих в производстве и

по техническим свойствам способных частично заменить сталь, алюминий, медь и другие дефицитные металлы. Уже найдены способы получения таких пластических масс, изделия из которых равноценны по прочности стали или не уступают по химической стойкости платине. Создано и широко применяется органическое стекло. Во многих странах ведутся крупные исследования по получению искусственного жидкого топлива из угля, горючих сланцев и битуминозных пород; в ряде случаев не только получены вполне обнадеживающие результаты исследований, но и начато производство искусственного жидкого топлива.

Конечно, нельзя рассчитывать, что синтетические минералы и материалы смогут полностью или в сколько-нибудь крупных масштабах заменить природное минеральное сырье. С развитием промышленности и новейшей техники выявляются все новые и новые области применения производных минерального сырья. Современное машино- и приборостроение, электротехническая и радиопромышленность, радиоэлектроника и телемеханика, самолето- и судостроение, кибернетика и ракетно-космическая техника наряду с использованием синтетических конструкционных материалов не могут обходиться без легированных и других высококачественных черных, цветных и редких металлов. Применение в современной технике сверхвысоких и ультранизких температур, высоких давлений, а также сверхвысоких скоростей необычайно обострило проблему создания жаропрочных, антикоррозийных и других разнообразных устойчивых сплавов и соединений металлов. Следует также помнить, что само производство преобладающей части синтетических материалов, в том числе пластических масс и других продуктов синтеза, основывается на использовании природного газа, нефти, угля, горючих сланцев и других видов природного сырья минерального происхождения.

Тем не менее синтез указанных выше минералов и материалов должен рассматриваться как один из важнейших дополнительных путей удовлетворения потребностей развивающегося производства в дефицитных конструкционных и других технических материалах.

В решении проблемы обеспечения развивающейся экономики минеральным сырьем важнейшая роль принадлежит геологической науке и геологоразведочным работам. В связи с интенсивным развитием экономики СССР перед советской геологией возникают новые и весьма сложные задачи. Достижение высоких рубежей в развитии горнодобывающих отраслей промышленности требует не только вовлечения в разработку уже известных и разведанных месторождений, но также выявления и ускоренной подготовки новых крупных источников минерального сырья. Как ни значительны разведанные запасы полезных ископаемых в целом по СССР, они все же по некоторым видам сырья и по отдельным районам страны еще недостаточны в сравнении с пред-

полагаемым ростом добычи и производства в период до 2000 г. и в первые десятилетия XXI в.

Многолетний опыт развития экономики нашей страны свидетельствует о том, что геологоразведочные работы должны осуществляться со значительным опережением развития горнодобывающих отраслей, чтобы заблаговременно обеспечить их надежно разведанными запасами и предоставить промышленности возможность выбора сырьевых источников, характеризующихся наиболее благоприятными технико-экономическими параметрами.

Наряду с этим в связи с уже упоминавшимся неизбежным усложнением геологических поисков и разведки все более острой и актуальной становится проблема повышения эффективности геологоразведочных работ. Эта проблема имеет несколько аспектов. Прежде всего речь должна идти о поисках, разведке и подготовке таких месторождений минерального сырья, которые отличались бы относительно высокими качественными показателями и промышленное использование которых в народном хозяйстве было бы наиболее эффективным. Применительно к конкретным условиям Советского Союза проблема состоит не только в дальнейшем количественном увеличении разведанных запасов. Важнейшей и особенно актуальной задачей являются поиски и разведка высокоэкономичных месторождений минерального сырья и рост запасов, в первую очередь за счет именно таких месторождений. К наиболее экономичным источникам минерального сырья могут быть отнесены: а) месторождения, находящиеся в районах действующих горнодобывающих предприятий и обеспечивающие максимальное использование уже созданных производственных мощностей; б) месторождения в новых районах, относительно доступных и экономически благоприятных для строительства новых предприятий, или радикально улучшающие территориальное размещение соответствующей отрасли промышленности; в) месторождения с большими запасами полезного ископаемого, в том числе с относительно невысоким содержанием полезных компонентов, но обеспечивающие возможность создания на их базе крупных и высокомеханизированных горных предприятий; г) месторождения сравнительно легкообогатимых руд; д) месторождения с относительно благоприятными гидрогеологическими и горнотехническими условиями залегания, особенно пригодные для разработки открытым способом.

Другой аспект проблемы эффективности геологоразведочных работ касается самого процесса поисков и разведки, их квалифицированного геологического обоснования, методики и качества проведения, достоверности получаемых данных, сроков разведки месторождений, технического уровня разведочных работ, их производительности, стоимости, удельных затрат. Формула «решать задачу любой ценой» в настоящее время совершенно неприемлема. Должно действовать известное суворовское пра-

вило «побеждать не числом, а умением», что в применении к геологоразведочным работам означает решать каждую задачу не только и не столько большими объемами работ, сколько путем всестороннего и глубокого анализа всех геологических данных, тщательного учета поисковых критериев, продуманного выбора наиболее оптимальных методов поиска или разведки применительно к конкретным геологическим условиям, детального изучения минерального состава и технологических свойств полезных ископаемых, как главных, так и сопутствующих.

В последние годы во всех странах мира резко усилилась тенденция значительного удорожания геологоразведочных работ и увеличения удельных затрат на единицу разведуемых запасов полезных ископаемых. Конечно, условия проведения поисково-разведочных работ с каждым годом все более усложняются, на росте затрат сказывается увеличение глубин бурения, перемещение геологоразведочных работ в удаленные труднодоступные районы. Это — удорожающие факторы, с которыми нельзя не считаться. Но вместе с тем должны изыскиваться пути и средства, которые способны уменьшить и в значительной мере нейтрализовать влияние удорожающих условий. К ним относятся в первую очередь квалифицированная помощь геологической науки в выборе и обосновании наиболее перспективных направлений поисковых и разведочных работ, рациональное сочетание собственно геологических, геофизических, геохимических, аэровысотных, космических и других прогрессивных методов, применение новейшей аналитической аппаратуры, высокопроизводительных технических средств для бурения и горнопроходческих работ, рациональная и разумная концентрация этих средств на важнейших и наиболее перспективных объектах.

Полезные ископаемые — это не только геологические понятия, это сырьевые ресурсы промышленности, требующие одновременно и геологического анализа, и экономической оценки. Вопросы повышения геологической и экономической эффективности поисковых и разведочных работ должны находиться в центре внимания не только производственных геологических организаций. Они настолько сложны и многообразны, что успешное их решение возможно лишь при самом активном участии всех научно-исследовательских учреждений. Трудно найти другие отрасли науки и производства, в которых слияние теории и практики было бы так органично и необходимо, как в геологии. Геологическая наука не может развиваться, не опираясь на фактический материал, который доставляет ей геологоразведочная практика. В свою очередь, поиски и разведка не могут быть эффективными, если они не учитывают геолого-геохимических закономерностей формирования и размещения повышенных концентраций полезных ископаемых в недрах.

Вновь невозможно не вспомнить блестящие работы А. Е. Ферсмана и его изумительное умение сочетать самое высокое научное творчество с решением прикладных, чисто прак-

тических задач. Трудно переоценить громадное направляющее влияние его идей и теоретических концепций на успехи геологоразведочных работ и увеличение отечественных ресурсов минерального сырья. Достаточно вспомнить его замечательные региональные исследования, послужившие основой для выделения рудных поясов и провинций на территории нашей страны, в том числе Монголо-Охотского металлогенического пояса, рудных зон Урала, Кавказа, Забайкалья, Средней Азии. Широко известные работы А. Е. Ферсмана «Перспективы распространения полезных ископаемых на территории Союза» [8] и «Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых» [11] не потеряли своего научного и практического значения до наших дней. В крупнейших теоретических монографиях А. Е. Ферсмана — «Геохимия» [10] и «Пегматиты» [12] — содержатся ценнейшие для геолога-практика данные об условиях концентрации в земных недрах различных элементов и минералов, их ассоциациях и парагенезисе, генетических связях с определенными геологическими формациями, закономерностях пространственного размещения. Особое значение работы А. Е. Ферсмана имели для широкого развития геохимических методов поисков месторождений в различных геологических условиях. Нельзя не вспомнить и о том, что А. Е. Ферсман был инициатором и одним из первых в СССР организаторов применения аэрометодов в геологических исследованиях; в течение ряда лет (1938—1940 гг.) он был председателем Междуведомственной комиссии по применению аэросъемки в геологии. Автору этой статьи посчастливилось в те годы быть членом президиума этой комиссии и работать под непосредственным руководством Александра Евгеньевича. Незабываемы кипучая энергия и энтузиазм, с каким А. Е. Ферсман организовывал первые геологические работы с использованием самолета, как убежденно верил он в большие возможности и в великое будущее аэрогеологических методов.

Современные проблемы минеральных ресурсов очень многогранны и отличаются большой сложностью. Хотя речь идет о современных проблемах, тем не менее по-прежнему сохраняют свою актуальность замечательные слова Александра Евгеньевича Ферсмана, сказанные им свыше 40 лет назад: «Силы природы превращаются человеческим трудом, его технической мыслью и творчеством в производительные силы. Нет ничего более заманчивого в научной работе, как именно такой творческий подход к изучению окружающей природы. Не фотографировать и сухо описывать, не просто систематизировать и классифицировать, а изучать для того, чтобы овладеть и переделывать, для того, чтобы подчинять своей воле, чтобы смелой, новой, передовой творческой мыслью и делом превращать все элементы и силы природы в величайшие достижения культуры и промышленности» [16, с. 13].

ЛИТЕРАТУРА

1. *Быховер Н. А.* Экономика минерального сырья. М.: Недра, 1971. 192 с.
2. *Козловский Е. А.* Основные направления дальнейшего укрепления минерально-сырьевой базы страны в свете решений XXVI съезда КПСС.— Сов. геология, 1981, № 6, с. 3—10.
3. Материалы XXVI съезда КПСС. М.: Политиздат, 1981. 223 с.
4. *Мирлин Г. А.* Минеральные ресурсы в развитии экономики СССР.— План. хоз-во, 1976, № 9, с. 43—49.
5. Народное хозяйство СССР, 1922—1982. М.: Статистика, 1982. 643 с.
6. *Сидоренко А. В., Арбатов А. А., Мирлин Г. А.* Минеральные ресурсы: проблема обеспеченности.— Природ. ресурсы и окружающая среда, 1979, № 7, с. 12—26.
7. СССР в цифрах в 1980 году. Краткий статистический сборник. М.: Финансы и статистика, 1981. 220 с.
8. *Ферсман А. Е.* Перспективы распространения полезных ископаемых на территории Союза. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. 78 с.
9. *Ферсман А. Е.* Основные вопросы организации научной работы.— Вестн. АН СССР, 1936, № 10, с. 27—42.
10. *Ферсман А. Е.* Геохимия. Л.: ГХТИ, 1937. Т. 3. 503 с.
11. *Ферсман А. Е.* Геохимические и минералогические методы поисков полезных ископаемых. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. 446 с.
12. *Ферсман А. Е.* Пегматиты. 3-е изд. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. 712 с.
13. *Ферсман А. Е.* Из истории культуры камня в России. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1946. 75 с.
14. *Ферсман А. Е.* Очерки по истории камня. М.: Изд-во АН СССР, 1954. Т. 1. 371 с.
15. *Ферсман А. Е.* Комплексное использование ископаемого сырья.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М.: Наука, 1975, с. 14—22.
16. *Ферсман А. Е.* Ленин и изучение производительных сил СССР.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М.: Наука, 1975, с. 3—13.

УДК 553.6

В. П. ПЕТРОВ

ОБ ИСТОРИИ И СОСТОЯНИИ ИЗУЧЕНИЯ НЕМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СЫРЬЯ

Создателем современного учения о неметаллических полезных ископаемых является А. Е. Ферсман. Его яркие публицистические статьи привлекли внимание широких кругов специалистов к этой группе минерального сырья [18]. Уже в 1924—1926 гг. под руководством Александра Евгеньевича были созданы четыре тома справочника «Нерудные ископаемые» [12], которые сохраняют свое значение до сих пор. По точности и полноте подбора материала этот спарвочник не имеет аналогов в мировой литературе.

В конце 30-х годов начала выходить еще одна из задуманных А. Е. Ферсманом сводок по неметаллическому сырью [11]. Предполагалось создать 10 томов энциклопедического справочника по геологии, технологии и использованию неметаллического сырья. К сожалению, Великая Отечественная война и после-

довавшая вскоре после нее кончина А. Е. Ферсмана помешали завершить это издание. Вышли из печати только тома 1, 2, 4 и 5. Полезные ископаемые в этом справочнике, как и в справочнике 1926 г., расположены по алфавиту. Том 4 представляет собой монографию по глинам, в которой охарактеризованы все материалы на 1941 г. по минералогии, генезису, методам исследования и использованию глин, а также описаны их месторождения. Уже после смерти А. Е. Ферсмана его супругой Е. М. Ферсман, учениками и друзьями по сохранившимся рукописям была подготовлена двухтомная сводка [19] по истории использования камня и его роли в развитии культуры в прошлом и настоящем. Эти книги, так же как и упомянутые ранее, содержат основы наших знаний о нерудном сырье.

Все развитие исследовательских работ в области неметаллического сырья в послевоенные годы шло под огромным влиянием идей А. Е. Ферсмана и в целом проходило по тем путям, которые были им намечены.

В своей деятельности по развитию учения о неметаллических полезных ископаемых А. Е. Ферсман опирался на прочную основу, которая была создана работами ученых нашей страны в более ранний период.

Из истории использования и изучения неметаллического сырья в СССР

Использование камня и глины наряду с деревом всегда было характерно для народов, населяющих территорию Советского Союза. Керамический кувшин во всех случаях занимал в их хозяйстве почетное место вместе с деревянными ковшами и плошками. Старинная металлургия неизбежно заставляла человека знакомиться с камнями для укладки горна и глиной для его обмазки.

Промышленное строительство в России, начавшееся после эпохи Петра Первого и особенно интенсивно шедшее в XIX в., первоначально основывалось на собственном сырье. Но и в это время на рынок России начало проникать иностранное «облагороженное» сырье, которое постепенно, к началу XX в., почти полностью «захватило» всю промышленность. Проиллюстрируем это только некоторыми малоизвестными примерами.

В середине XVIII в. были начаты работы М. В. Ломоносова по производству цветного стекла [4] и замечательные исследования Д. И. Виноградова по созданию русского фарфора [5]; Императорский СПб фарфоровый завод (сейчас завод им. М. В. Ломоносова) работал целиком на отечественном сырье. Огромную роль в этом производстве играла гжельско-кудиновская глина; каолин получался из «Чебаркуля» на Урале; вместо полевого шпата использовался местный гипс.

В конце XIX в. и в начале XX в. в России существовали уже более 10 фарфоровых заводов, но все они использовали

привозное сырье — английский каолин, норвежский полевой шпат и немецкую пластичную глину.

В конце XVIII и в самом начале XIX в. опубликованы замечательные работы академика В. Севергина, дающие представление о состоянии техники того времени для использования минералов, руд и пород. Многие сведения, приводимые В. Севергиным, в последующий период оказались забытыми. В качестве примера можно указать на главу об использовании кремней (очень ценного стратегического сырья) [15, с. 88 и сл.], в которой есть следующие строки: «Для ружейных кремней «обделка» состоит: 1) в разбивании желваков посредством большого молота... 2) в раскалывании... посредством маленького молотка о двух остреях... на длинные и тонкие пластинки. В ружейном кремне примечается пять частей: 1) лезвие, 2) бока, 3) пята — край, противоположный лезвию, 4) верхняя плоскость горизонтальная между пятой и ребром, где начинается лезвие; 5) испод — гладкий и несколько выпуклый. В Московской губернии и на Днепре некоторые крестьяне умеют щепать кременные камни на ружейные кремни и производят сию работу нарочито в большом виде. Несмотря на то ввозится в Россию (в 1798 году) более одного миллиона кремней».

Вторая половина XIX в. характеризуется двумя противоположными тенденциями в изучении и использовании неметаллических ископаемых. Во-первых, шло углубление знаний о сырьевых ресурсах, их свойствах и требованиях промышленности к сырью; во-вторых, происходило постепенное свертывание производства многих предметов из отечественного сырья; оно заменялось импортным сырьем и сырьевыми полуфабрикатами или готовыми импортными частями изделий. В этот период появились замечательные сводки Ю. Азанчеева (1894 г.) по описанию каменоломен России [1]. В 1888 г., т. е. через 100 лет после прекращения добычи слюды, М. П. Мельниковым была опубликована сводка «Слюда и циркон — новые отрасли горной промышленности» [9], что, однако, не привлекло внимания к этим видам сырья. Вышли в свет сводка П. А. Земятченского по глинам и каолинам Южной России [8] и ряд других обобщающих работ.

К концу XIX в. русские минералоги и геологи уже хорошо знали многие отечественные месторождения минералов и горных пород, являющихся неметаллическим сырьем, однако промышленная их добыча практически не была организована.

Среди научных исследований неметаллического сырья на первое место должны быть поставлены исключительно глубокие исследования цемента и других вяжущих веществ, проводившиеся в конце XIX в. в СПб. Институте путей сообщения профессором Н. А. Белелюбским; им же была создана первая в России лаборатория по изучению физико-механических свойств камня. В этой лаборатории проводились испытания камня, применявшегося при строительстве на всех дорогах России. В коллекции камней, испытанных здесь, были горные породы Украины, Каре-

лии, Урала, Кавказа и Сибири. Разработанные Н. А. Белелюбским методы изучения горных пород в значительной мере сохранили свое значение до настоящего времени [6]. Особенно большое внимание уделялось им изучению морозостойкости камня — свойству, которое особенно важно для службы горных пород в сооружениях на территории России.

В 1929 г. А. Е. Ферсман справедливо подчеркнул: «Трудно найти другую отрасль естественных производительных сил, которая в большей степени, чем область нерудных ископаемых, была бы пасынком не только научного исследования, но и серьезного экономико-статистического и технического подхода ... В целом ряде стран нерудное сырье даже не считалось объектом горного промысла ... металл и топливо являлись основными продуктами горного дела, и для них создавалась и наука, и практика, на них вырабатывались научные школы, давшие ряд ученых и практических деятелей» [18, с. 3].

Яркие выступления А. Е. Ферсмана и непосредственные нужды народного хозяйства в значительной мере способствовали изменению существовавшего положения. Изучение неметаллического сырья начали специалисты Академии наук СССР. Кроме того, в послереволюционные годы в Москве на базе созданного до революции В. В. Аршиновым частного Геологического института «Литогеа» был организован Институт прикладной минералогии, главной задачей которого было изучение и освоение месторождений неметаллического сырья. Результаты работы этого института и его филиалов в союзных республиках были исключительно велики; этим институтом под руководством Н. М. Федоровского были созданы основы развития промышленности по добыче барита, флюорита, графита, каолина, бентонитов и другого сырья.

Современное состояние изученности неметаллического сырья

Фосфорное сырье. Существуют два главных генетических типа этого столь важного для сельского хозяйства и дефицитного во всем мире сырья: издавна добывающиеся осадочные фосфориты и апатиты, уникальные залежи которых были открыты А. Е. Ферсманом в Хибинах. Богатые фосфором апатитовые концентраты могут быть получены из пород, относительно бедных фосфором. Расчеты показывают, что экономически целесообразно обогащать горные породы, содержащие 10—12% апатита (3—4% P_2O_5). Дальнейшее повышение цен на фосфорные удобрения, безусловно, еще больше снизит предельное содержание апатита в исходных породах и приведет к перспективному получению апатитовых концентратов из апатитсодержащих карбонатитов, фосфорсодержащих железных и железо-титановых руд, а также из некоторых щелочных пород и габбро [2].

Менее благоприятны перспективы развития добычи осадочных фосфоритов. Легкообогатимые зернистые и ракушечные фосфориты встречаются редко; некоторые фосфоритовые месторождения близки к истощению. Во всем мире и в СССР намечается переход к добыче более бедных и труднообогатимых руд, которые в ряде случаев перерабатываются на фосфоритную муку, являющуюся эффективным удобрением только кислых почв. В СССР имеются перспективы обнаружения богатых фосфором фосфоритов на больших глубинах в пределах хребта Каратау и в Эстонии (ракушечные фосфориты).

Калийные соли. Залежи этого полезного ископаемого открыты во многих эвапоритовых толщах. На севере Америки весьма мощные толщи расположены на пограничной территории с Канадой. В Европе, включая Советский Союз, крупные месторождения связаны с эвапоритовыми пермскими и третичными толщами.

Использование в качестве удобрения хлористых солей калия крайне вредно сказывается на плодородии почвы, вызывает ее засоление. Его можно избежать, если использовать сернокислые калиевые соли. Некоторые растения (например, хлопок) при удобрении хлористыми солями вообще не дают хороших урожаев.

Основным источником производства серной кислоты для переработки хлористых солей калия в сульфат является **самородная сера.** Источник этого сырья — месторождения Прикарпатья и Гаурдак в Туркмении, но они не могут удовлетворить потребности промышленности. Перспективы дальнейшего получения серы заключаются в использовании ее вулканических месторождений, известных на Востоке СССР, и серы нефти и горючих газов. Некоторое количество серы может быть получено при улавливании отходящих газов цветной металлургии. Принципиально возможно получение серы при переработке гипса на цементное сырье, как это делается в Англии [7].

Фтористое сырье. Единственным источником фтористых продуктов в Советском Союзе является флюорит. Запасы известных в СССР месторождений флюорита и возможность выявления новых месторождений позволяют надеяться на поступление высококачественного сырья в течение ряда лет. Однако на очереди в стране переход на другие, более дешевые виды фтористого сырья. Необходимо наладить улавливание фтора из газов химических заводов, перерабатывающих апатит и фосфорит на высококонцентрированные фосфорные удобрения (примерно 3—4% веса апатита). При улавливании фтора из отходящих газов происходит синтез кремнефтористой кислоты, которая затем перерабатывается на искусственный криолит, необходимый для электролитического получения алюминия. Почти весь криолит, используемый в промышленности западных стран, получается за счет фтора при производстве удобрений. Вероятным источником фторных соединений может быть природный криолит. Дли-

тельно разрабатывавшиеся криолитовые месторождения Гренландии представляли собой, по-видимому, щелочногранитные пегматиты с криолитом в центральных блоках. В Африке и СССР выявлены щелочные редкометальные граниты, в которых криолит играет роль породообразующего минерала. В некоторых случаях количество криолита и других фторидов повышенное и может иметь практическое значение [12].

Иод и бром. Главным источником иода и брома в мире служат водные растворы солей этих элементов. Это рассолы, получаемые от выпаривания морской или близкой к ней по составу воды или в еще большей степени воды нефтяных месторождений. Месторождения иода типа чилийских, где иодные минералы встречаются вместе с селитрой, в настоящее время не играют сколько-нибудь значительной роли в промышленности.

Борное сырье. Считается, что самые крупные борные месторождения приурочены к вулканогенно-осадочным отложениям озер. Таковы североамериканское оз. Сирлез и древние озера округа Керн, некоторые озера Турции и Тибета.

В Лардерелло (Италия) борные соли извлекаются из осадков вод, получаемых при конденсации пара геотермической электростанции. Здесь бор считают вулканогенным, однако работы Д. Маринелли [20], изучавшего разрез буровых скважин, подводящих пар к этой электростанции, показали, что пар на пути от вулканического очага проходит через толщу эвапоритов, служащую источником бора.

Некоторые борные месторождения образовались в последние этапы кристаллизации эвапоритов; борные минералы (преимущественно борацит) приурочены к пластам калийно-магнезиальных солей. Большое число вторичных борных минералов приурочено к гипсовым шляпам таких толщ; местами ведется их добыча. Промышленно-важные силикатные борные руды приурочены к малоглубинным волластонитовым скарнам. Некоторые борные минералы, в первую очередь людвигит и продукты его разложения, выявлены в магнезиальных скарнах, но практическое освоение их ведется только КНДР. Очень большие количества бора связаны в аксините и турмалине, однако содержание бора в этих минералах считается недостаточным для промышленного использования.

Содовое сырье. В настоящее время поиски содового сырья в СССР крайне актуальны [12]. В прошлом сода во всем мире, в том числе в нашей стране, получалась на химических заводах из каменной соли и известняка. Производство соды — относительно дешевый и простой процесс, недостатком которого является огромное количество отходов в виде практически не используемого народным хозяйством хлористого кальция — продукта исключительно гигроскопического, который невозможно захоронить или складировать; он поглощает влагу из воздуха и расплывается безжизненными белыми озерами, выводящими из хозяйственного использования большие площади сельскохозяй-

ственных угодий; спуск в реки и другие водоемы этого продукта также невозможен из-за его вредности для всего живого.

В США производится добыча троны (водной соды) из третичных отложений штатов Вайоминг, Колорадо и Юта. Дальнейшее развитие содовой промышленности в США, по-видимому, связано с использованием не только троны, но и давсонита — карбоната натрия и алюминия, при переработке которого можно получить одновременно соду и глинозем. Озерную соду добывают многие африканские страны [3].

Сырье для вяжущих материалов. Культура производства вяжущих материалов в России всегда была весьма высокой. Старинные постройки возводились с использованием известкового вяжущего материала, однако уже в 1822 г. была опубликована работа, указывающая пути производства настоящих цементов. Несмотря на это, в 50—70-х годах XIX в. в строительстве широко применялся английский цемент. Нужен был огромный авторитет Н. А. Белелюбского, чтобы показать необходимость создания отечественного цементного производства.

СССР по количеству и качеству выпускаемого цемента стоит на первом месте в мире. Вместе с тем намечается необходимость коренного изменения процесса его производства. В настоящее время для получения цемента идут два сырьевых компонента — известняк и глина, смесь которых подбирается так, чтобы при обжиге получить безводные соединения, которые, будучи смочены водой, соединяются с ней, давая новые соединения. Обрастая друг друга и каменные обломки (щебень), они создают единый материал — бетон.

Однако для производства вяжущих материалов можно использовать и другие компоненты. Народное хозяйство, кроме цемента, потребляет в больших количествах глинозем и щелочи. Исходя из этого, еще в 30-е годы по инициативе и под руководством А. Е. Ферсмана была разработана методика комплексной переработки нефелина с получением полезного продукта за счет всех компонентов этого минерала. На ряде промышленных предприятий, построенных по этой схеме, ведется переработка нефелинового концентрата, получаемого попутно с апатитом Хибин, или специально добываемой почти чисто нефелиновой породы — уртита. В качестве продуктов переработки нефелина получаются: а) глинозем, б) сода или поташ, в) полуфабрикат цементного клинкера. Глинозем и сода являются дефицитными продуктами. Полуфабрикат цементного клинкера полностью перерабатывается на цемент; таким образом, используются все компоненты исходного сырья, производство рентабельное и безотходное.

Наиболее рациональным в перспективе является перевод большинства цементных заводов на нефелиновое сырье с получением наряду с цементом соды и глинозема. Нефелиновый концентрат транспортировать значительно рентабельнее, чем гото-

вый цемент. Организация безотходного производства приведет к резкому повышению его рентабельности [13].

Флюсовые материалы. Использование известняка и кварцита в качестве флюсовых материалов сохранится в течение ближайших лет. Окомкование руд вместе с флюсами приводит к некоторому уменьшению количества флюсовых материалов. Однако одновременно растет потребность в бентонитовых глинах, используемых в качестве связующего материала в процессе окомкования, что, по-видимому, будет продолжаться и впредь.

Интересен опыт использования для окомкования железных руд нонтронитовых глин. Количество используемой глины при этом повышается, но ввод в процесс большого количества дополнительного железа, входящего в состав нонтронита, делает его экономически выгодным.

Стекольное и огнеупорно-керамическое сырье. В настоящее время в Советском Союзе еще используются месторождения высококачественных кварцитов и чрезвычайно чистых стекольных песков, которые пригодны даже для производства высших сортов хозяйственного стекла. Равным образом в стране еще имеются залежи прекрасных глин и высококачественных маложелезистых каолинов. До сих пор наша промышленность получает главную массу полевого шпата выборкой его из крупнокристаллических обособлений в пегматитовых жилах. Имеющиеся данные позволяют предполагать, что в Европейской части СССР запасов этого сырья хватит еще на ближайшее время. Что же касается Азиатской части Советского Союза (за исключением Казахстана), то здесь глинистые продукты и особенно высокие сорта каолина получаются в результате сложных процессов тщательного обогащения строго отобранных и селективно добытых загрязненных песков и полукислых глин или осадочных каолинов.

Промышленное производство полевого шпата, в становлении которого в послереволюционные годы активно участвовал А. Е. Ферсман, было организовано на основе ручной отборки высококачественного продукта. В настоящее время в дополнение к добыче полевого шпата из пегматитов на Лянгарском заводе получают флотационный концентрат плагиоклаза, ортоклаза и кварца, освобожденный от темных минералов. Этот концентрат нашел применение в стекольной промышленности. Кроме того, в керамической промышленности используется фарфоровый камень — своеобразный заменитель полевого шпата и ряда других компонентов керамической шихты.

Все эти материалы, особенно фарфоровый камень, оказались очень дешевым материалом. Пока применяется только фарфоровый камень, добываемый близ г. Владивостока у сел. Гусевка, но поиски и разведка подобных материалов ведутся на Кавказе, в Закавказье и в Казахстане.

За рубежом главную массу полевого шпата составляет флотационный калиевый полевой шпат гранитов, отделяющийся от

плагиоклаза, кварца и темных минералов. Кроме того, используются полевой шпат нижних зон древних каолиновых кор выветривания, маложелезистые разности аплита и некоторые щелочные породы. В Польше в последнее время большое внимание уделено разработке методов извлечения полевого шпата из аркозовых песков [12].

В Советском Союзе перспективно использование полевого шпата нижних горизонтов каолиновых месторождений. В ряде мест на Украине и в Казахстане найдены разности каолина с повышенным содержанием реликтового калиевого шпата (так называемые щелочные или содовые каолины). Разработка метода получения из этих каолинов полевошпатового продукта может дать высококачественный концентрат калиевого полевого шпата, почти не содержащего натрия и железа.

Агрегатное сырье. Под этим названием предлагается объединить все виды неметаллических полезных ископаемых, использование которых определяется физическими свойствами минерального агрегата, а другие особенности сырья отступают на второй план. Сюда относятся формовочные материалы, различные сорбенты (бентониты, цеолиты), строительные материалы. Масштабы использования в народном хозяйстве агрегатного сырья исключительно велики. По стоимости оно уступает только горючим ископаемым — нефти, углю, газу. Развитие промышленности полезных ископаемых этой группы идет традиционными путями.

В качестве **формовочных материалов** традиционно используются кварцевые пески, но они имеют очень много недостатков. Кварц при 575° С претерпевает α—β переход; при этом его зерна трескаются, давая много пыли. В результате растрескивания кварцевых зерен очень сильно меняются зерновой состав песка и его пористость; в результате практически исключается его вторичное использование. Кроме того, теплопроводность кварцевого песка весьма низка.

За рубежом получило распространение использование вместо кварцевого искусственного оливинового песка [12], который не дает пыли и служит для формовки многократно. Очень высокая теплопроводность оливинового песка и его хорошая пористость благоприятны для получения отливок более высокого качества.

Важной задачей при изучении **строительного камня** является получение легких материалов. Ведутся широкие исследования сырья для приготовления легких наполнителей бетона — керамзитовых глин и сланцев, а также пемзы, вулканических шлаков, трепела, диатомита и особенно перлита, дающего наиболее легкий теплоизоляционный материал [14]. Весьма перспективно использование вермикулита.

Кристаллосырье. Здесь так названы те виды минерального сырья, применение которых основано в первую очередь на совершенстве кристаллов. Это прежде всего пьезокварц и опти-

ческий кварц, исландский шпат, драгоценный и поделочный камень, абразивные материалы, лазерные кристаллы, а также технические камни — слюды, асбест и др.

Для этой группы сырья характерна большая стоимость крупных промышленных кристаллов и дешевизна мелкокристаллического материала. В настоящее время интенсивно развиваются методы синтеза пьезооптических и лазерных кристаллов, а также драгоценных камней; в перспективе все это уже было намечено в последних работах А. Е. Ферсмана. Однако удается синтезировать далеко не все виды кристаллов. Во многих случаях естественные кристаллы являются необходимым промышленным сырьем. По-видимому, в дальнейшем геологические поиски сведутся к выявлению тех видов сырья, за счет которых можно вести синтез искусственных кристаллов или так называемого восстановленного сырья, т. е. новых материалов, структурированных так, что они отчасти моделируют свойства монокристаллов. Таковы, например, мелкая слюда и гранулированный кварц, потребность в которых сохранится на многие годы.

Приведенный выше обзор дает основание для заключения о больших задачах по выявлению неметаллического сырья, необходимого для всестороннего развития народного хозяйства Советского Союза. Пути решения этих задач намечены в классических работах А. Е. Ферсмана.

Для химического сырья главные поисковые критерии создаются детальными исследованиями геохимической истории элементов с учетом геологических факторов их концентрации. В ряде случаев важна не столько концентрация элементов, сколько фиксация их в форме легко выделяемого минерала (например, апатиты).

Для огнеупорно-керамического сырья важнейшим фактором образования полезного ископаемого являются геохимические процессы выноса из горной породы ряда элементов — компонентов красящих окислов железа, хрома, титана или окислов их минералов — плавней (K-Na полевые шпаты, слюды и др.).

Образование агрегатного сырья контролируется условиями кристаллизации и образования минеральных агрегатов. Выявление процессов диагенетического уплотнения и упрочения — важнейший фактор оценки осадочных пород, относимых к группе агрегатного сырья. Для магматических пород, которые можно рассматривать как сырье той же группы, важны оценка условий кристаллизации, формирования текстур, структур и факторов, определяющих взаимосвязь отдельных монокристальных индивидов. Во всех случаях весьма важен минеральный состав, и возникновение некоторых минералов (глинистых продуктов, сульфидов, радиоактивных минералов) должно рассматриваться как вредный процесс, а горные породы, содержащие минералы такого рода, должны полностью исключаться из понятия «агрегатное сырье».

Образование неметаллических полезных ископаемых группы кристаллосырья определяется условиями роста совершенных кристаллов, которые только и являются полезным ископаемым. Поисковые признаки на этот вид сырья сводятся в основном к выявлению условий появления полостей, в которых растут кристаллы. Для ряда драгоценных камней и пьезокварца это занорыши в пегматитовых жилах и трещины и полости в гидротермальных жилах; контракционные трещины служат для образования асбеста и т. д.

Главное в наследии А. Е. Ферсмана для геологов, изучающих неметаллические полезные ископаемые, это обязательность тщательного определения особенностей сырья, определяющих его оптимальное использование, теоретическое рассмотрение этих особенностей, определение геолого-геохимических причин их формирования и совершенствование поисковых признаков месторождений.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Азанчеев Ю.* Каменоломни и разработка простых полезных ископаемых в России. СПб.: Горн. департамент, 1894. 341 с.
2. Апатиты. М.: Наука, 1968. 424 с.
3. *Баталин Ю. В., Касимов Б. С., Станкевич Е. Ф.* Месторождения природной соды и условия их образования. М.: Недра, 1973. 206 с.
4. *Безбородов М. А.* Очерки по истории русского стеклоделия. М.: Промстройиздат, 1952. 167 с.
5. *Безбородов М. А.* Д. И. Виноградов — создатель русского фарфора. Л.: Изд-во АН СССР, 1959. 511 с.
6. *Гейслер А. Н.* Карта месторождений каменных строительных материалов. Л.: Изд-во АН СССР, 1925. 57 с.
7. Геохимия и минералогия серы. М.: Наука, 1972. 296 с.
8. *Замятченский П. А.* Каолинитовые образования Южной России. СПб., 1896. 324 с. (Тр. СПб. о-ва естествоисп. Отд. геол. и минерал.; Т. 21; Вып. 2).
9. *Мельников М. П.* Слюда и циркон — новые отрасли горной промышленности.— Горн. журн., 1888, ч. 2, № 4/6, с. 278—320.
10. Неметаллические ископаемые СССР: В 5-ти т. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1936—1943. Т. 1. Абразивы — ашарит/Гл. ред. Н. П. Горбунов. 1936. 572 с.; Т. 2. Базальт — боксит/Гл. ред. А. Е. Ферсман. 1943. 447 с.; Т. 4, Глины и каолин — глины отбеливающие/Гл. ред. А. Е. Ферсман. 1941. 771 с.; Т. 5. Гнейс — жемчуг/Гл. ред. А. Е. Ферсман. 1941. 581 с.
11. Нерудные ископаемые/Под ред. И. И. Гинзбурга, И. Д. Курбатова и др.; В 4-х т. Л.: КЕПС АН СССР, 1926—1929. Т. 1. Абразивные материалы — калий. 1926, 550 с.; Т. 2. Каолин и глины — сера. 1927. 659 с.; Т. 3. Слюда — циркоьий. 1927. 719 с.; Т. 4. Дополнения. 1929. 390 с.
12. Новые виды неметаллических полезных ископаемых. М.: Наука, 1975. 238 с.
13. Новые небокситовые виды глиноземного сырья. М.: Наука, 1982.
14. Перлиты. М.: Наука, 1981. 293 с.
15. *Севергин В.* Начертание технологии минерального царства. СПб.: Рос. Акад. наук, 1821. Т. 1. 437 с.
16. *Ферсман А. Е.* Война, промышленность и сырье.— Тр. Комис. сырья, 1916, № 3, с. 151—155.
17. *Ферсман А. Е.* Драгоценные камни. Цветные камни России. Пг.: Изд-во Рос. Акад. наук, 1922, Т. 1. 420 с.
18. *Ферсман А. Е.* Проблема нерудных ископаемых. Л.: НХТИ НТУ ВСНХ, 1929. (Материалы по химизации нар. хоз-ва СССР; Вып. 2). 107 с.

19. *Ферсман А. Е.* Очерки по истории камня. М.: Изд-во АН СССР. Т. 1. 1954. 371 с.; Т. 2. 1961. 371 с.
20. *Marinelli G.* Annals de la société geologique Belgique, 1961—1962, 85, 196[illegible] Bull. 10, p. 407—438.

УДК 553.042

В. В. ИВАНОВ

ПЕРСПЕКТИВЫ ОСВОЕНИЯ РЕСУРСОВ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Освоение минеральных ресурсов редких элементов в нашей стране тесно связано с именем А. Е. Ферсмана [18—25]. В начале 40-х годов он писал: «В современной промышленности, с ее величайшими техническими достижениями и гигантскими масштабами, исключительно велика роль минерального сырья. В сущности говоря... без легирующих, редких и сверхредких элементов немыслимо было бы изготовление и применение различных сложнейших машин и тончайших аппаратов и приборов, призванных обслуживать нужды металлургии, химии, машиностроения, авиации» [24, с. 5]. Проблема минеральных ресурсов рассматривалась А. Е. Ферсманом во всей полноте, исключительно глубоко и современно.

К истории геологических исследований по редким элементам

А. Е. Ферсман впервые показал, что геология должна иметь дело с полной системой природных концентраций всех химических элементов [20], включая редкие. К ним ранее относились олово, молибден, вольфрам, титан, ртуть, сурьма, висмут, ванадий, франций, радий, актиний, а также те элементы, за которыми это название сохранилось до настоящего времени и которые рассматриваются в этой статье: литий, рубидий, цезий, бериллий, стронций, тантал, ниобий, 15 элементов редкоземельной группы, скандий, цирконий, гафний, кадмий, галлий, индий, таллий, германий, селен, теллур, рений. До Великой Октябрьской социалистической революции почти ни один из них не добывался в России и сведения об их рудах отсутствовали.

Вклад А. Е. Ферсмана в решение проблемы сырьевых ресурсов редких элементов чрезвычайно велик. В 1917—1918 гг. он впервые обобщил материалы по распространению на территории нашей страны тантала, редких земель и тория. Краткие очерки по этим элементам, а также ванадию, цирконию и др. были опубликованы в Химико-технологическом справочнике, вышедшем под его редакцией [25]. Он стал одним из главных вдохновителей и организаторов работ по редким металлам в

нашей стране [7]. В 1939 г. опубликован том 4 «Геохимии» А. Е. Ферсмана [20] с непревзойденными по широте обобщений очерками о всех стабильных, в том числе редких, элементах. Изложенные А. Е. представления легли в основу последующих геологопоисковых работ. С именем А. Е. Ферсмана связано открытие и начало освоения минеральных богатств Хибин и Ловозера — первых комплексных месторождений агрохимического и редкометального сырья. Его выдающимися научными идеями до сих пор руководствуются геологи при изучении пегматитовых месторождений керамического, слюдяного и редкометального сырья [21]. Он впервые обратил внимание на существование редкометальных гранитов, назвав их «гранитами с неотделившимся пегматитовым остатком», и тем самым предвосхитил открытие нового промышленного типа месторождений.

Кроме создания основ геохимического метода поисков, А. Е. Ферсман дал образцы глубокого геолого-экономического анализа данных о полезных ископаемых с особым вниманием к редким элементам [22, 24]. Он неоднократно обращался к организации редкометального производства, писал о вреде ведомственного подхода и о необходимости проведения продуманной технической политики, максимально полного использования ресурсов. Одним из первых А. Е. Ферсман с большой остротой поставил вопросы комплексного использования минерального сырья, столь важные для производства редких элементов [19]. Благодаря работам сотрудников и последователей А. Е. уровень наших знаний по геологии редких элементов сегодня близок к тому, который характерен для традиционных полезных ископаемых.

К настоящему времени роль редких элементов еще более возросла, так как многие крупнейшие технические открытия последних десятилетий связаны с их использованием. Определилось большое значение для электроники германия, для нефтехимии — рения и редких земель, черная металлургия требует ванадия, ниобия, циркония, телевидение — стронция, стекольное производство — лития и т. д. Появление новых областей применения редких элементов часто приводит к резкому увеличению потребности в том или ином из них. Темпы увеличения потребления для редких элементов в десятки раз выше, чем для других полезных ископаемых. Поэтому для редких элементов опережающее развитие сырьевой базы должно идти значительно быстрее, и в этом их главное геологическое отличие от традиционных полезных ископаемых. Крупное повышение спроса на ниобий, литий, германий, бериллий и селен произошло в 50-е годы, вновь на ниобий, а также на тантал, литий, элементы редких земель и рений — в 60-е годы; на литий, индий — в 70-е годы.

В настоящее время использование редких элементов является одним из эффективных факторов научно-технического про-

гресса в энергетике, металлургии чугуна, стали и производстве сплавов, магнитных, тугоплавких и стойких при низких температурах материалов, в радиотехнике и электронной технике, опто- и акустоэлектронике, светотехнике, лазерной и инфракрасной технике, крекинге нефти и т. д. Редкие элементы успешно используются в таких материалоемких отраслях, как электролиз алюминия, автомобильная промышленность, железнодорожный транспорт, сельское хозяйство, сверхпроводниковая техника и др. Большие возможности открываются перед ними в связи с предстоящим созданием термоядерных, магнитогидродинамических, геотермических и солнечных электростанций, химических источников электроэнергии и т. д. [8, 9].

Важность работ по изучению ресурсов редких элементов обоснована в 50-е годы. Многие вопросы были поставлены учеником А. Е. Ферсмана — К. А. Власовым. Под его руководством была разработана долговременная программа сырьевого обеспечения редкометальной промышленности и в АН СССР появилась первая в стране специализированная лаборатория минералогии и геохимии по редким элементам (ЛАМГРЭ, 1953 г.), преобразованная в 1956 г. в Институт минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ).

В последующий период были выявлены источники сырья, в том числе карбонатиты и редкометальные граниты. Широкий размах геологоразведочные работы по редким элементам приобрели после 1966 г.

В результате проведенных работ редкометальная промышленность в нашей стране располагает самостоятельной сырьевой базой. Большие возможности для увеличения производства редких элементов заключены в решении проблем обогащения и переработки сырья. В мировой практике особенно низко извлечение из руд так называемых рассеянных элементов, получаемых попутно. Для скандия, таллия, галлия и рубидия коэффициент сквозного использования (от запасов в недрах до редкометальных продуктов) не достигает 1%, для рения — 15, для теллура и индия — 25, для селена — 50, для кадмия — 70%.

Сырьевая база редких элементов

Характерными особенностями сырья для получения редких элементов являются быстрое увеличение его ресурсов с появлением потенциальных источников и отставание их промышленного освоения, многообразие типов руд и малое количество разрабатываемых месторождений, высокая степень комплексности руд и довольно низкая степень извлечения компонентов.

Распространенное мнение, что редкие элементы не образуют крупных месторождений, требует пересмотра, так же как и представление о том, что редкометальные руды отличаются от других руд низкими содержаниями полезных компонентов и большей неравномерностью их распределения. По этим показа-

телям они далеко не во всех случаях отличаются от других элементов.

Несмотря на многообразие и появление новых генетических и промышленных типов месторождений редких элементов, круг их основных сырьевых источников уже определился достаточно полно [4, 8, 12, 14, 16, 17]. В настоящее время более или менее крупные сырьевые источники известны для всех редких элементов (см. таблицу). Содержания некоторых редких элементов в рудах иногда составляют десятые доли процента и более. Проиллюстрируем это данными по зарубежным месторождениям. В настоящее время за рубежом основное количество лития, рубидия, цезия добывается из гранитных пегматитов. Месторождения этого типа по запасам руд обычно относятся к средним, но известны и крупные объекты с запасами комплексных руд в несколько миллионов тонн; таково, например, месторождение Берник Лейк в Канаде. Значительное количество тантала добывается из кор выветривания редкометальных пегматитов, а в качестве руд редких щелочных металлов большой интерес могут представлять околопегматитовые метасоматиты [12]. Близкими запасами и комплексом элементов при низких их содержаниях характеризуются редкометальные граниты. Более крупные запасы и высокие содержания компонентов (ниобий, редкие земли, цирконий, возможно, литий — до миллионов тонн, тантал — десятки тысяч тонн) характерны для редкометальных щелочных гранитов и метасоматитов. Колумбитовые щелочные граниты и коры выветривания Нигерии в 50-е годы были основным мировым поставщиком ниобия.

Из руд бериллия все более существенное значение приобретают различные послемагматические образования гранитоидного ряда, нередко содержащие десятые доли процента этого элемента; его запасы в таких рудах достигают десятков тысяч тонн (Томас Рейндж, Редскин Шток, США). Еще перспективнее для многих редких металлов месторождения в щелочных изверженных породах. Ценнейшие комплексные месторождения в агпаитовых нефелиновых сиенитах содержат большой комплекс полезных ископаемых. Среди них значительное место принадлежит редким элементам (элементы редких земель, стронций, ниобий, цирконий, тантал, рубидий, галлий, гафний и др.). Эти месторождения характеризуются уникальными масштабами. Быстрое и наиболее полное освоение этих месторождений, как справедливо считал А. Е. Ферсман, — сложная и не столько технологическая, сколько организационно-техническая задача (создание крупных горно-химико-металлургических предприятий с замкнутым циклом производства). Существенные скопления циркониево-редкоземельно-тантало-ниобиевых руд ассоциируют с щелочными миаскитовыми породами.

Наиболее крупные и богатые по содержанию полезных компонентов месторождения ниобия, редких земель, циркония, иногда тантала обнаружены в последние десятилетия в связи

Параметры сырьевых ресурсов редких элементов литосферы (без социалистических стран)

Элемент	Кларк литосферы, % [11]	Годовая добыча * (производство) за 1977—1980 гг., тыс. т [8, 9]	Годовое потребление, тыс. т			Достоверные запасы [9, 2] / Установленные минеральные ресурсы на 1978—1980 гг., млн. т [8, 9]	Необходимые ресурсы на 2000—2010 гг., млн. т		Возможные общие ресурсы, млн. т	Отношение ресурсов, необходимых на 2000 г., к современным запасам		Отношение возможных общих ресурсов к необходимым на 2000 г. максимальным ресурсам
			1978—1980 гг.	2000—2010 гг.			минимальные	максимальные		по минимуму	по максимуму	
				максимум ретроспективный [9, 11] / максимум перспективный [8, 9]	минимум / максимум							
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
Li	$2 \cdot 10^{-3}$	7	7	28 / 200	40 / 320	3,3 / 29	2,8	20	60	0,9	6	3
Zr	$1{,}3 \cdot 10^{-2}$	135	130	250 / 600	220 / 330	20 / 30	25	60	332	1,2	3	5,5
Sr	$3{,}8 \cdot 10^{-2}$	60	35	45 / 80	140 / 550	13 / 50	4,5	8	554	0,3	0,6	69
TR	$1{,}7 \cdot 10^{-2}$	50	25	50 / 80	100 / 220	9 / 20	5	8	251	0,5	0,8	31
V	$1{,}9 \cdot 10^{-2}$	32	20	70 / 250	30 / 440	3 / 40	7	25	277	2,3	8,3	9
Be	$1{,}5 \cdot 10^{-4}$	(0,5)	0,35	2,8 / 20	0,6 / 4	0,062 / 0,440	0,28	2	12	4,5	32	6
Nb	$1{,}9 \cdot 10^{-3}$	(12)	11	27 / 300	220 / 550	20 / 50	2,7	30	62	0,1	1,5	2
Ta	$1 \cdot 10^{-4}$	(0,9)	1	4,6 / n	1 / 10	0,1 / ?	0,46	n	8	4,6	n	?
Sc	$2{,}4 \cdot 10^{-3}$	(0,0001)	0,00001	0,00002 / 0,00n	—	—	—	—	82	—	—	—
Rb	$9 \cdot 10^{-3}$	(0,006)	0,006	0,01 / 0,n	—	— / 0,17	—	—	247	—	—	—
Cs	$2 \cdot 10^{-4}$	0,015	0,015	0,03 / 0,n	—	? / 0,18	—	—	11	—	—	—
Hf	$2{,}6 \cdot 10^{-4}$	(0,036)	0,036	0,07 / 0,15	—	0,04 / 0,05	—	—	12	—	—	—
Cd	$1{,}9 \cdot 10^{-5}$	(14)	15	23 / 45	—	0,6 / 1,1	2,3	4,5	0,4	3,8	7,5	0,08
Se	$1 \cdot 10^{-5}$	(1,1)	1,1	1,4 / 2,7	—	0,20** / 0,58	0,14	0,27	0,1	0,7	1,3	0,4
Bi ***	$1 \cdot 10^{-5}$	(6)	1,5	4,4 / 6,9	—	0,065 / 0,133	0,44	0,69	0,3	7,3	10	0,4
Ge	$1{,}3 \cdot 10^{-4}$	(0,065)	0,1	0,13 / 0,2	—	0,002 / ?	0,01	0,02	6	5	10	300
Te	$1 \cdot 10^{-7}$	(0,18)	0,18	0,25 / 0,50	—	0,071** / ?	0,02	0,05	0,03	0,3	0,7	0,6
In	$2{,}3 \cdot 10^{-5}$	(0,15)	0,06	0,13 / n	—	0,026** / ?	0,01	0,0n	0,2	0,4	—	n
Ga	$1{,}7 \cdot 10^{-3}$	(0,04)	0,02	0,007 / 0,1	—	? / 0,n	—	—	—	—	—	—
Tl	$7 \cdot 10^{-5}$	(0,03)	0,002	0,014 / 0,02	—	0,007** / ?	—	—	—	—	—	—
Re	$7 \cdot 10^{-8}$	(0,005)	0,01	0,005 / 0,05	—	0,005** / 0,006	0,0005	0,005	0,02	0,1	1	4

* Цифры добычи, производства, потребления, ресурсов округлены. ** Оценки по [5]. *** Кларк по А. Е. Ферсману [20].

с формацией ультраосновных щелочных пород и карбонатитов. Масштабы месторождений этой рудной формации огромны. Запасы руд нередко составляют сотни миллионов тонн, а содержание ниобия и редких земель — целые проценты. Например, в Бразилии на месторождении Араша-ди-Барейро прогнозные запасы руд, представленных пирохлорсодержащей корой выветривания, оцениваются миллиардами тонн при запасах Nb_2O_5 не менее 110 млн. т и содержании этого компонента 2,5—4,5%. В сходном по масштабам оруденения бразильском месторождении Тапира ниобию по содержанию не уступает титан, есть фосфор и другие компоненты. Запасы TR_2O_3 в карбонатитовых месторождениях Бразилии оцениваются в 2 млн. т, а запасы циркониевых минералов только в месторождении Покосде-Кальдес составляют около 1 млн. т. В Канаде месторождения карбонатитов также имеют крупные масштабы (в Ока, Джеймс-Бей и др. — сотни тысяч тонн Nb_2O_5), но качество руд более низкое (0,3—0,7% Nb_2O_5). Кроме ниобия, в рудах сосредоточены значительные количества редких земель (общие запасы около 1 млн. т TR_2O_3). В США самое крупное редкоземельное карбонатитовое месторождение Маунтин-Пасс имеет запасы более 50 млн. т TR_2O_3 в 5%-ных рудах. Нередко в месторождениях этой формации присутствуют тантало-ниобиевые минералы, гатчеттолит и другие полезные минералы.

Месторождения ванадия связаны с основными-ультраосновными породами. Запасы ванадия в крупных месторождениях анортозитовой и габбро-норитовой формаций достигают нескольких миллионов тонн, а содержание ванадия в титаномагнетите — 0,3—1,5%. Из других редких элементов должен быть отмечен скандий, содержание которого в ильмените месторождений в анортозитах составляет сотые доли процента, а запасы — десятки тысяч тонн.

На перечисленные выше промышленные типы эндогенных месторождений приходится основное количество большинства редких литофильных и сходных с ними элементов: около 90% мировых запасов бериллия, тантала, ниобия (включая коры выветривания), около 80% редких земель цериевой группы и около 60% иттриевой группы, а также цезия [14].

Основные запасы циркония (>75%), а также значительные количества стронция, рубидия (>60%) и лития (>55%) связаны с экзогенными месторождениями [12]. Наиболее крупными месторождениями циркония и гафния являются современные и древние прибрежно-морские россыпи монацита, ильменита и циркона с запасами до нескольких миллионов тонн циркония и десятков тысяч тонн гафния (Австралия, Канада). Миллионы тонн редких земель несут прибрежно-морские россыпи монацита (США, Бразилия, Индия, Австралия) и десятки тысяч тонн — россыпи ксенотима (США и др.). Важное значение для получения ниобия (тысячи тонн) и отчасти тантала (сотни тонн) имеют элювиально-делювиальные и лагунные россыпи

колумбита в связи с щелочными гранитами, лопарита в связи с нефелиновыми сиенитами и пирохлора в связи с карбонатитами (сотни тысяч тонн ниобия и тысячи тонн тантала). Для получения стронция особенно крупные масштабы имеют вулканогенно-осадочные месторождения целестина (Ладлоу, США, более 1 млн. т SrO).

Высокие содержания лития отмечены для некоторых углисто-глинисто-карбонатно-слюдистых пород с содержанием его до 0,5% и запасами в сотни тысяч тонн; буроугольные месторождения содержат сотые или десятые доли процента германия. Рений и другие халькофильные редкие элементы характерны для черносланцевых образований. К хемогенно-осадочному типу относятся карноллитовые руды (миллион тон рубидия); бокситы (сотни тысяч тонн ванадия и галлия, десятки тысяч тонн скандия); фосфориты (сотни тысяч тонн редких земель, селен и другие редкие элементы). К органогенно-осадочным породам приурочены месторождения апатитизированного костного детрита с редкими землями и стронцием (сотни тысяч тонн), селеном и теллуром; углисто-кремнистые ванадиеносные сланцы (миллионы тонн ванадия); рений- и ванадийсодержащие нефти и битуминозные образования; современные железомарганцевые океанические конкреции (миллионы тонн галлия, таллия, кадмия, теллура и др.); современные сульфидоносные осадки (типа Красного моря), содержащие комплекс халькофильных редких элементов.

Крупным и самым дешевым источником редких щелочных металлов, стронция и некоторых других элементов являются высокоминерализованные воды. Огромные запасы лития и рубидия (миллионы тонн) заключены в рапе соленых озер (США, Чили, Израиль и др.). Для этих же элементов, цезия и особенно стронция (сотни тысяч тонн) существенное значение могут иметь захороненные хлоридные природные рассолы. Редкие щелочные металлы, а также германий и другие халькофильные редкие элементы содержатся в геотермальных водах областей современного вулканизма.

Халькофильные редкие элементы-примеси (кадмий, селен, теллур, германий, индий, рений, а также таллий и галлий) в основном добываются из сульфидных руд месторождений (медных, свинцовых, цинковых, молибденовых и др.). Большинство этих элементов присутствуют в рудах совместно, их содержания низкие (обычно тысячные — десятитысячные доли процента), а запасы зависят от запасов руд основных металлов. Среди объектов, характеризующихся наиболее высокими содержаниями перечисленных элементов-примесей, необходимо отметить уникальные германий-сульфидные полиметаллические месторождения (Цумеб в Намибии и Кипуши в Заире), долгое время являющиеся основными поставщиками германия на мировой рынок. На эти месторождения приходится около половины выявленных за рубежом запасов германия. Не менее

высокие содержания германия имеются в стратиформных сфалеритовых рудах (США, Канада и др.). Специфически висмутовыми являются малосульфидные кварц-вольфрамитовые, молибденитовые и урановые руды. Собственно теллуровая минерализация характерна для некоторых золоторудных месторождений; наиболее высокие концентрации индия характерны для оловосодержащих свинцово-цинковых руд, таллия — для мышьяково-ртутных, селена, кадмия, германия и рения — для урановых руд, рения — для медистых пестроцветных пород и т. д. Однако основное количество перечисленных элементов, а также висмута заключено в медных, медно-цинковых и цинково-свинцовых рудах колчеданного типа и свинцовых рудах различных типов, а медно-молибденовые месторождения порфирового типа особенно богаты рением.

Говоря о масштабах месторождений и минеральных ресурсах зарубежных стран, необходимо учитывать, что они подсчитываются, как правило, только для отрабатываемых участков эксплуатируемых месторождений, т. е. учтены далеко не полностью, а ресурсы показываются с учетом мировой конъюнктуры.

Прогноз перспективных потребностей в редких элементах

Прогнозирование сырьевых ресурсов полезных ископаемых, в том числе и редких элементов, складывается из выявления долговременной потребности в них и определения возможностей обнаружения новых сырьевых ресурсов в будущем. Первая задача обычно решается экспертным путем с учетом роста потребностей на перспективу в результате научно-технического прогресса.

Прогнозируя долговременную потребность в редких металлах, необходимо учитывать их существенную специфику — весьма интенсивный, часто непредвиденный рост потребности при отсутствии устойчивых тенденций. Если для основных полезных ископаемых среднегодовой прирост потребления в наиболее развитых капиталистических странах за последние десятилетия был стабильным и составил 2—4%, то для редких элементов он резко колебался и в некоторые периоды достигал десятков процентов. Например, этот прирост составил (в %) с 1960 по 1970 г.: рений — 20, редкие земли — 18, ванадий — 12 и т. д.; с 1971 по 1974 г.: галлий — 50, цезий — 28, тантал — 17 [11]. Прогнозные оценки среднегодового прироста потребления редких элементов на 1985—2000 гг. в США — главном потребителе редких элементов, несмотря на уже достигнутый высокий уровень, по данным американских специалистов, значительно выше, чем для большинства остальных полезных ископаемых (в %): цезий — 10,4, бериллий — 6,8, галлий — 6,1, цирконий — 5,5, ванадий — 5,4, литий — 4,6, ниобий — 4,1 [11]. Сравнение наиболее достоверных ретроспективных оценок и

фактических данных за прошедшие годы показывает, что при этом не учитываются возможные новые потребители и оценки обычно занижаются. В основном на ретроспективе основываются наиболее известные оценки Горного бюро США. В частности, годовая потребность США в ниобии на 2000 г. определялась в 1970 г. в среднем в 8,7 тыс. т, в 1975 г. — в 10 тыс. т. Однако, как показал Б. И. Коган [8, 9], в работах которого наиболее полно используется перспективный подход, и последняя оценка занижена. Это связано с недоучетом таких новых крупномасштабных потребителей ниобия, как сверхпроводниковая промышленность, которая должна предъявить массовый спрос на ниобиевые материалы для изготовления магнитов большой мощности, линий электропередач, накопителей энергии и т. д. Еще больше возрастут потребности в ниобии при массовом строительстве термоядерных электростанций. В США эта программа намечена на 2010—2020 гг. и потребует в год около 200 тыс. т ниобия. Могут резко увеличиться потребности в сверхпроводниковых и жаропрочных материалах и для других отраслей новой техники. Необходимо также учитывать возможность замены им вольфрама и молибдена. Исходя из этого, даже максимальные потребности капиталистического мира в ниобии на 2000 г., определенные ретроспективно в 27 тыс. т/год, могут оказаться заниженными [9]. Горное бюро США определило максимальные потребности в литии на 2000 г. в 1970 г. в ~13 тыс. т (без учета применения при электролизе соединений алюминия), а в 1973 г. — почти в 28 тыс. т. Однако и этот прогноз не учитывает возможных огромных потребностей в литии для аккумуляторов в электромобилях и в энергетике. Возможная будущая потребность США в литии определяется в 1 млн. т. Грандиозны перспективы использования лития в термоядерных электростанциях — до 120 тыс. т/год. Требуют учета и возможные потребности в литии для производства сверхлегких алюминиево-литиевых сплавов, химических источников тока и в других областях, где его применение весьма эффективно [8]. Коренные сдвиги (также на порядок) вполне реальны для циркония в связи с развитием атомной техники; сплавы на основе ванадия могут потребоваться для атомной, аэрокосмической и химической промышленности. Только для строительства термоядерных электростанций в США в XXI столетии возможна годовая потребность порядка 200 тыс. т металла. В случае использования бериллия в термоядерных электростанциях только США потребуется около 10 тыс. т/год. Для стронция Горным бюро США не учтены вероятные потребности черной металлургии, производства запальных свечей и магнитных материалов. Для редких земель не полностью учтено потребление с целью обезвреживания выхлопных газов, для производства катализаторов, магнитных материалов, для обессеривания чугуна, аккумуляции и конверсии водорода в энергетике. Явно недоучитывается потребность в тантале, особенно для новой

энергетики и производства твердых сплавов. Рубидий и цезий могут понадобиться в волоконной оптике, рений — в специальных прецизионных жаропрочных сплавах особого назначения. В таблице (гр. 5) сугубо ориентировочные максимальные оценки годового потребления на 2000—2010 гг. учитывают новые возможные материалоемкие области применения редких элементов [8, 9]. Такие оценки кажутся невероятными, но надо учитывать, что в наше время, как когда-то было с радиоактивными элементами, происходит коренная переоценка представлений о важности редких металлов. Поэтому оценка будущего редких элементов по достигнутому уровню не делается вполне удовлетворительно. Однако и перспективный метод нуждается в дополнительных обоснованиях.

При рассмотрении промышленного использования химических элементов А. Е. Ферсман впервые обратился к данным геохимии. Он установил положительную зависимость между использованием элементов промышленностью и их средним содержанием в земной коре [20]. Развивая эту идею, А. И. Перельман [15] ввел в геохимию понятие «технофильность элементов» — T (отношение ежегодной добычи элемента к его кларку в земной коре) и показал, что для близких химических элементов имеется прямая связь между добычей и кларком. Несмотря на динамичность во времени, величина T может быть использована для определения возможных масштабов производства, так как существует оптимальный средний уровень значения технофильности. Для большинства черных металлов технофильность составляет $n \cdot 10^7$—$n \cdot 10^8$, для цветных и благородных — $n \cdot 10^8$—$n \cdot 10^9$ [15]. Этот уровень, вероятно, связан не столько с геохимическими особенностями элементов, сколько с масштабами их использования.

Для редких элементов 30—40 лет назад технофильность характеризовалась самыми низкими величинами ($n \cdot 10^2$—$n \cdot 10^4$), они сохранились только для скандия, рубидия, цезия и галлия — элементов, еще широко не используемых в промышленности. В настоящее время цирконий, кадмий, селен, висмут, теллур, рений близки по этой величине ($n \cdot 10^7$) к черным и цветным металлам широкого использования. Остальные редкие элементы еще не вышли на этот уровень. Величины технофильности для таких элементов, как литий, цирконий, ванадий, бериллий, ниобий, будут отвечать норме, если принять потребность в них в XXI столетии по самым высоким перспективным оценкам (см. таблицу, гр. 5), на порядок превышающим принятые максимальные ретроспективные оценки (см. таблицу, гр. 5). Это свидетельствует о реальности высоких оценок. В то же время редкие элементы с уже достигнутым высоким уровнем использования (стронций, редкие земли, германий), максимальная потребность в которых на начало XXI в., определенная перспективным способом, характеризуется тем же порядком величин, что и в настоящее время, но имеющие бо-

лее низкие значения технофильности ($n \cdot 10^6$), вероятно, характеризуются гораздо большим сырьевым потенциалом. Можно согласиться с мнением А. И. Перельмана, который на основании сегодняшней низкой технофильности стронция сделал вывод, что его использование в ближайшее время может достигнуть миллиона тонн в год; то же можно сказать о сумме редких земель, германии. Технофильность редких земель придет к норме при их годовом потреблении в 1 млн. т, а германия — в тысячи тонн. Очень низкими значениями технофильности ($n \cdot 10^2$—$n \cdot 10^4$) характеризуются рубидий, галлий, цезий, а самой низкой — скандий, потребность в котором измеряется килограммами. Исходя из показателя технофильности, оптимальные величины их использования должны выражаться десятками тысяч тонн в год.

К оценке оптимальной обеспеченности ресурсами потребности в редких элементах на длительную перспективу можно подойти, учитывая зависимость между запасами полезных ископаемых и их вовлечением в производство (со средним коэффициентом пропорциональности на 2000 г. $K_1 = 1 \cdot 10^2$) и между производством и потреблением (с коэффициентом пропорциональности $K_2 = 0{,}9$[1]) [6]. Считая, что сырьевой базой горно-металлургических предприятий конца XX и начала XXI в. будут в основном достоверные запасы или установленные доступные для отработки минеральные ресурсы, можно выяснить соответствующий порядок количеств производства и потребления элементов (см. таблицу, гр. 6). Полученные таким способом оценки потребления элементов учитывают возможности их сырьевой базы и выше по сравнению с обсуждавшимися (см. таблицу, гр. 5) — для ниобия, лития, редких земель, ванадия.

Таким образом, геохимические методы подтверждают самые оптимистические и, на первый взгляд, казалось бы, фантастические оценки перспектив использования редких элементов.

Потенциальные сырьевые возможности и будущее редких элементов

Наличие установленных А. Е. Ферсманом связей между кларками и производством, между геохимическим рассеянием и концентрированием элементов в рудах [5, 13, 20] позволяет подойти к вопросам сырьевой обеспеченности редкометального производства будущего с геохимических позиций.

А. Е. Ферсман [20, с. 313] писал: «Природа подсказывает, что культура и промышленность должны строиться на элементах, наиболее распространенных в земной коре». Первостепенное значение для оценки промышленной доступности элемента имеет также степень его концентрации в виде рудных скопле-

[1] С учетом использования вторичного сырья.

ний[1]. С точки зрения распространенности в земной коре наибольшие перспективы использования среди редких элементов имеют стронций, ванадий, редкие земли и цирконий (кларки $n \cdot 10^{-2}\%$, см. таблицу); эти элементы стоят на первом месте и по масштабам современного использования. За ними следуют литий, ниобий (кларк $n \cdot 10^{-3}\%$), бериллий, тантал ($n \cdot 10^{-4}\%$). Потребности в перечисленных элементах в 2000 г. и их сырьевые ресурсы также в какой-то степени согласуются с величинами их кларков (см. таблицу).

Для более надежного определения сырьевой обеспеченности, а следовательно, и общих перспектив использования ресурсов рассматриваемых элементов необходимо попытаться хотя бы ориентировочно определить численно, какие сырьевые ресурсы могут потребоваться для удовлетворения предполагаемых производств, а затем общие сырьевые возможности каждого из элементов.

Сырьевые потребности будущего определены нами геохимическим методом, исходя из прямой зависимости между природными ресурсами, производством и потреблением (коэффициенты пропорциональности $K_1 = 1 \cdot 10^2$, $K_2 = 1^2$ для максимума и минимума см. в таблице, гр. 8, 9).

Вопрос об общих сырьевых возможностях редких элементов также решался геохимическим методом с использованием зависимости между рассеянной (геохимические ресурсы — $Q_р$) и концентрированной (ресурсы в месторождениях — $P_к$) формами нахождения элементов в земной коре [6]. Коэффициент накопления $K_н = P_к/Q_р$ в среднем с учетом всех элементов принят равным $2{,}8 \cdot 10^{-7}$. Произведение $Q_р$ на $K_н$ определяет минимально возможные ресурсы элемента в рассматриваемом геологическом пространстве (в данном случае на территории капиталистических стран, см. таблицу, гр. 10).

По этим величинам можно составить представления о сырье и перспективах интересующих нас элементов.

Сопоставление ресурсов, необходимых для 2000 г., с уже установленными достоверными запасами показывает, каким является современный геологический задел (см. таблицу, гр. 11, 12). В самом неблагоприятном положении по этому показателю находится бериллий (требует увеличения запасов в 32 раза); большие геологические работы потребуются для увеличения сырьевых ресурсов тантала, ванадия, циркония, висмута, германия и кадмия.

Сопоставление максимальных оценок необходимых на 2000 г. сырьевых ресурсов с общими минеральными ресурсами, которыми располагают зарубежные страны, показывает, что наиболее сложно положение с обеспечением в будущем сырье-

[1] Перспективы добычи попутных элементов в основном зависят от тех ведущих металлов, вместе с которыми они участвуют в природных и обогатительных процессах.

[2] С учетом потерь при добыче.

выми ресурсами (из-за их общей ограниченности) кадмия, селена, висмута, теллура, ниобия и, вероятно, тантала. Наоборот, возможность расширения минерально-сырьевой базы германия, стронция, редких земель, ванадия, циркония, лития достаточно велика (см. таблицу, гр. 13).

Сказанное относительно сырьевой обеспеченности промышленности редких элементов основывается на подсчетах минеральных ресурсов в материковой части Земли. Как отмечалось, на ведущее место как источники лития уже вышли континентальные минерализованные воды и рапа. На очереди технологическое изучение редких элементов в нефтяных водах, в глубоководных сульфидоносных шламах, в железо-марганцевых океанических конкрециях, в морской воде Мирового океана. Количества лития, стронция, индия, селена, кадмия, германия, таллия и, возможно, других редких элементов в этих образованиях в тысячи раз превышают ресурсы суши [7]. Имеющиеся оценки минеральных ресурсов элементов ограничены еще и тем, что основаны на учете современных представлений о возможностях науки и техники. Как считал А. Е. Ферсман [20, с. 314], «власть кларков земли над промышленностью и ее путями есть власть прошлого, когда человек еще не овладел всеми явлениями природы. Овладев методами новых видов энергии, человек будет строить свое развитие на использовании тех первых атомов, которые будут покорны его методам разрушения, вероятно атомов нечетных, неустойчивых, разрушаемых (может быть, прежде всего лития, бериллия, бора)». Реальность этих предсказаний уже не вызывает сомнений. Однако теперь совершенно ясно — чтобы перейти к принципиально новой технологии обеспечения сырьевыми ресурсами, необходимо затратить на начальном этапе огромное количество лития, бериллия, циркония, редких земель, ниобия, ванадия, а возможно, и других редких элементов. Основы будущих промышленных технологий закладываются сегодня, и от того, насколько полно смогут быть использованы редкие элементы, зависит возможность ускоренного технического прогресса. Перед редкими элементами открыты перспективы самого широкого и всестороннего использования.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Беус А. А., Григорян С. В.* Геохимические методы поисков и разведки месторождений твердых полезных ископаемых. М.: Недра, 1975. 279 с.
2. *Виноградов А. П.* Роль наук о Земле в техническом прогрессе.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М.: Наука, 1975, с. 23—28.
3. *Власов К. А.* Основные генетические типы редкометальных месторождений и факторы их образования.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1957, № 12, с. 13—32.
4. *Власов К. А.* Проблема редких элементов и народное хозяйство.— Вестн. АН СССР, 1961, № 1, с. 10—18.
5. *Иванов В. В., Панфилов Р. В.* О геохимической корреляции минеральных ресурсов.— Докл. АН СССР, 1979, **249**, № 1, с. 193—196.
6. *Иванов В. В., Панфилов Р. В.* Принципы расчета перспективной потреб-

ности в минеральных ресурсах твердых полезных ископаемых.— Докл. АН СССР, 1980, 252, № 4, с. 934—937.
7. *Иванов В. В., Трохачев П. А.* К истории геологических исследований по созданию минерально-сырьевой базы редких элементов в СССР.— Редкие элементы. Сырье и экономика, 1968, № 1, с. 5—18.
8. *Коган Б. И.* Редкие металлы. Прошлое, настоящее, будущее. М.: Наука, 1978. 348 с.
9. *Коган Б. И.* Редкие металлы. М.: Наука, 1979. 555 с.
10. *Коган Б. И., Названова В. А.* Рост промышленного и комплексного использования минерализованных вод.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М.: Наука, 1975, с. 162—181.
11. *Крылов В. И.* Мировое потребление минерального сырья в период до 2000 г.— БИКИ, 1978, № 53, с. 5.
12. Месторождения литофильных редких элементов/Под ред. Л. Н. Овчинникова, Н. А. Солодова. М.: Недра, 1980. 559 с.
13. *Овчинников Л. Н.* Прогнозная оценка мировых запасов металлов в месторождениях суши.— Докл. АН СССР, 1971, 296, № 3, с. 683—687.
14. *Овчинников Л. Н., Солодов Н. А.* Формационно-парагенетическая классификация промышленных месторождений литофильных редких металлов.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М.: Наука, 1975, с. 71—109.
15. *Перельман А. И.* Геохимия техногенеза.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М.: Наука, 1975, с. 199—209.
16. Средние содержания элементов-примесей в минералах. М.: Недра, 1973. 208 с./В. В. Иванов, В. В. Белевитин, Л. Ф. Борисенко и др.
17. Типы месторождений редких элементов и их поисковые критерии/Под ред. А. И. Гинзбурга, Е. М. Эпштейна. М.: Госгеолтехиздат, 1961. 147 с.
18. *Ферсман А. Е.* Использование кадмия во время войны.— Природа, 1922, № 6/7, с. 92.
19. *Ферсман А. Е.* Комплексное использование ископаемого сырья. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. 20 с.
20. *Ферсман А. Е.* Геохимия. Л.: ГХТИ, 1933—1939. Т. 1. 1933. 328 с.; Т. 2. 1934. 354 с.; Т. 3. 1937. 50 с.; Т. 4. 1939. 355 с.
21. *Ферсман А. Е.* Пегматиты. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. 712 с.
22. *Ферсман А. Е.* Война и стратегическое сырье.— Новый мир, 1942, № 1/2, с. 179—205.
23. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 5. 858 с.
24. *Ферсман А. Е., Коган Б. И.* Минеральное сырье зарубежных стран. М.: Л.: Изд-во АН СССР, 1947. 566 с.
25. Химико-технический справочник/Под ред. А. Е. Ферсмана. Пг.: НХТИ, 1918. Ч. 1. 158 с.

УДК 553.042

Б. И. КОГАН

БУДУЩЕЕ РЕДКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

Редкие элементы пользовались особой любовью А. Е. Ферсмана. Он заинтересовался ими еще в годы первой мировой войны, но наиболее активные и широкие формы деятельность Александра Евгеньевича в данной области приобрела после Великой Октябрьской революции.

Всего А. Е. Ферсманом опубликовано 46 работ по редким элементам, кроме того, и в фундаментальных трудах «Пегматиты», «Геохимия», «Полезные ископаемые Кольского полуострова» и др. им также уделено много внимания. Александр Евгеньеви

был одним из организаторов первого Всесоюзного совещания по редким элементам, состоявшегося в 1925 г., его участником и основным докладчиком. Он руководил Полярными совещаниями в Кировске и заседаниями в Ленинграде и Москве Апатито-нефелинового бюро Наркомтяжпрома, на которых редкометальная тематика рассматривалась почти неизменно. Буквально в первые дни Великой Отечественной войны А. Е. Ферсман поднял вопрос о создании специальной комиссии по редким элементам [12], но поскольку эту идею не удалось реализовать, он работы по редким элементам широко поставил в Комиссии по геолого-географическому обслуживанию Красной Армии.

Академик Н. П. Сажин [30] указывал, что прозорливость и блестящая деятельность А. Е. Ферсмана относилась не только к геологии, минералогии и геохимии редких элементов, но и к их химии и технологии производства, что его идеи сыграли огромную роль в развитии нашей отечественной редкометальной промышленности.

Более подробно с деятельностью А. Е. Ферсмана в области редких элементов можно ознакомиться по опубликованным работам [12, 36, 37]. Здесь же полагаем необходимым специально выделить следующую его фразу: «Я хочу заострить проблему редких элементов и поставить ее как большую теоретическую, химическую и геохимическую задачу, как попытку проникнуть в потребности техники будущего...» [36, с. 5].

Чтобы понять гениальность и глубину этих мыслей, надо учесть, что они были сформулированы в 1929 г., когда проблема редких элементов во всем мире находилась еще в эмбриональном состоянии. За прошедшие с тех пор более чем 50 лет редкие элементы прочно вошли в современную технику, приобрели всеобщее признание, стали неотъемлемым фактором НТР, однако главные же и наиболее грандиозные перспективы — впереди. Рассмотрим их по отдельным редким элементам, а затем и в целом.

Литий издавна традиционно использовался в основном в силикатной (стекольной, керамической и огнеупорной) промышленности, производстве флюсов (для сварки алюминия), припоев, консистентных смазок и щелочных аккумуляторов, в системах кондиционирования воздуха. В 70-х годах новым наиболее крупным и с тех пор постоянным потребителем его стал электролиз алюминия. Сейчас в США, Японии и Западной Европе широко развернулось производство литиевых химических источников тока (ХИТ), обладающих исключительно высокими техническими характеристиками; они выпускаются уже в количестве десятков миллионов штук в год для военной техники, электронных часов, микрокалькуляторов, фотоаппаратов и на очереди производство средне- и крупногабаритных литиевых аккумуляторных батарей для транспорта и электростанций. Особое значение придается их применению в приборах радиосвязи, системах аварийного освещения, маяках и бакенах, а также в си-

стемах межконтинентальных баллистических ракет. В дальнейшем литиевые аккумуляторные батареи (АБ) имеется в виду использовать в электромобилях и на электростанциях для аккумулирования электроэнергии в целях выравнивания пиковых нагрузок. Новые исследования и разработки по литиевым АБ ведутся в колоссальных масштабах. Министерство энергетики США выделило фирме «General Electric» 17 млн. долл. на создание литиевых топливных элементов, которые должны комбинироваться с установками по газификации угля и обеспечить степень преобразования энергии до 50% против 30—35% на обычных угольных электростанциях.

Трудно переоценить последние достижения советских и зарубежных исследований по сверхлегким алюминиевым и магниевым сплавам с литием, исключительно важным в качестве конструкционных материалов [14, 39]. В частности, создан Al-Li сплав, удельный вес которого по сравнению с обычными алюминиевыми сплавами на 10—15% меньше, а модуль упругости на 10—20% выше. Высокой прочностью и небольшим удельным весом отличается Al-Li-Mg сплав и еще более высокими показателями — Al-Li-Cu-Mg сплав [53].

В перспективе вполне вероятно использование лития в новом классе гомогенных металлокомплексных катализаторов [19].

В США бьют тревогу по поводу возможной нехватки лития в будущем. В связи с этим пересматриваются его сырьевые источники, изучаются новые виды сырья, в частности поставлены опыты по извлечению лития из монтмориллонитов [44]. Очень крупными ресурсами лития обладают салары Чили и Боливии, литийсодержащие салары обнаружены и в Аргентине. Усилилось изучение литийсодержащих пегматитов Йеллоунайфа в Канаде (Северо-Западные Территории). Израиль приступил к технологическим исследованиям по извлечению лития из рапы Мертвого моря [45], а Япония — к извлечению его из морской воды [13, 14].

В последнее время литиевая промышленность за рубежом значительно расширилась, и суммарная добыча лития во всех видах сырья к 1980 г. достигла 6380 т в расчете на металл по сравнению с 3550 т в 1960 г. Кроме того, начата подготовка к освоению саларов Чили, а в Канаде намечается строительство литиевого завода в Берник-Лейк.

Впервые в конце 70-х годов в США проведены специальные конференции, посвященные анализу сырьевых ресурсов и перспектив потребления лития, одна из них — по алюминий-литиевым сплавам.

На 2000 г. потребности зарубежных стран в литии (в расчете на металл) только для химических источников тока оцениваются в пределах от 36 до 120 тыс. т. В США потребление лития в 1980 г. равнялось 2,9 тыс. т, в 2000 г. предполагается рост его минимум в 10, но наиболее вероятно в 17 раз — до 30—50 тыс. т. В XXI в. литий наряду с дейтерием станет основным горючим

для термоядерных электростанций. Если же он будет использован на этих станциях и в качестве теплоносителя (теоретически литий идеален для этой цели), то потребности возрастут до 1 млн. т/год и более [32, 50].

Рубидий и цезий давно используются в производстве фотоэлементов и фотоумножителей, телевизионных передающих электронно-лучевых трубок, эдектронно-оптических преобразователей, находящих применение в разнообразных сферах, включая авиаракетно-космическую технику. Количество таких приборов исчисляется миллионами, но поскольку они чрезвычайно миниатюрны, потребность в цезии и рубидии очень незначительна и для данной цели почти не растет.

В последние годы появился спрос на цезий и рубидий в производстве волоконной оптики (для медицины, средств связи, фото- и киноаппаратуры), катализаторов (для синтеза смол), устройств ИК-излучения. Реальным результатом этого явилось значительное расширение производства обоих металлов в Японии. Гораздо более многообещающи активно развернувшиеся работы по новым классам твердых электролитов высокой энергоемкости [7]. На их основе с использованием соединений рубидия создаются оригинальные источники тока, надежно работающие в широком диапазоне температур и длительно сохраняющие энергетические характеристики. Они особенно перспективны в качестве малогабаритных источников питания для изделий массового применения.

Впереди — применение цезия, возможно, рубидия или того и другого совместно в магнитогидродинамических электростанциях. Строительство первых промышленных МГД-электростанций предполагается в 90-х годах. В США недостаточная обеспеченность собственными сырьевыми ресурсами цезия рассматривается как важная проблема национального значения [15].

Бериллий до сих пор является преимущественно компонентом бронз, обладающих специфическими свойствами и очень важных для многих отраслей техники. Хорошо зарекомендовала себя высокоогнеупорная керамика из BeO, находящая расширяющееся применение в электронике. Известны и другие сферы использования бериллиевых материалов, включая атомную и авиакосмическую технику, силикатную промышленность [16].

И все же в течение многих десятилетий масштабы бериллиевой промышленности остаются небольшими: за рубежом добыча бериллия не превышала нескольких сот тонн в год, в 70-х годах она даже сильно сократилась и лишь в самые последние годы возросла до прежнего уровня — около 300 т по содержанию металла во всех продуктах в год. Вызвано это сейчас, в частности, осуществлением в США военных программ «Трайдент» и МХ, ростом спроса в электронной технике и увеличением производства бериллиевых гироскопов для инерциальных систем наведения в гражданском воздушном флоте [46].

Бериллий как металл обладает замечательными свойствами. Особенно заманчивым уже давно представлялось освоение бериллия и его сплавов в качестве конструкционных материалов для авиакосмической техники, но серьезно препятствовала этому высокая хрупкость металла. Однако недавно в СССР разработан и успешно освоен способ получения бериллия высокой чистоты с ультрамелкозернистой структурой, пластичного при комнатной и сверхпластичного при высокой температуре. Это открыло возможность получения из него тончайшей фольги, проволоки и элементов конструкций [23]. Вторая «ахиллесова пята» бериллия — его чрезвычайная токсичность, но и это препятствие преодолимо.

Считается, что в 90-х годах будут разработаны достаточно дешевые и эффективные способы получения бериллия и что это обеспечит условия для его внедрения в самолетостроение. Значительно расширится изготовление и применение деталей из бериллий-никелевых сплавов, ожидается разработка новых высокопрочных бронз с бериллием, и на ближайшие 20 лет сплав меди с 1,9% Be и 0,25% Co останется наиболее прочным из сплавов на медной основе [42].

В дальней перспективе предполагается значительный рост спроса на бериллий для микропроцессоров и электронных измерительных приборов [46]. В термоядерной энергетике соединениям бериллия, лития и фтора предстоит роль воспроизводителей трития и размножителей нейтронов. Гипотетически суммарная потребность в бериллии для этой цели в начале XXI столетия определяется огромной цифрой в 50—100 тыс. т.

Стронций в течение ряда десятилетий применялся главным образом в пиротехнике. Начавшееся недавно использование его в стеклах для кинескопов цветных телевизоров ознаменовало новый этап в промышленной истории этого металла и вызвало в 70-х годах увеличение спроса на него в 3—4 раза. Наряду с этим стало расширяться применение солей стронция в смазках и постоянных магнитах, в черной металлургии. Разработан и освоен алюминиевый сплав со стронцием как заменитель стали в колесах автобусов и грузовиков, предполагается его использование в силуминах и для других целей [56]. Не исключено применение в будущем стронциевых ферритов в электромобилях и железнодорожном транспорте на магнитной подвеске.

С конца 60-х годов широко развернулось производство композиционных магнитотвердых материалов (КМТМ), представляющих собой, как правило, двухфазную композицию, в которой непрерывной фазой — матрицей служит связка, а дисперсной — дискретные частицы магнитного наполнителя. В частности, для данной цели применяются порошки феррита стронция. Магниты на КМТМ нашли применение в электро- и микроэлектродвигателях, телевизионной, акустической аппаратуре и предметах быта.

Второе «промышленное рождение» стронция сопровождается ростом научного интереса к нему и созданием заделов в области

прикладного применения. Это неминуемо должно привести к возникновению дополнительных сфер его использования.

Неуклонное развитие цветного телевидения, других новых и традиционных отраслей потребления обеспечит гарантированный рост спроса на стронций. В расчете на металл он увеличится только в США с 18 тыс. т в 1980 г. до 35—40 тыс. т в 2000 г. Доказанные запасы стронция за рубежом определяются примерно в 13 млн. т, но его перспективные ресурсы намного больше. В частности, в рапе Мертвого моря они составляют, вероятно, 45—50 млн. т. В Мировом океане содержится 12 000 млрд. т стронция.

Скандий пока не приобрел еще заметного промышленного значения, но сдвиги в этом направлении уже намечаются. Он оказался очень эффективным компонентом люминофоров для металлогалогенных ламп. Ведутся исследования по введению его в легкие сплавы. В СССР доказано, что для Mg-Sc сплавов характерны широкие области твердых растворов, представляющих практический интерес, и что их использование в небольших плавках вполне реально [9]. Еще более актуальны результаты исследований по Al-Sc сплавам для будущих термоядерных электростанций [3]. Облучение не оказывало влияния на пластичность Al-Mg-Sc сплавов при всех температурах испытания, и эта композиция рассматривается как перспективная для применения в условиях радиации, в частности в качестве материала первой стенки термоядерных реакторов [24].

Редкоземельные металлы эффективно используются в разнообразных сферах производства, но преимущественно в черной металлургии и в крекинге нефти. Практически сейчас десятки миллионов тонн стали в год легируются и модифицируются добавками РЗМ, причем объемы эти продолжают неуклонно возрастать. Вместе с тем исследования по применению РЗМ в металлургии чугуна, стали и специальных сплавов продолжаются в колоссальных масштабах. В частности, например, установлено, что комплексные Mg-Ca-Ba-Si-Fe-TR модификаторы универсальны по модифицирующему и рафинирующему влиянию на железо-углеродистые сплавы; они рекомендованы для массового изготовления и применения в различных производственных условиях для получения высокопрочного чугуна [2]. Только в США внедрение РЗ-цеолитов в промышленность каталитического крекинга газойлей дало экономию в 250 млн. долл. в год и способствовало значительному уменьшению расхода сырой нефти.

В силикатной промышленности РЗ-соединения служат для полировки стекла, варки оптических и других специальных стекол (в том числе для фотообъективов), глушения глазурей и эмалей, получения светопрозрачной керамики, высокоогнеупорных материалов и керметов. Проведенные в СССР физико-химические исследования систем, включающих оксиды редких элементов, в том числе РЗМ, открыли новые возможности исполь-

зования оксидных соединений и их твердых растворов — в МГД-генераторах, лазерах и др. [41]. Твердотельные лазеры на неодимовом стекле и РЗ-содержащих гранатах применяются в разных отраслях промышленности, военной технике и медицине. Исключительно эффективным оказалось лечение неодимовым лазером кровотечений [17].

Атомная техника использует РЗМ в качестве поглотителей тепловых нейтронов, светотехника — в углях накаливания для прожекторов, маяков, кинопроекционной и телевизионной аппаратуры, терапевтических ламп. Выдающимся событием явилось создание на основе РЗМ «красных» люминофоров с высокой яркостью свечения, которые открыли новую эру в цветном телевидении.

Количество печатных научных работ по РЗМ, учтенных реферативным журналом «Chemical Abstracts», возросло с 4723 в 1961 г. до 10 884 в 1970 г. и 21 894 в 1979 г. Этот факт свидетельствует об огромных научных заделах, которые не могут не дать практических результатов. Спрос на РЗМ увеличится в США с 14,5 тыс. т в 1980 г. до 38 тыс. т в 2000 г., в целом в несоциалистической части мира — с 21,5 до 70 тыс. т.

Наметившаяся в последние годы тенденция использовать РЗМ не только в общей смеси, но индивидуально каждый из них (или в разных — двойных, тройных и более комбинациях) на основе присущих им специфических свойств — одно из самых достопримечательных и актуальных событий в мировой минеральной промышленности. Реально вошли в производственную практику самостоятельно лантан, церий, неодим, иттрий, европий, самарий, гадолиний. В США, например, намечено дополнительно затратить 15 млн. долл. на очередное расширение редкоземельного комбината «Маунтин-Пасс», включая увеличение выпуска самария и гадолиния. Выпуск индивидуальных РЗ-продуктов интенсивно расширяется во Франции.

Создание соединений самария и других РЗМ с кобальтом означает технический переворот в производстве магнитных материалов, они, в частности, очень важны для моторов и в будущем — для вагонов на магнитной подвеске. Использование постоянных магнитов из сплавов кобальта с самарием и частично других РЗМ способствует уменьшению габаритов двигателей, их веса, увеличению мощности, повышению компактности электронных устройств, уменьшению размеров магнитных приводов и муфт при одновременном улучшении их свойств.

Индивидуализация — магистральный путь наиболее совершенного использования всех РЗМ. Эта задача, несомненно, будет в основном решена в нашем столетии, и значение данного события трудно переоценить.

Добыча **циркония** растет из года в год и только за рубежом достигла в 1980 г. 300 тыс. т (около 650 тыс. т концентратов), намного превысив соответствующие показатели по вольфраму, молибдену, олову, сурьме. Обусловлено это высокой эффектив-

ностью применения цирконовых и циркониевых огнеупоров, цирконовых формовочных песков в черной металлургии и других отраслях промышленности. Растет потребление указанных продуктов в США, Японии и странах Западной Европы. Недавно разработанная керамика цирконата-титаната свинца, легированная лантаном, получила широкое признание и распространение. Она является одним из перспективных материалов оптоэлектроники [35]. Увеличивается и будет непрерывно увеличиваться использование металлического циркония и его сплавов в атомной энергетике и машиностроении.

В целом в 2000 г. спрос на цирконий (в расчете на металл по содержанию в сырье) возрастет за рубежом до 600 тыс. т, в том числе в США с 80 до 180 тыс. т.

Гафний используется преимущественно в стержнях регулирования ядерных установок подводных лодок, находит он применение также в производстве фотовспышек, специальных сплавов, сверхтвердых материалов для легирования стали. В принципе сдерживающим фактором его использования является сырьевая ограниченность (гафний пока извлекается в небольших количествах только попутно при производстве циркония ядерного назначения). Однако сейчас происходит освоение новых способов отделения гафния от циркония всех сортов. Это позволит значительно увеличить количество извлекаемого из цирконов гафния. Наиболее перспективные будущие сферы его использования — производство сверхтвердых соединений и сверхжаропрочных сплавов для аэрокосмической техники. Можно считать, что потребление гафния в США в 2000 г. достигнет 150—200 т против 40 т в 1980 г.

Промышленность **ванадия** стала быстро развиваться в последние годы благодаря расширяющемуся использованию его в сталях для нефте- и газопроводных труб большого диаметра и строительных конструкций. Освоено и расширяется его применение в сталях для быстрорежущих инструментов, автомобилестроения, железнодорожных рельсов и вагонов. Высокопрочные низколегированные стали в СССР применены, в частности, в таких уникальных сооружениях, как башня Киевского телецентра высотой 315 м, каркас высотной гостиницы в Киеве, уникальная доменная печь № 9 объемом 5000 м³ Криворожского металлургического завода [40]. Актуальна возможность замены в ряде сталей ванадием молибдена. В 1980 г. в Японии, США и странах Западной Европы намечалось использование ванадия вместо золота и серебра в электронной технике [48].

Ванадий — главный легирующий компонент титановых сплавов. Титан-ванадиевые сплавы используются в авиационной технике, в дальнейшем намечается еще более широкое применение их в самолето-, вертолето- и ракетостроении [51].

По темпам потребления ванадия в черной металлургии США отстают от стран Западной Европы и Японии, отчасти это объясняется наличием в США больших ресурсов молибдена. По про-

гнозным оценкам, спрос на ванадий в США возрастет с 5,8 тыс. т в 1980 г. до 30 тыс. т в 2000 г.

Внедрение металлического ванадия и сплавов на его основе находится пока в начальной стадии, но перспективы этих материалов, в частности в будущей термоядерной энергетике, огромные.

Ниобий приобрел возрастающее значение в связи с созданием и широким внедрением сталей для нефте- и газопроводных труб большого диаметра, рассчитанных, в частности, на тяжелые и сложные условия Крайнего Севера, мостов, строительных конструкций, средств железнодорожного транспорта, в машино- и автомобилестроении. При этом достигаются уменьшение веса металлоконструкций и машин, повышение их долговечности и экономия металла. Ведется интенсивная разработка новых марок сталей и сплавов с добавками ниобия, в частности это относится к высокотемпературным материалам на Fe-Ni-Cr и Ni-Cr основах с содержанием 1,0—3,6% Nb для газификации угля [18]. Для акустоэлектроники очень важное значение имеют пьезоэлектрики из $LiNbO_3$ [31]. Освоено производство сверхтвердых сплавов с карбидом ниобия.

Однако главное в будущем ниобия — это сплавы для авиаракетно-космической и сверхпроводниковой техники. Насчитываются уже десятки разнообразных сверхжаропрочных сплавов на основе ниобия и других тугоплавких металлов с его участием, и разработка их интенсивно продолжается. Соединения ниобия — наиболее признанные сверхпроводниковые материалы, и диапазоны их применения грандиозны (МГД-генераторы, управляемый термоядерный синтез, высоковольтные линии электропередач и т. д.). В США фирма «General Electric» разрабатывала электрогенератор на сверхпроводниках (запрессованных в медной основе волокнах из Ti-Nb сплава) расчетной мощностью 18 МВт, достаточной для электроснабжения города с населением 20 тыс. человек, по мощности он эквивалентен обычным электрогенераторам вдвое большего размера [47].

В 1980 г. изготовлен листовой сверхпроводящий материал, который можно применять при более высоких температуре и плотности тока, чем все предыдущие сверхпроводники [55].

По сравнению с 1950 г. добыча ниобия (в расчете на металл) за рубежом возросла в 1980 г. в 20,5 раза (с 710 до 14,5 тыс. т), а потребление — в 22 раза (соответственно с 500 до 11 тыс. т). Добыча ниобия и производство феррониобия интенсивно растут. В Бразилии только на одном комбинате в Араша намечено довести производство Nb_2O_5 до 45 тыс. т/год.

Спрос на ниобий (в расчете на металл во всех продуктах) в США в 2000 г. оценивается в 12 тыс. т, в целом же за рубежом — в 29 тыс. т (рост по сравнению с 11 тыс. т в 1980 г. на 260%). Потребности в ниобии для термоядерной энергетики США в 2010—2030 гг. оцениваются гипотетически в 800—3300 тыс. т, в среднем в 2 млн. т.

Тантал по техническим свойствам — замечательный металл, но сырьевые ресурсы его ограниченны. Нехватка сырья при непрерывном увеличении спроса привела к небывалому росту цен на танталитовые концентраты в 1980—1981 гг. В свою очередь, это обусловило широкое освоение отвальных шлаков оловоплавильных заводов (в том числе накопившихся за прежние столетия) и открытие новых месторождений в Австралии и Канаде, но все же природный дефицит танталового сырья еще сохраняется. Производство танталовых электролитических конденсаторов в США, Японии и странах Западной Европы достигло 2,5 млрд. штук в год и продолжает расти. Очень эффективным оказалось использование карбида тантала в сверхтвердых сплавах, но ему подыскиваются заменители. Силицид тантала успешно заменяет молибден в электронике. Сохраняют важное значение сверхжаропрочные танталовые сплавы и сплавы с танталом в авиаракетно-космической технике.

В 1980 г. потребление тантала за рубежом в расчете на металл равнялось 1,2 тыс. т и увеличилось против 1975 г. (470 т) в 2,6 раза, в США оно составило около 800 т. Прогноз потребления на 2000 г. в США определяется в 2 тыс. т, а в целом в несоциалистических странах — в 3,2 тыс. т (увеличение против 1980 г. в 2,7 раза).

Элементы-спутники, к которым относятся, в частности, кадмий, германий, селен, теллур, индий и галлий, в основном используются в электронной технике. Новые формы и виды возможного применения их полупроводниковых соединений весьма многочисленны. Например, недавно выявлена большая перспективность материалов на основе гетеропереходов $InAs_{1-x}Sb_x$, способных реально улучшить широкий круг известных электронных приборов и создать совершенно новые типы полупроводниковых устройств [1]. Быстро создается новый класс полупроводниковых соединений селена и теллура — халькогенидных стеклообразных веществ, положивших начало применению аморфных структур в электронном приборостроении. Приборы на аморфных полупроводниках более дешевы [10]. Поставлен вопрос о внедрении полупроводниковых соединений галлия в производство интегральных схем на основе GaAs, и предполагается, что к 1990 г. соответствующие приборы будут выпускаться на сумму в 1,5 млрд. долл. Особенно заманчивыми считаются ультрабыстродействующие интегральные схемы на основе GaAs [27].

Количество реферированных в «Chemical Abstracts» научных публикаций по галлию возросло с 664 в 1961 г. до 2990 в 1971 г. и 5767 в 1979 г.

Считается, что мировой капиталистический рынок радиоэлектронной продукции (РЭП) увеличится с 370 млрд. долл. в 1981 г. до 850 млрд. долл. в 1991 г. При этом среднегодовой темп прироста реализации РЭП составит 8,5% [20].

Новым потребителем элементов-спутников стала волоконная оптика, предвещающая техническую революцию в средствах

связи. Намечается разнообразное их использование в излучателях, приемниках и стеклянных волоконных световодах, разработка которых в 70-х годах ознаменовалась фантастическими успехами [8]. Реальным стало применение в волноводах легированного германием кремния, параллельно ведутся работы по волноводам из окиси германия, соединений галлия, таллия. Только германия намечается использовать за рубежом в оптических волокнах в 1984 г. 18 т против 5 т в 1980 г.

По заявлению академика М. А. Прохорова, волоконно-оптическая кабельная связь коренным образом преобразует технику связи и развивается быстрыми темпами во многих странах: «Волоконно-оптические линии связи обладают малым затуханием, большой пропускной способностью, невосприимчивостью к помехам, скрытностью и, наконец, дают значительную экономию меди...» [26, с. 51].

Укажем еще, что расширяется производство никель-кадмиевых батарей, общий выпуск их исчисляется сотнями миллионов штук в год [34]. Изучается возможность применения широкой гаммы припоев и флюсов с содержанием кадмия и индия для пайки в парогенераторах энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах [6]. Возобновились интенсивные исследования гетеропереходов $Cu_{2-x}S$—CdS в связи с возможностями улучшения деградации и создания на их основе наиболее экономичных и относительно эффективных фотопреобразователей [28].

Быстро растет применение германия в зарубежной ИК-технике (приборы ночного видения), в 1984 г. намечено довести его до 75 т против 38 т в 1980 г. Вообще же ИК-техника зиждется на соединениях кадмия и теллура, и их использование также будет расти.

Широкие перспективы открываются перед кадмием, селеном, теллуром, индием, галлием и отчасти висмутом и таллием в связи с проблемой создания солнечной энергетики, в том числе солнечных космических электростанций. Работы по этой тематике развернулись исключительно широко и интенсивно, испытываются самые разнообразные материалы, но в ряде случаев уже сейчас отмечаются преимущества или реальные возможности применения указанных редких элементов.

Рений превосходно зарекомендовал себя в производстве термопар, электроконтактов и других ответственных деталей в электротехнических и электронных приборах и приобрел широкую известность с началом эффективного использования Pt-Re катализаторов в крекинге нефти. Несмотря на эти успехи, а также выявление «рениевого эффекта», оказавшегося очень важным для улучшения свойств молибденовых сплавов, масштабы промышленного производства рения все еще остаются ограниченными. В будущем возможно создание на его основе других катализаторов и деталей для приборов, но особенно результативной может быть разработка специальных рениевых сплавов [5].

Сырье для тех или иных элементов-спутников в ближайшее

время может стать дефицитным. Это относится не только к ре-нию. В США прекращены некоторые перспективные исследования по кадмию, поскольку считается, что его не хватит для обеспечения потенциальных потребностей. В американских публикациях подчеркивается также предстоящая дефицитность селена, теллура, индия и галлия при учете новых идей практического их использования в будущем.

Переходим к общим положениям. В табл. 1 показан вероятный рост потребностей в редких элементах к 2000 г. по сравнению с 1980 г. на примере США. Эти прогнозные данные не могут, естественно, считаться незыблемыми, но они в достаточной степени обоснованы и свидетельствуют о том, что в предстоящие 20 лет спрос на редкие элементы будет расти быстрыми и внушительными темпами.

Несмотря на экономические спады и кризисы капиталистической экономики, зарубежная редкометальная промышленность в последнее время переживает стадию активного подъема. Открыты и осваиваются новые месторождения редкометального сырья, расширяются, реконструируются и модернизируются действующие предприятия, проектируются и строятся новые рудни-

Таблица 1

Вероятный рост потребностей США в редких элементах (в т) в 2000 г.

Элементы*	1980 г.	2000 г. **	Рост потребности, %
Литий	2 180	30 000—40 000	1376—1835
Цезий	9	250	2780
Бериллий	270	400—600	148—222
Стронций	18 000	35 000—40 000	194—222
Редкоземельные	14 500	38 000	262
Цирконий	80 000	180 000	225
Гафний	41	150	366
Ванадий	5 800	30 000	517
Ниобий	3 000	12 000	400
Тантал	780	2 000	256
Кадмий	5 100	10 000—15 000	196—294
Висмут	1 150	2 000	174
Германий	24	150	625
Селен	375	1 500—2 500	400—667
Теллур	113	400—1600	354—1416
Индий	20	400—1000	2000—5000
Галлий	9,5	500—1000	526—1053

* По содержанию во всех продуктах.

** В этих прогнозах использованы материалы Горного бюро США [54], но со значительными нашими коррективами, в частности, по кадмию, германию, селену, теллуру, индию и галлию цифры даны по новейшим публикациям, которые Горным бюро не учитывались [14,42].

ки, обогатительные фабрики и перерабатывающие заводы, создаются научные и промышленные заделы на ближайшее будущее, изыскиваются дополнительные сферы применения редких металлов и продолжается их внедрение.

Ушла в прошлое абсолютная монополия США в проблеме редких элементов во всех ее аспектах. Больших успехов в их потреблении и производстве достигла Япония. Западноевропейские страны также расширяют редкоэлементную промышленность, в частности активную деятельность проявляют в этой области Франция и ФРГ. Из развивающихся стран Индия, Бразилия и Аргентина становятся не только поставщиками редкометального сырья, но и производителями редких металлов.

КНР расширяет вывоз редких элементов и намерена использовать их как средство оплаты при торговых операциях, в перечень экспортируемых ею материалов вошли редкие земли, ванадиевые продукты, танталовое и бериллиевое сырье, германий, селен, индий, и при этом намечено значительно расширить редкоземельное производство и добычу танталитов.

Редкие элементы, подобно урану, алюминию и титану, стали как бы символом века, барометром научно-технического прогресса. Продолжается ураганный рост научных публикаций по редким элементам (табл. 2, фиг. 1). Это — феномен нашего времени, свидетельствующий о неисчерпаемых возможностях вскрытия и использования уникальных свойств редких элементов и их соединений. Такие массовые научные заделы не могут не привести к результатам прикладного характера, бурному их прогрессу.

В капиталистических странах особенно активно происходит внедрение редких элементов в военную технику. Очередная волна их военного использования — результат гонки вооружений, форсированного производства ядерного и нейтронного оружия, ракет МХ, подводных лодок «Трайдент», бомбардировщиков В-1, инфракрасных приборов, радиобиологических и других новых средств уничтожения. О возрастающей военной роли редких элементов можно судить, в частности, по тому, что в последнее время резко увеличены чрезвычайные стратегические федеральные резервы США по бериллию, ванадию, ниобию, танталу, кадмию и висмуту (фиг. 2). К созданию правительственных запасов редких элементов приступили также Великобритания, Франция, ФРГ и Япония. В частности, в Японии для нужд авиационной и атомно-энергетической промышленности предусматривается накопление лития, стронция, редких земель, циркония, ванадия, тантала, германия. Вместе с тем расширяется и обычное промышленное использование редких элементов.

Будущее редких элементов определяется предстоящим интенсивным развитием наиболее передовых и нарождающихся отраслей производства и техники. Особенную роль в будущем редких элементов должна сыграть «большая энергетика», включающая атомные, термоядерные, магнитогидродинамические и сол-

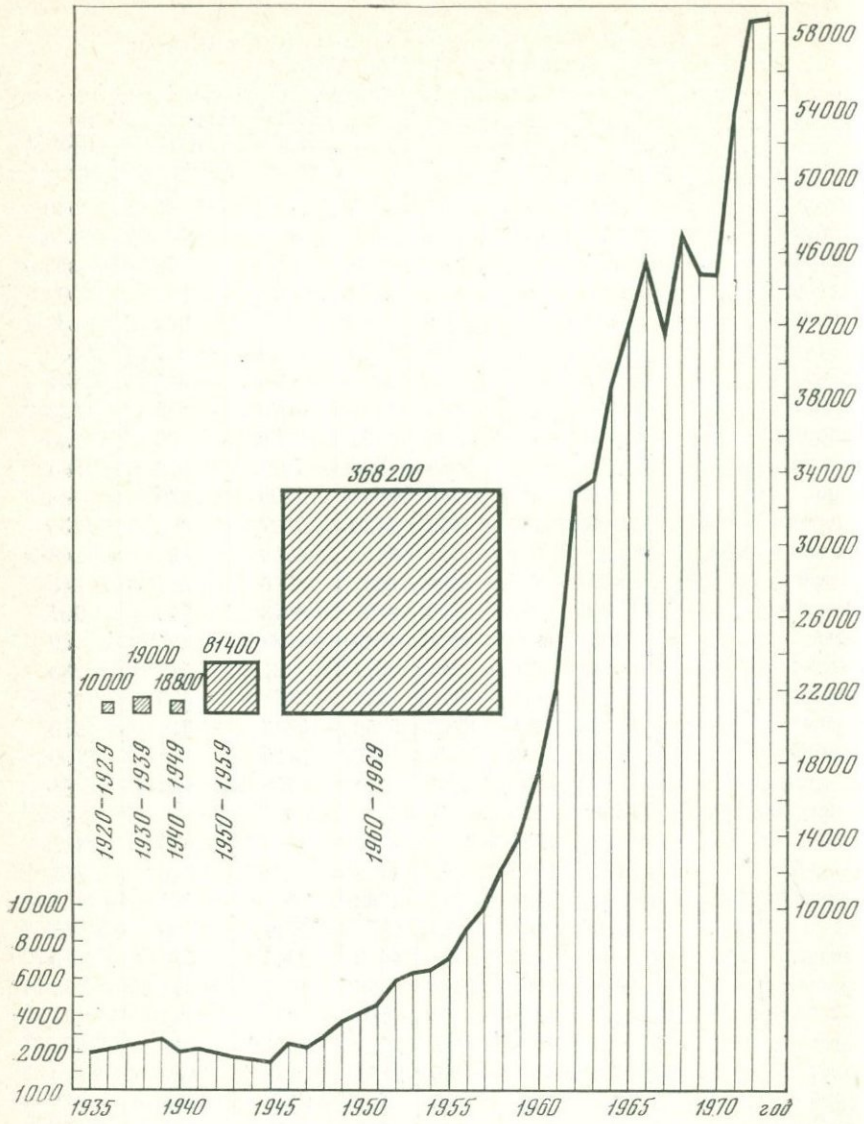
Таблица 2

Рост числа печатных научных работ по редким элементам, учтенных РЖ «Chemical Abstracts»

Элементы	1950 г.	1961 г. *	1970 г.	1979 г.	$\frac{1979}{1950}$, %	$\frac{1979}{1961}$, %	$\frac{1979}{1970}$, %
Бериллий	305	952	1340	1739	570	183	130
Ванадий	225	1287	3083	7093	3152	551	230
Висмут	252	1018	1700	3633	1045	259	155
Гадолиний	26	260	820	1657	6373	638	202
Галлий	122	664	2420	5767	4727	869	238
Гафний	42	293	581	1075	2560	367	185
Германий	97	1188	2664	4099	4226	345	154
Гольмий	11	144	341	771	7009	535	226
Диспрозий	16	186	525	1153	7206	620	220
Европий	27	215	918	1964	7074	913	214
Индий	86	842	1715	3534	4109	420	206
Иттербий	15	175	436	1129	7527	645	259
Иттрий	39	547	747	1852	4749	339	248
Кадмий	459	1817	3264	6957	1516	383	213
Лантан	79	445	810	2404	3043	540	297
Литий	435	1932	3004	5690	1308	295	189
Лютеций	14	110	252	577	4121	525	229
Неодим	61	254	871	1486	2436	585	171
Ниобий	90	964	2260	5259	5843	546	233
Празеодим	53	223	572	1084	2045	486	190
Прометий	16	63	128	120	750	190	93
Редкие земли **	66	515	877	?	?	?	?
Рений	40	257	937	1760	4400	685	188
Рубидий	135	565	773	1788	1324	316	231
Самарий	61	267	731	1562	2561	585	214
Селен	166	663	1383	2851	1717	430	206
Скандий	44	175	535	1010	2295	577	189
Стронций	195	1117	1382	2373	1217	212	172
Таллий	220	665	1080	1480	673	223	137
Тантал	115	743	1292	2592	2254	349	201
Теллур	56	460	1085	2157	3852	469	199
Тербий	11	138	389	939	8536	680	241
Туллий	13	128	279	553	4254	432	198
Цезий	122	832	1388	2447	2006	294	176
Церий	150	687	1070	2457	1638	358	230
Цирконий	277	1918	2556	4993	1803	260	195
Эрбий	18	191	543	1175	6528	615	216
Всего	4160	22 900	44 750	88 180	2120	385	197

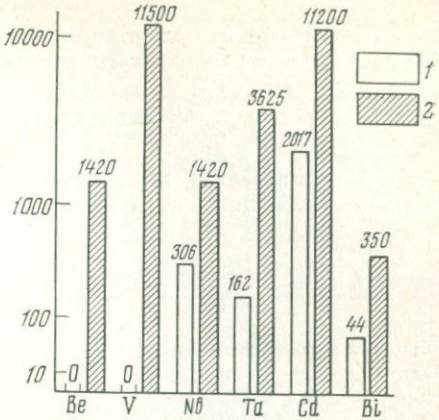
* За 1960 г. сведения неполные, поэтому здесь приведены данные за 1961 г.

** Редкоземельные элементы в целом, без подразделения.



Фиг. 1. Динамика научных публикаций суммарно по всем редким элементам, учтенных в «Chemical Abstracts».

нечные электростанции, газификацию угля, водородные энергоносители, химические источники тока, аккумулирование энергии. Редким элементам предстоит здесь роль горючего, жаропрочных и сверхжаропрочных материалов, тугоплавких и сверхтугоплавких соединений, теплоносителей, сверхпроводников и т. д. В табл. 3, 4 показаны направления и возможные масштабы при-



Фиг. 2. Увеличение правительственных лимитов по хранению некоторых редкометальных продуктов в стратегических резервах США (в т по содержанию металлов)

1 — на 30 июня 1976 г.; *2* — на 1 января 1980 г.

менения редких элементов только в термоядерной энергетике США в начале XXI столетия. Из данных табл. 4 следует, что для этой цели потребуются 5 млн. т редких металлов на сумму порядка 200 млрд. долл. (по современным ценам). Эти расчеты, конечно, сугубо предположительные, но порядок цифр все же показателен.

Экономический, оборонный и интеллектуальный потенциал страны в значительной мере определяется сейчас состоянием ее

Таблица 3

Перечень материалов, которые предполагается использовать в бланкете термоядерных электростанций США [30,46]

Назначение	Материал
Воспроизведение трития	Жидкий литий
	Расплавы солей (Li_2BeF_4, LiF)
	Керамика Li_2O, Li_2O_2
	Соединения LiAl, $LiAlO_2$
Конструкционные материалы	Жаропрочные сплавы Nb—1% Zr, V—20% Ti и на основе Mo
	Сплавы железа *
	Никелевые сплавы *
	Материалы на основе алюминия
	Материалы на основе углерода
Теплоносители	Жидкие Li и K
	Расплавы солей **
	Гелий
Замедлители нейтронов	Воспроизводящие материалы
	Графит
Размножение нейтронов	Бериллий

* Вполне вероятно участие редких металлов в легировании этих сплавов.

** Рассматривались смеси из расплавов солей LiF и BeF_2.

Таблица 4

Необходимые валовые затраты для термоядерной энергетики США в начале XXI в. в расчете на установленную электрическую мощность в 1000 ГВт

Материалы	Общая потребность, т			Цена за 1 т. долл.**	Полная стоимость, млрд. долл.
	по Д. Л. Кульцинскому [46]*	по Стайнеру [30]	в среднем		
Нередкие					
Алюминий	600 000	1 000 000—2 600000	1 500 000	1 200	1,8
Бор	800 000	. . .	800 000		8,0
Графит	2 000 000	. . .	2 000 000		...
Хром	2 000 000	. . .	2 000 000	3 000	6,0
Медь	2 000 000	3 200 000—8 600000	5 000 000	1 300	6,5
Фтор	1 000 000	. . .	1 000 000	150	0,15
Сталь	13 000 000	. . .	13 000 000	150	2,0
Гелий	300 000	40 000—1 100 000	500 000	...	...
Калий	20 000	. . .	20 000	...	...
Марганец	200 000	. . .	200 000	1 320	0,25
Молибден	200 000	2 800 000	1 500 000	16 000	24,0
Никель	1 600 000	. . .	1 600 000	4 400	7,0
Свинец	12 000 000	11 000 000	11 500 000	600	7,2
Олово	200 000	300 000	250 000	13 000	3,3
Титан	900 000	500 000	700 000	2 000	1,4
Итого 3*			42 000 000		80,0
Редкие					
Литий	1 000 000	950 000—1 500 000	1 200 000	29 000	35,0
Бериллий	100 000	46 000	75 000	132 000	10,0
Ниобий	800 000	3 300 000	2 000 000	50 000[4*]	100,0
Ванадий 5*	500 000	2 400 000	1 500 000	30 000[4*]	45,0
Другие 6*					10,0
Итого			5 000 000		200,0
Всего			47 000		280,0

* В расчете на $1063 \cdot 10^6$ МВт. ** В США по данным 1975—1976 гг. 3* Включая графит, гелий, калий и др. на сумму в 12,4 млрд. долл. 4* В работе [32] цены на ниобий и ванадий ошибочно приняты соответственно в 3630 и 9614 долл./т. 5* Для частичной замены ниобия. 6* В частности, галлий и германий.

Примечание. Некоторые цифры, особенно итоговые, округлены.

энергетики, металлургии, электроники, вычислительной техники. Но ни одна из этих и других ключевых отраслей хозяйства не может уже функционировать без редких элементов. А завтра их зависимость от этих элементов возрастет в еще большей степени. В частности, исключительно важны для энергетики будущего сверхпроводниковые материалы. Академик И. А. Глебов отмечает, что «на основе фундаментальных исследований электромагнитных, теплофизических и механических процессов в генерато-

рах, использующих явления сверхпроводимости, удалось создать и испытать впервые в мире сверхпроводниковый турбогенератор мощностью 20 тыс. кВт с охлаждением обмотки ротора жидким гелием. На основе этой работы в текущей пятилетке будет создан турбогенератор мощностью 300 тыс. кВт. К 1990 г. намечается создание машины мощностью 1 млн. кВт». При этом «в сверхпроводниковых генераторах удается решить противоречивые задачи: приблизительно в два раза уменьшается вес и одновременно повышается к. п. д. до 99,3—99,4%. Кроме того, мощность таких машин может быть доведена до 5 млн. кВт и более, что невозможно на основе традиционных решений» [4, с. 97].

По данным академика В. И. Попкова [25], большая неравномерность графиков энергопотребления приводит обычно к появлению пиков потребления энергии или, наоборот, к ее сбросу. Эта огромная проблема может решаться разными путями, в том числе новыми — такими, как аккумулирование энергии в магнитном поле соленоида со сверхпроводящими обмотками. Необходимые масштабы накопления энергии еще не достигнуты, и для устройств, запасающих ее в больших масштабах, требуются поиски более эффективных и мощных сверхпроводящих накопителей.

Мировой практикой убедительно доказана исключительно высокая техническая и экономическая эффективность редких элементов. Их практическое применение стимулирует рост производительности труда, дает экономию в миллиарды рублей, а капитальные затраты на строительство соответствующих предприятий окупаются в очень короткие сроки. Далеко не всегда поддаются учету обеспечиваемое редкими элементами уменьшение габаритов и (или) веса изделий на всех стадиях их производства и эксплуатации, существенное снижение материалоемкости при сохранении или даже повышении уровня надежности и срока службы оборудования, деталей, изделий. Следует еще учесть и возможность рациональной замены редкими элементами более дефицитных металлов или их экономии. Редкие элементы являются легирующими, облагораживающими материалами, призванными способствовать повышению эффективности производства и качества продукции.

В решениях XXVI съезда КПСС по «Основным направлениям экономического и социального развития СССР на 1981—1985 гг. и на период до 1990 года» назван ниобий [22]. Вместе с тем предусмотренное в Директивах Съезда развитие многих отраслей народного хозяйства и науки, включая энергетику, машиностроение, автомобилестроение, электронику (особенно полупроводниковую) и электротехнику, химическую промышленность, металлургию, физику твердого тела, приборостроение, самолетостроение, освоение космоса и морских глубин, лазерную технику, транспорт, связь, невозможно без применения и других редких элементов.

В материалах Ноябрьского (1981 г.) пленума ЦК КПСС вновь подчеркнут курс партии на наращивание экономического потенциала страны, повышение эффективности народного хозяйства, его интенсификацию («Правда», 17 ноября 1981 г.). Это обязывает сделать все возможное для создания большой и самой передовой в мире советской редкометальной промышленности на благо и укрепление могущества нашей Родины.

В особенности необходим психологический перелом в отношении к сырьевым ресурсам редких элементов в предвидении предстоящих больших сдвигов в этой отрасли. Расширение и качественное улучшение сырьевой базы редких элементов — назревшая серьезная геологическая задача, и наступила пора нацелить геологов на выявление новых крупных и экономически выгодных их месторождений. Дешевое сырье — одно из решающих условий развития редкометальной промышленности и эффективности техники грядущего.

Академик А. Е. Ферсман мечтал о том времени, когда для блага человечества будут использованы все элементы Периодической системы Д. И. Менделеева [38]. Освоение радиоактивных и редких элементов уже приблизило нас к осуществлению этой мечты.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Вигдорович В. Н., Пинчук В. Н., Фурманов Г. П.* Твердые растворы $InAs_{1-x}Sb_x$, их свойства, технология получения и применение в электронной технике. М.: Электроника, 1981. 52 с.
2. *Волощенко М. В., Хубенов Г. Н.* Барийсодержащие комплексные модификаторы для получения высокопрочного чугуна.— Литейное производство, 1981, № 12, с. 7—9.
3. *Вотинов С. Н.* Всесоюзная конференция по исследованию и разработке конструкционных материалов для термоядерных реакторов.— Атомная энергия, 1981, **51**, № 5, с. 343—344.
4. *Глебов И. А.* Выступления участников собрания (Годовое общее собрание Академии наук СССР 18—20 марта 1981 г.).— Вестн. АН СССР, 1981, № 7, с. 95—97.
5. *Гуляев А. П.* Будущее металлов.— Металловед. и термич. обработка металлов, 1970, № 4, с. 51—55.
6. *Гура П. М., Орлов А. В.* Применение пайки в парогенераторах энергоблоков с реакторами на быстрых нейтронах.— Энергохозяйство за рубежом, 1981, № 6, с. 15—18.
7. *Гуревич Ю. Я., Иванов-Шац А. К., Харкац Ю. И.* Проблемы теории твердых электролитов.— Успехи химии, 1981, **50**, № 11, с. 1960—1993.
8. *Девятых Г. Г., Дианов Е. М.* Волоконные световоды с малыми оптическими потерями.— Вестн. АН СССР, 1981, № 10, с. 54—66.
9. *Дриц М. Е., Рохлин Л. Л.* Свойства и перспективы применения сплавов магния со скандием, самарием, гольмием и тулием.— Редкие элементы. Сырье и экономика, 1982, № 16, с. 86—89.
10. *Кваскова В. Б., Пароль Н. В., Иофис Н. А.* и др. Электрические свойства и применение халькогенидных стеклообразных полупроводников. М.: ЦНИИ «Электроника», 1981. 59 с.
11. *Ковтуненко Л. В.* Современное состояние и перспективы развития производства растворных бутадиен-стирольных каучуков (тематический обзор). М.: ЦНИИТЭнефтехим, 1979. 56 с.
12. *Коган Б. И.* А. Е. Ферсман и редкие элементы.— Редкие элементы. Сырье и экономика, 1976, № 11, с. 21—32.

13. *Коган Б. И.* Редкие металлы. Прошлое, настоящее, будущее. М.: Наука, 1978. 348 с.
14. *Коган Б. И.* Редкие металлы. Состояние и перспективы. М.: Наука, 1979. 356 с.
15. *Коган Б. И.* Стратегия США в области редких металлов.— Редкие элементы. Сырье и экономика, 1982, № 16, с. 3—36.
16. *Коган Б. И., Капустинская К. А., Топунова Г. А.* Бериллий. М.: Наука, 1975. 372 с.
17. Лазер — универсальный помощник.— За рубежом, 1981, № 52, с. 20—21.
18. *Легчилин П. Ф.* Газификация каменного угля теплом атомных реакторов.— Энергохозяйство за рубежом, 1981, № 3, с. 7—15.
19. *Лисичкин Г. В., Юффа А. Я.* Каталитические конструкции.— Химия и жизнь, 1981, № 10, с. 14—19.
20. Мировой капиталистический рынок радиоэлектронной продукции в 1991 г.— Радиоэлектроника за рубежом, 1981, № 19, с. 38—39.
21. *Названова В. А.* Использование лития в химических источниках тока за рубежом.— Редкие элементы. Сырье и экономика, 1979, № 15, с. 108—120.
22. Основные направления экономического и социального развития СССР на 1980—1985 годы и на период до 1990 года: Постановление XXVI съезда КПСС по Проекту ЦК КПСС. М.: Политиздат, 1981. 95 с.
23. *Палатник Л.* Металл будущего.— Правда Украины, 13 окт. 1981 г.
24. *Платов Ю. М., Вотинов С. Н., Дриц М. Е.* и др. Исследование механических свойств сплавов на основе алюминия после нейтронного облучения.— Физика и химия обработки материалов, 1981, № 1, с. 53—55.
25. *Попков В. И.* Выступления участников собрания: (Годовое общее собрание Академии наук СССР 18—20 марта 1981 г.).— Вестн. АН СССР, 1981, № 7, с. 53—55.
26. *Прохоров М. А.* Выступления участников собрания: (Годовое общее собрание Академии наук СССР 18—20 марта 1981 г.).— Вестн. АН СССР, 1981, № 7, с. 50—52.
27. Радиоэлектроника в 1980 году: Обзор по материалам иностранной печати. М.: ЦНИИ «Электроника», 1981, с. 50—54.
28. *Разыков Т. М., Разыкова М. А.* Тонкопленочные фотопреобразователи $Cu_{2-x}S$—CdS.— Физика и техника полупроводников, 1981, **15**, № 7, с. 1402—1404.
29. *Савицкий Е. М.* Перспективы развития металловедения. М.: Наука, 1972. 128 с.
30. *Сажин Н. П.* К 85-летию со дня рождения академика А. Е. Ферсмана. Девятое научное чтение имени академика А. Е. Ферсмана.— Редкие элементы. Сырье и экономика, 1969, № 3, с. 155—159.
31. *Смоленский Г. А., Леманов В. В., Шерман А. Б.* Новые акустоэлектронные методы обработки сигналов.— Вестн. АН СССР, 1981, № 9, с. 20—29.
32. *Стайнер* (Don Steiner). Инженерные проблемы термоядерной энергетики.— Тр. Ин-та инженеров по электротехнике и радиоэлектронике, 1975, № 11, с. 38—80.
33. *Стыркович М. А.* Выступления участников собрания: (Годовое общее собрание Академии наук СССР 18—20 марта 1981 г.).— Вестн. АН СССР, 1981, № 7, с. 58—60.
34. *Титов Ю. В., Казаринова З. П.* Структура потребления никелевой продукции в капиталистических странах в 1980 году.— Цветн. металлургия, 1981, № 23, с. 37—41.
35. *Ульянов Б. В.* Расчет краевого поля в оптоэлектронных устройствах на основе керамики ЦТСЛ.— Автометрия, 1981, № 3, с. 90—93.
36. *Ферсман А. Е.* Проблема редких элементов.— Материалы по химизации народного хозяйства СССР, 1929, вып. 4, с. 95—103; Редкие элементы. Сырье и экономика, 1976, № 11, с. 5—8.
37. *Ферсман А. Е.* Редкие элементы в свете современной науки.— Редкие металлы, 1932, № 4—5, с. 13—20.
38. *Ферсман А. Е.* Периодический закон Менделеева в геохимии.— В кн.: Труды Юбилейного Менделеевского съезда. М.; Л.: Наука, 1976, т. 1, с. 383—454.

39. Фридляндер И. Н.— член-корреспондент АН СССР: (Редакционная статья в журнале).— Металловедение и термич. обработка металлов, 1977, № 7, с. 78—79.
40. *Чесноков А. С.* Развитие производства стальных строительных конструкций за период 1917—1977 гг.— Тр. Центр. н.-и. и проект. ин-та строит. металлоконструкций, 1978, № 23, с. 23—34.
41. *Шульц М. М.* Выступления участников собрания: (Годовое общее собрание Академии наук СССР 18—20 марта 1981 г.).— Вестн. АН СССР, 1981, № 7, с. 66—68.
42. *Chandler H. E.* The next 20 year in Materials and Process Engineering.— Metal Progress, 1980, **118**, N 4, p. 32—82.
43. Controlled nuclear fusion talks.— Reuter Appl. Atom. Newslett., 1980, N 1284, p. 1.
44. *Davidson C. F.* Recovery of lithium from clay by selective chlorination: Rep. Invest. Bur. Mines US Dep. Inter., 1981, N 8523. 19 p.
45. *Epstein J. A., Feist E. M., Zmora J.* Extraction of lithium from the Dead Sea.— Hydrometallurgy, 1981, **6**, N 3—4, p. 269—275.
46. *Farkas M. S.* Beryllium.— Eng. Mining J., 1981, **182**, N 3, p. 130—131.
47. Generator spun at 3600 rpm at minus 452 F.— Design News, 1980, **36**, N 1, p. 40.
48. Gold ousted by vanadium.— Metal Bull., 1980, N 6489, p. 26.
49. Japan's stockpile confirmed.— Metal Bull., 1981, N 6626, p. 15.
50. *Kulcinski G. L.* Fusion power — an assessment of its potential inpact in the USA.— Eng. Policy, 1974, June, p. 104—125.
51. L'emploi du titane dans les constructions aéronautiques françaises.— Aéronaut. et astronaut., 1981, N 2/3, p. 3—96.
52. Lithium batterice poised for take-off.— Metal Bull., 1981, N 6614, p. 15.
53. Lightweight metals fabrication helps aircraft and satellites.— Finan. Times, 1981, N 28463, p. 12.
54. Mineral facts and problems.— US Bur. Mines Bull., 1975, N 630; 1970, N 650; 1975, N 667; 1980, N 671.
55. News from EPRI.— Energie, 1980, **32**, N 10, S. 373.
56. Strontium: new alloy developed for vehicle wheels.— Roskill's Lett. Jap., 1980, N 51, p. 5.
57. US indium.— Amer. Metal Market, 1981, **89**, N 87, p. 7.

УДК 549.6

Н. Ф. ЧЕЛИЩЕВ

НОВЫЕ НАПРАВЛЕНИЯ В ТЕХНОЛОГИИ ПЕРЕРАБОТКИ РЕДКОМЕТАЛЬНОГО СЫРЬЯ

Вопросы промышленного освоения новых типов редкометальных руд и комплексного использования сырья, которым большое внимание уделял А. Е. Ферсман [3, 4], приобретают особое значение в наши дни. В связи со значительным увеличением объема потребления редких элементов в народном хозяйстве в последние годы происходит пересмотр сырьевой базы и технологии переработки редкометального сырья. Сырьевая база редких элементов основывается на рудах двух типов. К первому типу относятся собственно редкометальные руды, ко второму — руды, из которых редкие элементы извлекаются попутно с ос-

новными полезными компонентами. Руды собственно редкометальных месторождений, характеризующиеся обычно скромными запасами, до недавнего времени обогащались путем ручной рудоразборки или простейшими гравитационными методами. Примерами могут служить поллуцитовые, берилловые и сподуменовые руды в гранитных пегматитах, а также танталлит-касситеритовые руды в корах выветривания пегматитов и россыпях.

Переход к разработке бедных редкометальных месторождений с большими запасами руд заставляет направлять основные усилия на решение вопросов комплексного использования сырья, так как только таким путем может быть достигнута рентабельность. Другим важным вопросом является повышение степени извлечения полезных компонентов из редкометальных руд. Обычно она не превышает 50%, а при попутном извлечении рассеянных элементов еще ниже [2]. Основными особенностями редкометальных руд, определяющими их трудную обогатимость, являются: низкое содержание полезных компонентов, тонкая вкрапленность и хрупкость рудных минералов, сложный и непостоянный минеральный состав руд. Все это значительно осложняет промышленное освоение в первую очередь собственно редкометальных, а также месторождений новых типов редкометального сырья, которое в значительной мере определяется решением технологических проблем. Для комплексного использования редкометальных руд и повышения степени извлечения их полезных компонентов необходимо переходить от простых обогатительных приемов к сложным, включающим наряду с гравитационными методами флотацию, магнитную и электрическую сепарацию, а также гидрометаллургический передел руд или обогащенных продуктов.

Для действующих горно-обогатительных предприятий важное значение приобретают разработка методов извлечения полезных компонентов из хвостов обогатительных фабрик и других промышленных отходов, а также перестройка технологических схем с целью доизвлечения полезных компонентов. В качестве примера можно указать на перспективность применения флотации для доизвлечения полезных компонентов из хвостов гравитации.

Особое значение вопросы технологии приобретают при вовлечении в сферу промышленного использования новых видов редкометального сырья. В своей основе это минералого-технологическая проблема. Геохимические данные о повышенных содержаниях ряда редких элементов в минералах, горных породах (апатите, слюдах, нефелинах, астрофиллитах, вулканических стеклах, горючих сланцах), природных водах и др. еще не дают оснований относить эти природные образования к новым типам минерального сырья. Только разработка рентабельных способов извлечения полезных компонентов из природных объектов или промышленных отходов, содержащих редкие элементы, оправдывает их отнесение к редкометальному сырью нового типа.

Вовлечение в промышленное производство нового редкометального сырья и бедных руд ставит перед минералогами и технологами ряд задач. В первую очередь следует упомянуть совершенствование методов обогащения и получения мономинеральных фракций на основе детального изучения технологических свойств редкометальных минералов. Большое значение приобретают внедрение новых методов подготовки и обогащения руд (предварительное УВЧ-облучение, электроимпульсное дробление, МГС-сепарация и др.), а также использование новых реагентов и режимов флотации.

Для расширения сырьевой базы редких элементов большое значение может иметь их попутное извлечение. Характерным примером служит попутное получение галлия при производстве алюминия, рения — при производстве молибдена и меди; в этих случаях при весьма низких содержаниях редких элементов в исходной руде попутно при крупных масштабах основного производства могут быть получены значительные количества редких металлов.

Основное количество редких элементов в настоящее время добывается из собственно редкометальных руд с низким содержанием полезных компонентов (0,1—0,001%). При этом требования к чистоте кондиционных концентратов весьма высоки. Степень обогащения для редкометальных руд может достигать 100—1000 и выше. Мелковкрапленный характер выделенных редкометальных минералов в ряде случаев не дает возможности получать кондиционные концентраты, или обогащение сопровождается значительной потерей полезных компонентов. Поэтому для технологии переработки редкометального сырья важное значение приобретают комбинированные обогатительно-гидрометаллургические методы передела руд и промежуточных продуктов обогащения.

Редкометальные руды, как правило, комплексные. При переработке бедных руд наряду с редкометальными концентратами могут быть получены концентраты нерудных минералов (полевошпатовый, нефелиновый, слюдяной, криолитовый и др.), ценность которых в ряде случаев может превышать ценность редких металлов.

Из руд комплексных редкометальных месторождений при обогащении выделяются несколько концентратов. Так, из редкометальных гранитных пегматитов обычно получают коллективные концентраты: гравитационные — тантало-ниобатовый, касситеритовый; флотационные — берилл-сподуменовый, полевошпатовый, слюдяной, кварцевый. При разработке редкометальных карбонатитовых месторождений комплексный характер и низкое содержание редкометальных минералов в рудах обусловливают значительную сложность их первичного обогащения и доводки черновых концентратов. В настоящее время для таких руд широко применяются комбинированные схемы, вклю-

чающие гравитацию, магнитную и электрическую сепарацию, флотацию, химико-металлургический передел.

Для редкометальных месторождений с малым содержанием металлов, полиминеральностью руд, сложностью химического состава рудных минералов особое значение приобретает изучение технологических свойств минералов [6]. Редкие элементы к тому же всегда содержатся в большом числе минералов генетически разных промышленных минеральных ассоциаций.

Одним из основных вопросов является изучение структур руд для определения крупности помола, методов дробления и предварительной обработки руд. Эти методы позволяют значительно повысить степень извлечения полезных компонентов. В ряде случаев технологические свойства рудных минералов зависят от характера микровключений. Хорошим примером является пирохлор, который может содержать в качестве микровключений магнетит, ильменит или гематит, и в зависимости от этого его зерна могут обладать различной магнитной восприимчивостью и электропроводностью, определяющими их поведение в процессах магнитной и электрической сепарации, широко применяемых для доводки черновых концентратов. То же в значительной степени относится к колумбиту и касситериту, зерна которых в зависимости от состава микровключений могут по-разному вести себя в процессах гравитационной, магнитной и электрической сепарации.

Детальное изучение химического состава минералов в целом ряде случаев дает важный материал для оценки перспектив комплексного использования минерального сырья. В первую очередь это относится к редким элементам. Например, в последние годы разработана технология извлечения стронция и редких земель из апатита, галлия и рубидия из нефелина и т. д.

Методы обогащения минерального сырья основаны на различии таких физических свойств рудных и нерудных минералов, как плотность, магнитная восприимчивость и электропроводность. Плотность минералов редкометальных руд колеблется от 2 г/см^3 для некоторых водных силикатов, глин и гидрослюд до 10 г/см^3 и более для окислов тяжелых металлов. Значительны различия в плотности рудных и нерудных минералов, что позволяет широко применять гравитационные методы обогащения для выделения черновых концентратов редкометальных минералов. Гравитационными методами получают черновые оловянные, колумбитовые, цирконовые, пирохлоровые, лопаритовые и другие концентраты. Однако, несмотря на высокую производительность, гравитационные методы применимы главным образом для крупных и средних классов крупности, в то время как в мелких классах их применение менее эффективно. Доводка черновых гравитационных концентратов обычно проводится при узкой классификации материала по крупности с применением для крупных классов электромагнитной и электрической сепарации и флотогравитации, а для тонких фракций — флотации. Проб-

лема обогащения является актуальной для большинства действующих и подготавливаемых редкометальных месторождений.

Основную массу руд слагают породообразующие и рудные немагнитные и слабомагнитные минералы. Удельная магнитная восприимчивость минерала может колебаться в весьма широких пределах в зависимости от состава, содержания микровключений, генезиса, термической обработки. Применение методов магнитной сепарации наиболее эффективно при обогащении руд, содержащих такие сильно магнитные минералы, как магнетит, франклинит, титаномагнетит, ильменит, пирротин. Значительно труднее разделяются слабомагнитные редкометальные минералы. Для получения их концентратов наиболее перспективно применение методов магнитогидродинамической и магнитогидростатической сепарации, позволяющих изменять в широких пределах плотность разделяющей среды.

Электрические свойства минералов колеблются в еще более значительных пределах, чем плотность и магнитная восприимчивость. Силикатные минералы в основном диэлектрики; это позволяет достаточно широко применять электрическую сепарацию для обогащения редкометальных руд, а также доводки и обесшламливания черновых концентратов.

При обогащении бедных тонкозернистых руд первостепенное значение приобретают флотационные методы. Различия во флотируемости минералов позволяют обогащать руды весьма сложного состава. Флотационные свойства минералов являются результатом сложного взаимодействия поверхности твердых частиц с флотационными реагентами; у редкометальных и нерудных минералов флотируемость колеблется в широких пределах. Флотационные методы позволяют разделять ряд близких по свойствам минералов. Особое значение флотация приобретает при обогащении шламов. В связи с этим большой интерес представляет изучение поверхностных свойств минералов с целью интенсификации процессов флотации и установления связи флотируемости минералов с особенностями их состава, структуры, генезиса, а также возможности модифицирования поверхности.

Флотируемость какого-либо редкометального минерала из различных месторождений неодинакова, что объясняется резкими различиями в гидрофобности поверхности зерен минерала, которые сохраняются и в присутствии собирателя. При флотации тантало-ниобатов хорошие результаты дает применение олеата натрия и олеиновой кислоты, алкисульфат натрия является собирателем в кислой среде, при флотации с использованием АНП-14 тантало-ниобаты извлекаются в слабокислой среде. При этом предварительная кислотная или щелочная обработка поверхности зерен минералов, как правило, способствует повышению селективности флотации. Берилл хорошо флотируется в кислой среде, создаваемой плавиковой кислотой, это позволяет получать коллективный берилл-полевошпатовый

концентрат. Флотация полевого шпата, слюды и кварца проводится с участием катионных собирателей в широком диапазоне значений pH.

Изучение термической и химической устойчивости минералов, кинетики их растворения, связи химических свойств с особенностями состава, структуры и генезиса имеет важное значение для промышленного освоения новых типов сырья и бедных руд, для которых традиционными методами обогащения не удается получить кондиционные концентраты и рентабелен прямой гидрометаллургический передел руд или обогащенных продуктов.

Значение детального изучения химической устойчивости минералов, в частности, хорошо видно на примере бериллиевого оруденения в метасоматитах. При близких содержаниях полезных компонентов (бериллия, редких земель) методы обогащения и гидрометаллургического передела в значительной мере определяются особенностями минерального состава таких руд. Основные промышленные минералы бериллия (берилл, фенакит, лейкофан и др.) резко отличаются по устойчивости к воздействию кислот. Например, берилл и фенакит разлагаются только под действием избытка концентрированной серной кислоты в автоклавных условиях; а бертрандит и гельвин — в более мягких условиях. Различия в растворимости минералов бериллия и редких земель, встречающихся в комплексных редкоземельно-бериллиевых рудах, позволяют успешно извлекать компоненты из некондиционных концентратов.

Важное значение при выборе путей разложения редкометальных руд могут иметь сопутствующие нерудные минералы. Так, присутствие в рудах флюорита позволяет применять метод фторидного вскрытия и возгонки полезных компонентов в виде летучих фторидов непосредственно из руд без предварительного обогащения. Те же возможности необходимо учитывать при переработке комплексных руд, связанных с редкометальными карбонатитами, и редкометальных метасоматитов с криолитом, связанных с щелочными гранитами.

В связи с извлечением редких элементов из бедных руд, некондиционных концентратов, отвалов и хвостов горно-обогатительных предприятий возникают новые направления в технологии переработки редкометального сырья. В первую очередь это вскрытие бедного сырья, для которого традиционные пиро- и гидрометаллургические способы извлечения редких элементов нерентабельны.

Термодинамически наиболее выгодно извлечение редких элементов из минералов-носителей без разрушения кристаллической структуры. Этому требованию удовлетворяют методы ионообменного вытеснения и кислотного декатионирования [5, 8]. Особым достоинством этих методов является возможность получения побочного полезного продукта в виде остова исходного минерала. Данные о кинетике кислотного декатионирования же-

лезо-магнезиальных слюд позволяют предложить простой способ извлечения щелочных металлов из слюдяных концентратов с попутным получением высококремнистого, сверхлегкого, слоистого материала, обладающего рядом уникальных свойств [7]. Появляется возможность полной утилизации слюдяных хвостов, получаемых попутно на ряде месторождений и в настоящее время идущих в отвал.

Методы кислотного декатионирования позволяют решать и другие технологические проблемы. В последнее время была показана возможность извлечения цезия и рубидия из биотита, лития из слюдисто-углистых сланцев и редких земель из глауконита в хвостах от обогащения фосфоритов.

Ионообменная подвижность катионов ряда алюмосиликатов, титано-цирконосиликатов и тантало-ниобатов позволяет ставить вопрос об использовании методов ионообменного вытеснения в автоклавных условиях для некоторых видов сырья и некондиционных концентратов. Установлена ионообменная подвижность щелочных металлов в кислых вулканических стеклах и астрофиллите, щелочноземельных и редкоземельных металлов в пирохлоре, эвдиалите и некоторых других редкометальных минералах. Эти данные показывают, что путем ионообменного вытеснения или кислотного декатионирования из пирохлора или эвдиалита могут быть извлечены редкие земли с получением твердого продукта, непосредственно пригодного для получения феррониобия из пирохлора, цирконосиликатной керамики из эвдиалита.

Систематическое изучение сорбционных свойств железо-марганцевых океанических конкреций позволило оценить емкость для щелочных и щелочноземельных металлов в 0,4—0,6 мг-экв/г, а для цветных металлов — в 1,0—1,5 мг-экв/г [8]. Показано, что содержание цеолитной воды убывает с увеличением размера сорбированных катионов. Сравнительные данные о сорбции металлов на океанических конкрециях и синтетической гидроокиси марганца показали, что в обоих случаях изотермы близки по виду. Это указывает на резкую селективность к катионам цветных металлов и позволяет сделать вывод о сорбции цветных металлов марганцевыми минералами конкреций.

Сорбция щелочных металлов на железо-марганцевых конкрециях носит ионообменный характер, сорбция цветных металлов происходит по сложному ионообменно-осадочному механизму. Наличие ионообменных центров в железо-марганцевых конкрециях может быть связано с образованием отрицательно заряженной матрицы с туннельной структурой типа псиломелановой, заряд которой компенсируется обменными катионами: $M^{+}_{2x}\{[(Mn^{2+},Fe^{2+})O_2]^{2-}_{x}(MnO_2)^{0}_{n-x}\}^{2x-}\cdot mH_2O$. В качестве обменных катионов (М) во внутрикристаллических каналах вместе с цеолитной водой могут содержаться катионы не только щелочных, но также щелочноземельных и цветных металлов. Для щелоч-

ных металлов доказан обратимый обмен, в то время как цветные металлы могут взаимодействовать с матрицей, замещая двухвалентные марганец и железо. Установление различной подвижности катионов в кристаллической структуре минералов железомарганцевых конкреций создает предпосылки для совершенствования технологии извлечения цветных металлов из этого нового вида сырья.

Из пирометаллургических методов наиболее перспективна для бедного редкометального сырья термовозгонка [2]. Она позволяет извлекать редкие элементы из бедных руд, а отходы могут использоваться в цементном или керамическом производстве. Очевидное преимущество этого способа — возможность введения в шихту реагентов, повышающих летучесть металлов (например, хлористого натрия), и создания условий для наиболее полного улавливания редких элементов из отходящих газов и пыли. При этом серьезным недостатком является необходимость утилизации большого количества твердых отходов, которые по экономическим причинам должны использоваться на близко расположенных предприятиях цементной или керамической промышленности.

Другой пирометаллургический способ — непосредственное использование пород, содержащих небольшие количества редких элементов, в качестве цементного сырья. Однако одновременно это является и сдерживающим фактором, так как количество перерабатываемого сырья определяется объемом цементного производства. Подшихтовка редкометального сырья в качестве алюмосиликатной составляющей цементных смесей может составлять не более 10—30%. Поэтому его использование в цементном производстве ограниченно, а содержание редких элементов в отходящих газах и пыли низкое. Рентабельность системы газо-пылеулавливания здесь значительно меньше, чем на предприятиях цветной металлургии. Значительную трудность представляет также неподготовленность цементного производства к газо- и пылеулавливанию, обеспечивающему достаточную степень извлечения редких элементов, а также охрану окружающей среды от таких высокотоксичных веществ, как сернистый и угарный газ, сероводород, фтор, летучие соединения тяжелых металлов.

При определении целесообразности использования каждого из рассматриваемых способов необходимо учитывать конкретные хозяйственные и экономические условия. Кроме того, при оценке перспектив переработки редкометального сырья методами термовозгонки наряду с содержанием полезных компонентов следует принимать во внимание количество токсичных легколетучих веществ.

Основным в получении солей редких элементов при металлургическом переделе бедного сырья является концентрирование микрокомпонентов, распределенных в разбавленных растворах. Весьма перспективны для этого ионообменные методы концен-

трирования и разделения редких элементов с использованием природных цеолитов и других природных сорбентов. Серьезной проблемой является также извлечение металлов из сбросовых вод и достаточно глубокая очистка технологических растворов с целью организации оборотного водоснабжения.

Полная утилизация природных высокоминерализованных вод представляет сложную технологическую проблему, актуальность которой определяется в первую очередь тем, что огромные объемы рассолов, получаемых при бурении на нефть и газ, а также при извлечении иода и брома, сбрасываются в реки, моря или на специальные земельные отводы и являются источниками загрязнения окружающей среды. То же в определенной степени относится и к сбросовым слабо минерализованным термальным водам. При значительном возрастании требований к деминерализации сбросовых вод их комплексное использование может стать рентабельным. При этом особое значение приобретают методы глубокого упаривания и сорбционные методы концентрирования полезных компонентов из остаточных рассолов, в том числе и с использованием природных сорбентов.

Очистка сбросовых вод и применение газо-пылеулавливания являются важным звеном при решении технологических вопросов извлечения редких элементов из сырья новых типов, бедных руд, отвалов, хвостов. Новое перспективное направление в решении вопросов защиты окружающей среды — использование природных высококремнистых цеолитов [5]. Природные цеолиты (клиноптилолит и морденит) могут с успехом применяться для очистки сбросовых вод от аммония, цезия, стронция, ртути, свинца, цинка, кадмия, а также для улавливания сернистого и углекислого газов, сероводорода, аммиака и некоторых других токсичных веществ.

Природные высококремнистые цеолиты проявляют высокую селективность к крупным катионам щелочных металлов и иону аммония при различной степени обмена (табл. 1). Сопоставление значений термодинамических констант обмена позволяет наметить для клиноптилолита, морденита и эрионита общий ряд селективности: $Cs^+ > Rb^+ > K^+ > NH_4^+ > Na^+$, соответствующий ряду убывания радиуса катионов. При этом для клиноптилолита характерна групповая селективность ко всем крупным катионам, а у морденита и особенно эрионита устанавливаются более значительные различия в селективности в зависимости от радиуса катиона. По отношению к катионам щелочноземельных металлов высококремнистые цеолиты обнаруживают значительную селективность при невысокой степеней обмена (табл. 2). Сопоставление термодинамических констант обмена позволяет наметить ряд селективности: $Ba^{2+} > Sr^{2+} > Ca^{2+}$, соответствующий убыванию радиуса катиона.

Ионный обмен щелочноземельных металлов на мордените характеризуется резким уменьшением селективности при достижении определенной концентрации противоиона в твердой фазе,

Таблица 1

Ионообменная селективность высококремнистых цеолитов к катионам щелочных металлов

Цеолит	Обменные катионы	Коэффициенты селективности для разной степени обмена в цеолите			Термодинамическая константа	Свободная энергия, ккал/г-ион
		0,1	0,5	0,9		
Клиноптилолит	$Na^+ \rightleftharpoons Cs^+$	939,13	99,00	9,00	89,10	−2,63
	$Na^+ \rightleftharpoons Rb^+$	423,14	56,70	5,52	44,70	−2,22
	$Na^+ \rightleftharpoons K^+$	219,13	35,67	4,84	28,20	−1,95
	$Na^+ \rightleftharpoons NH_4^+$	80,00	21,22	2,84	14,13	−1,55
Морденит	$Na^+ \rightleftharpoons Cs^+$	111,00	49,00	13,50	39,80	−2,16
	$Na^+ \rightleftharpoons Rb^+$	22,11	13,30	7,36	8,91	−1,28
	$Na^+ \rightleftharpoons K^+$	9,99	5,67	3,86	5,01	−0,94
	$Na^+ \rightleftharpoons NH_4^+$	4,43	3,55	2,67	3,16	−0,67
Эрионит	$Na^+ \rightleftharpoons Cs^+$	202,43	79,00	31,90	63,10	−2,43
	$Na^+ \rightleftharpoons Rb^+$	55,44	27,57	13,50	22,40	−1,82
	$Na^+ \rightleftharpoons K^+$	22,11	11,50	8,11	8,90	−1,28
	$Na^+ \rightleftharpoons NH_4^+$	5,45	4,89	3,71	3,98	−0,81

Таблица 2

Ионообменная селективность высококремнистых цеолитов к катионам щелочноземельных металлов

Цеолит	Обменные катионы	Коэффициенты селективности для различной степени обмена в цеолите			Термодинамическая константа	Свободная энергия, ккал/г-ион
		0,1	0,5	0,9		
Клиноптилолит	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Ba^{2+}$	55,44	13,29	0,79	1,39	−0,10
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Sr^{2+}$	13,78	5,67	0,38	0,77	+0,08
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Ca^{2+}$	4,24	2,33	0,18	0,30	+0,35
Морденит	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Ba^{2+}$	18,41	4,00	0,78	0,29	+0,51
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Sr^{2+}$	6,83	1,00	0,23	0,07	+0,19
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Ca^{2+}$	4,16	0,15	0,07	0,02	+0,07
Эрионит	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Ba^{2+}$	36,93	11,50	1,00	1,16	−0,04
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Sr^{2+}$	7,83	2,85	0,47	0,37	+0,29
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Ca^{2+}$	2,11	0,89	0,20	0,13	+0,59

в то время как для клиноптилолита и эрионита отмечено постепенное понижение селективности с увеличением содержания противоиона.

Высококремнистые цеолиты проявляют селективность ко всем двухвалентным катионам цветных металлов при низкой степени обмена; при высокой степени обмена сохраняется селективность только к катионам свинца (табл. 3). Сопоставление термодинамических констант обмена позволяет наметить ряд селективности: $Pb^{2+} > (Cd^{2+}, Cu^{2+}, Zn^{2+})$.

Таблица 3

Ионообменная селективность высококремнистых цеолитов к катионам цветных металлов

Цеолит	Обменные катионы	Коэффициенты селективности для различной степени обмена в цеолите			Термодинамическая константа	Свободная энергия, ккал/г-ион
		0,1	0,5	0,9		
Клиноптилолит	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Pb^{2+}$	75,92	51,00	2,69	5,57	−0,50
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Cd^{2+}$	3,59	0,52	0,23	0,06	+0,82
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Cu^{2+}$	2,34	0,39	0,10	0,05	+0,86
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Zn^{2+}$	1,24	0,30	0,06	0,04	+0,92
Морденит	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Pb^{2+}$	55,44	31,00	2,11	2,92	−0,31
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Cd^{2+}$	2,64	0,43	$9,0 \cdot 10^{-3}$	0,01	+1,30
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Cu^{2+}$	1,91	0,16	$8,2 \cdot 10^{-4}$	$2,0 \cdot 10^{-3}$	+1,82
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Zn^{2+}$	1,60	0,08	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$4,0 \cdot 10^{-4}$	+2,30
Эрионит	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Pb^{2+}$	62,34	37,16	2,24	4,21	−0,47
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Cd^{2+}$	2,94	0,46	0,17	0,06	+0,84
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Cu^{2+}$	2,04	0,23	0,08	0,04	+0,98
	$Na^+ \rightleftharpoons 1/2Zn^{2+}$	1,75	0,11	0,02	0,03	+1,04

Таблица 4

Ионообменная селективность высококремнистых цеолитов к катионам серебра

Цеолит	Обменные катионы и условия опыта	Коэффициенты селективности для разной степени обмена в цеолите			Термодинамическая константа	Свободная энергия, ккал/г-ион
		0,1	0,5	0,9		
Клиноптилолит	$Na^+ \rightleftharpoons Ag^+$, в темноте	10,60	50,25	3,86	4,37	−0,86
	$Na^+ \rightleftharpoons Ag^+$, на свету	7,86	3,35	2,84	3,16	−0,67
Морденит	$Na^+ \rightleftharpoons Ag^+$, в темноте	24,45	14,53	9,10	10,47	−1,38
	$Na^+ \rightleftharpoons Ag^+$, на свету	14,82	17,34	5,23	6,31	−1,08
Эрионит	$Na^+ \rightleftharpoons Ag^+$, в темноте	41,32	15,67	11,44	13,80	−1,54
	$Na^+ \rightleftharpoons Ag^+$, на свету	18,54	8,09	7,07	7,94	−1,21

Значительный интерес представляют данные о селективности высококремнистых цеолитов по отношению к катиону серебра (табл. 4). При общей резко выраженной селективности к катиону серебра наблюдается значительное понижение ее коэффициентов для ионообменных реакций, протекающих на свету. Одновременное значительное повышение на свету емкости высококремнистых цеолитов к серебру указывает на параллельное протекание ионообменной и фотохимической реакций.

Таблица 5

Использование цеолитов в ионообменных процессах

Способ использования	Пример
Без регенерации	Очистка сбросовых вод от радиоактивных катионов (^{137}Cs, ^{90}Sr) с последующим захоронением цеолитов
	Очистка бытовых сточных вод от аммонийного азота с последующим использованием цеолита в качестве аммонийного удобрения
	Очистка сбросовых вод от цветных металлов с использованием цеолита в качестве флюса
С саморегенерацией	Использование цеолитовых туфов в качестве фильтрующего материала при водоподготовке
	Внесение цеолитов в почву с целью повышения длительности действия удобрения
С регенерацией растворами противоионов	Концентрирование и разделение щелочных металлов из технологических растворов и природных вод
	Концентрирование Sr из сбросовых и природных вод
	Концентрирование цветных металлов из технологических растворов, сбросовых и природных вод

Кинетика ионного обмена на природных высококремнистых цеолитах характеризуется высокими значениями эффективных коэффициентов диффузии и низкими значениями энергии активации. Намечается общая тенденция уменьшения скорости обмена с увеличением размера противоиона.

Приведенные данные о ионообменных свойствах клиноптилолита, морденита и эрионита показывают, что эти цеолиты могут быть использованы для концентрирования и разделения крупных катионов щелочных, щелочноземельных и некоторых цветных металлов. Низкая себестоимость природных цеолитов позволяет использовать их в сорбционных процессах без регенерации ионита (табл. 5).

Наиболее полно изучена сорбция на клиноптилолите радиоактивных изотопов цезия и стронция для последующего захоронения радиоактивных отходов. Данные по хроматографическому разделению весьма близких по свойствам цезия, рубидия и калия показали, что оно может быть успешно осуществлено на клиноптилолите. Методы элюативной хроматографии на высококремнистых цеолитах могут быть использованы для концентрирования цезия и рубидия из технологических растворов и природных высокоминерализованных вод, а также для получения чистых солей этих металлов. Использование морденита и эрионита в качестве высокоселективных ионитов для концентрирования и разделения щелочных металлов также дает хорошие результаты.

Важное значение приобретает очистка бытовых сточных вод от аммонийного азота с применением клиноптилолита и других цеолитов. При этом регенерация цеолитов может быть осуществлена растворами хлористого натрия, или же аммонийная форма клиноптилолита может быть использована в качестве удобрения.

Значительное сродство природных высококремнистых цеолитов к катионам цветных металлов позволяет рассматривать вопрос об их использовании для очистки сбросовых вод предприятий цветной металлургии и металлообрабатывающей промышленности, а также для извлечения полезных компонентов из природных вод и морской воды с последующей регенерацией ионита. Возможно и последующее использование клиноптилолита в качестве флюса.

Как уже упоминалось, наибольший интерес природные цеолиты представляют для сорбционных процессов без регенерации ионита. Наряду с дезактивацией сбросовых вод и использованием аммонийной формы цеолитов в качестве удобрений значительный интерес представляет использование цеолитовых туфов в качестве фильтрующего материала при водоподготовке [9]. При этом наблюдается одновременная сорбция повышенных доз металлов с последующей самоочисткой цеолитного фильтра, обеспечиваемой периодичностью поступления загрязнений. Известна также возможность использования природных цеолитов в натриевой форме для умягчения технической воды. На ионообменном механизме основано положительное влияние цеолитов, внесенных в почву вместе с удобрениями, на урожайность сельскохозяйственных культур.

Таким образом, использование высококремнистых цеолитов в качестве селективных ионитов позволяет решать целый ряд важных вопросов технологии и охраны окружающей среды. При этом особое значение приобретает промышленное освоение природных цеолитов, которые благодаря уникальным ионообменным свойствам и низкой стоимости могут найти широкое применение в тех областях, в которых использование синтетических цеолитов нерентабельно.

Приведенные данные показывают, что сырьевая база редких элементов может быть существенно расширена за счет совершенствования технологии переработки и промышленного освоения сырья новых типов. Вовлечение в сферу промышленного производства бедных руд отвалов и хвостов обогатительных фабрик приобретает особое значение в связи с проблемами создания безотходных технологических схем и охраны окружающей среды.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Брек Д.* Цеолитные молекулярные сита. М.: Мир, 1976. 781 с.
2. *Плющев В. Е., Степин С. Б., Федоров П. И.* Химия и технология редких и рассеянных элементов. М.: Высш. школа, 1976. Ч. 1. 368 с.
3. *Ферсман А. Е.* Пегматиты. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1940. Т. 1. 712 с.

4. *Ферсман А. Е.* Избранные труды. М.: Изд-во АН СССР, 1959. Т. 5. 858 с.
5. *Челищев Н. Ф.* Ионообменные свойства минералов. М.: Наука, 1973. 203 с.
6. *Челищев Н. Ф.* Основные направления технологической минералогии.— Изв. АН СССР. Сер. геол., 1977, № 11, с. 86—94.
7. *Челищев Н. Ф.* Продукты кислотного декатионирования силикатов.— Изв. АН СССР. Неорган. материалы, 1980, 7, с. 1251—1254.
8. *Челищев Н. Ф., Грибанова Н. К.* Сорбция металлов железо-марганцевых конкреций.— В кн.: Современные проблемы морской геологии: (4-я Всесоюз. школа морской геологии. Тез. докл.). М.: Ин-т океанологии АН СССР, 1980, т. 2, с.
9. *Chelischev N. F.* Ion exchange centres in minerals.— Phys. Chem. Miner., 1978, 3, p. 62—63.

УДК 549.75 : 553.641

Г. И. ГОРБУНОВ, А. С. САХАРОВ

А. Е. ФЕРСМАН И ЕГО РОЛЬ В РАЗВИТИИ КОЛЬСКОГО ГОРНОПРОМЫШЛЕННОГО КОМПЛЕКСА

Все основные города Мурманской области, за исключением Мурманска, обязаны своим существованием горному делу и связанной с ним промышленности. Ряд горняцких поселков (Африканда, Ревда, Ена, Риколатва и др.) приурочены к местам рудопроявлений.

Горное дело и металлургическая промышленность появились на Кольском полуострове лишь в годы Советской власти. Решающую роль в этом сыграло освоение горных богатств края, прежде всего хибинских апатитов. У его начала находился академик Александр Евгеньевич Ферсман, не только один из создателей геохимии, но и научно-практический деятель нового типа.

По инициативе В. И. Ленина после Октябрьской революции начались планомерные исследования Европейского Севера. В апреле — мае 1918 г. в составе Комиссии по изучению естественных производительных сил России при Академии наук (КЕПС), ученым секретарем которой был А. Е. Ферсман, создается отдел исследования Севера под руководством академика А. П. Карпинского. В августе 1918 г. организован научно-технический отдел ВСНХ с участием Ф. Ю. Левинсона-Лессинга, А. Е. Ферсмана, В. Г. Хлопина и других ученых. В марте 1919 г. начала работать Комиссия по Северу ВСНХ, 4 марта 1920 г. преобразованная в Северную научно-промысловую экспедицию. В ее Ученый совет вошли А. Е. Ферсман, Ю. М. Шокальский, Н. М. Книпович, Л. С. Берг, А. М. Горький и др.; почетным председателем стал А. П. Карпинский.

В конце 1920 г. на Кольский полуостров выехала специальная комиссия Советского правительства для составления плана восстановления хозяйства Мурманской железной дороги; в составе

комиссии были академики А. П. Карпинский, А. Е. Ферсман. Тогда А. Е. Ферсман впервые поднялся от ст. Имандра на предгорья Хибин. Осенью этого же года он возглавил Хибинский отряд Северной экспедиции, куда вошли двое научных сотрудников и несколько студенток. Собирали материал из пегматитовых жил, отдавая предпочтение необычным минералам. Условия работы были очень тяжелые: нехватало обуви и продовольствия, весь груз несли на себе. Так начались полевые работы Хибинского отряда, продолжавшиеся в следующие годы уже несколькими группами.

Перед учеными, начавшими исследование Хибинских и Ловозерских гор, была поставлена задача создать с учетом данных предыдущих работ проф. В. Рамсея полные географические и геохимические характеристики массивов.

Уже в первые годы были открыты десятки редких минералов, в том числе новые — рамзаит, названный в честь проф. В. Рамсея (Рамзая), и мурманит. Были получены данные по геологии, минералогии, петрографии и геохимии Хибинских и частично Ловозерских тундр [22, 23]. Особое значение имело открытие месторождений апатит-нефелиновых руд. Апатит был встречен в Хибинских тундрах первоначально в осыпи на горе Кукисвумчорр (1921 г.), затем в 1923 г. в пегматоидах и в россыпях на горе Расвумчорр отрядом Б. М. Куплетского, в который входили также А. Н. Лабунцов, Э. М. Бонштедт и Е. Е. Костылева. В 1925 г. А. Н. Лабунцов [9] установил коренное месторождение апатита на плато Расвумчорр. В январе 1926 г. им был сделан доклад в Институте Севера (Ленинград) об этом открытии. Поисково-разведочный отряд А. Н. Лабунцова (куда входил студент А. А. Сауков) выявил на плато Расвумчорр два апатитовых участка общей площадью более 50 000 м² с глубиной залегания апатит-нефелиновой породы (по обрыву) не менее 20 м. Были обнаружены коренные выходы и на горе Кукисвумчорр. После письменного сообщения, адресованного А. Е. Ферсману, в Хибины были командированы Р. Л. Самойлович, Д. И. Щербаков и П. А. Борисов. Рудопроявление было опробовано, и промышленная проба апатит-нефелиновой породы вывезена из Хибин совместными усилиями И. Г. Эйхфельда и П. А. Борисова [25].

В 1927 г. А. Н. Лабунцов, обследуя месторождение Кукисвумчорр, обнаружил его продолжение на горе Юкспор, а также нашел выходы апатит-нефелиновых пород на горе Поачвумчорр, обследованные им более подробно в 1929 г.

А. Е. Ферсман еще до производства разведочных работ оценил масштабы месторождений апатитовых руд и понял их значение как комплексного сырья для получения апатита и нефелина. Трудно сказать, какой путь прошло бы освоение Хибинских месторождений, если бы не энергия и научный авторитет А. Е. Ферсмана, которому пришлось вести организационную работу в хозяйственных органах, а также публикацию изданий,

популяризующих значение и указывающих на сложность хозяйственного освоения минеральных богатств Кольского полуострова [12, 13]. Немалое значение при этом имел и дар убеждения, которым обладал А. Е. Ферсман.

Инициативы Александра Евгеньевича встретили поддержку ленинградских коммунистов, в первую очередь руководителя ленинградской партийной организации С. М. Кирова. «...В 1926 г. Александр Евгеньевич, нагруженный картами, чертежами и разрезами, направлялся к С. М. Кирову в Смольный,— пишет П. В. Виттенбург [2, с. 256],— вернувшись, с радостью говорил о том, что Сергей Миронович очень заинтересовался открытиями последних лет и обещал поддержку».

6 февраля 1929 г. на заседании Сырьевой секции Комитета по химизации народного хозяйства СССР при СНК СССР по докладу А. Е. Ферсмана и В. И. Влодавца было принято решение: «...а) признать за Хибинскими апатитовыми и пирротиновыми месторождениями общесоюзное значение с точки зрения проблемы развития фосфатно-туковой промышленности и добычи фосфорнокислых удобрений... в) просить ВСНХ СССР: 1) поручить Ленинградскому Обл. СНХ теперь же организовать изучение указанных месторождений...» [21, с. 282]. В марте 1929 г. ВСНХ СССР по докладу и от имени ЛОСНХ (И. П. Жуков) предложил выявить в течение одного лета качество породы и запасы Хибинского месторождения. В сентябре 1929 г. была окончена грунтовая дорога, связавшая месторождение с железной дорогой. 21 августа 1929 г. на заседании Президиума Комитета по химизации народного хозяйства СССР по информации А. Е. Ферсмана постановили: «1) Констатировать, что разведочные и исследовательские работы текущего года подтвердили все предварительные данные об условиях залегания и состава хибинских апатитов, а в отношении количества превзошли предположения... а потому промышленная разработка их приобретает громадное значение для развития туковой и стекольной промышленности Союза и для экспорта. 2) Поручить ВСНХ СССР и НКПС в срочном порядке проработать и разрешить вопрос о необходимости постройки жел.-дор. ветки к месторождению. 3) По окончании разведочных работ этого сезона поставить доклад о хибинских апатитах в повестку дня Президиума Комитета по химизации» [21, с. 283].

На Хибинских месторождениях апатита в 1928—1929 гг. Институтом по изучению Севера велись разведочные работы, которые возглавлял В. И. Влодавец. Предварительно установленные общие запасы месторождений при этом возросли во много раз и, по оценке В. И. Влодавца [3], достигли в 1928 г. 80—117 млн. т руды, а в 1929 г—300 млн. т с содержанием почти 25% P_2O_5. В 1929 г. начал буровые работы Научный институт по удобрениям (НИУ, Москва) с одновременной добычей руды [20].

Летом 1929 г. в Хибинах, дополнительно к указанным, работали уже 11 изыскательских экспедиций. 2 и 3 сентября 1929 г.

на совещании в пос. Кукисвумчорр начальники всех партий и специальная комиссия во главе с А. Е. Ферсманом констатировали безусловную перспективность и своевременность эксплуатации Хибинского апатитового месторождения.

Разведанным могло считаться лишь месторождение Кукисвумчорр, в верхней части которого при средней мощности 50 м запасы исчислялись в 10—20 млн. т апатит-нефелиновой породы со средним содержанием около 29—30% P_2O_5, а в нижней части мощностью до 150—180 м менее богатой руды насчитывалось в 3—4 раза больше. Вероятные же общие запасы Хибинских месторождений, по оценке А. Е. Ферсмана, достигли 500 млн. т [12].

Испытания обогатимости хибинской апатит-нефелиновой породы были развернуты в Институте «Механобр» (Ленинград) весной 1928 г. и были успешно закончены в 1930 г. Изучение технологии переработки хибинских апатитов проводилось в 1928—1929 гг. Государственным институтом прикладной химии (ГИПХ, Ленинград) и Научным институтом по удобрениям. В эти же годы исследовалась технология переработки нефелина и титаномагнетита — спутников апатита.

Благодаря кипучей энергии А. Е. Ферсмана к делу переработки хибинских апатитов и других минералов хибинской руды удалось привлечь С. И. Вольфковича, Э. В. Брицке, В. В. Ипатьева и многих других химиков, включая Н. В. Белова, исследовавшего возможность использования нефелина как дубителя [1].

В 1920—1929 гг. главное внимание геологи, географы и геохимики АН СССР уделяли работам в Хибинских и Ловозерских тундрах, в то же время проводилось изучение физико-географических особенностей и геологического строения всего Кольского полуострова. Руководителем всех работ был А. Е. Ферсман, возглавлявший ежегодные экспедиции на Кольском полуострове с 1920 по 1940 г.

4 октября 1929 г. А. Е. Ферсман доложил о Хибинских апатит-нефелиновых месторождениях на заседании Президиума Госплана РСФСР. По его сообщению постановили: «1. Признать за хибинскими апатитами по их химическим свойствам и величине запасов первостепенное значение как в деле обеспечения Союза ССР фосфорным сырьем, так и в развертывании нашего экспорта. 2. Считать обязательным заданием для 1929/30 гг.: а) закладку апатитовых рудников с общим масштабом добычи до 1.500 тыс. тонн; б) проведение железнодорожной ветви в район рудников с окончанием постройки не позднее 1 августа 1929 г.» [21, с. 284—285].

5 октября 1929 г. на совещании в Комитете по химизации народного хозяйства СССР был поставлен вопрос перед АН СССР о создании в Хибинских тундрах научно-исследовательской станции [21, с. 287]. В этот же день ЭКОСО РСФСР принял постановление, обязав ВСНХ РСФСР в недельный срок создать

полномочный хозяйственный орган для разработки Хибинских апатит-нефелиновых месторождений, а также о выделении 5 млн. руб., необходимых на 1929—1930 гг. для освоения хибинских апатитов. В нем также намечены конкретные мероприятия по переработке апатит-нефелиновой породы [21, с. 286—287].

В конце 1929 г. «С. М. Киров посетил Хибины,— пишет О. А. Воробьева [4, с. 268],— и в ночь на 1 января 1930 г. в первом бараке разведчиков у апатитовой горы (ныне Домик Кирова) состоялось заседание, которое положило начало промышленному освоению Хибин».

24—25 февраля 1930 г. объединенное заседание Сырьевой и Сельскохозяйственной секций Комитета по химизации народного хозяйства СССР по докладу А. Е. Ферсмана и другим (всего 12 докладов), констатировав успехи разведки на горе Кукисвумчорр, а также обогащения апатит-нефелиновой породы и переработки концентрата, постановило закончить разведку указанного месторождения в том же году и приступить к разведке средних месторождений на горах Юкспор и Расвумчорр; кроме того, было намечено провести ряд других мероприятий, включая подготовку строительства в 1930—1931 гг. на р. Ниве первой гидростанции, а также создание г. Хибиногорска и заселение Хибинского района.

Геологосъемочные работы средних масштабов в Хибинских и Ловозерских тундрах и различные изыскательские работы в Хибинах вели различные организации. А. Е. Ферсман принимал непосредственное участие во многих начинаниях, участвуя и руководя работой совещаний в Ленинграде [15, 16] и в Хибиногорске на «Тиэтте», координируя работы отдельных исследовательских партий, работавших в Хибинах.

В 1930 г. А. Е. Ферсман с Н. Н. Гутковой в предварительном порядке обследовал перидотит-пироксенитовые массивы района Нюд-озера в Монче-тундре, где проводились и небольшие магнитометрические работы. Хотя на поверхности скопления сульфидов никеля и меди обнаружены не были, А. Е. Ферсман дал заключение о перспективности этого района и настоял на проведении дальнейших работ. В 1931 г. М. Г. Шестопаловым (ЛГРТ) здесь были обнаружены убогие вкрапленные руды, а в 1936 г. И. В. Галкиным — богатые сульфидные жилы. В связи с рудопроявлением возник поселок Монча (с 1937 г.—г. Мончегорск).

Печатные работы А. Е. Ферсмана по запасам и освоению комплексного сырья Кольского полуострова многочисленны. Перечень их и краткая характеристика приведены в томе 1 книги «Геологическая изученность СССР» [5, 6]. Следует особо выделить две работы А. Е. Ферсмана: по геохимии, запасам и экономике апатита [14] и по запасам, применению и экономике нефелина (совместно с Н. И. Влодавцем) [19]. Схема размещения апатитовых месторождений в Хибинском щелочном массиве, данная в первой работе, сохранила значение и в наше время. Александр Евгеньевич осуществлял общую редакцию периодических

сборников «Хибинские апатиты» (за 1930—1934 гг. вышло семь томов). По убеждению А. Е. Ферсмана [19], сочетания полезных ископаемых подчинены определенным законам геохимии и сами эти законы подсказывают промышленные возможности геологических объектов, так как обнаруживают типические сочетания нерудных и рудных тел. Отсюда следует вывод о комбинированном использовании полезных ископаемых. Для Кольского полуострова А. Е. Ферсман предлагал создание крупного горно-химического комбината: апатит должен был перерабатываться в Хибиногорске, керамическое сырье — в низовьях Умбы, нефелин — в Кандалакшском химическом районе [11, с. 113—117].

В книге «Полезные ископаемые Кольского полуострова» [18] А. Е. Ферсман рассматривал Мурманскую область как ценнейший новый горно-промышленный район Советского Союза по географическому положению, источникам гидроэнергии, а главное — по сочетанию разнообразия видов минерального сырья и их запасов. Эта книга содержит не только геологические и геохимические сведения, но и необходимые промышленно-экономические характеристики. А. Е. Ферсман намечал на Кольском полуострове уже не один, а 10 геологических и горно-химических узлов. Вплоть до наших дней этот труд А. Е. Ферсмана является настольной книгой для всех исследователей, связанных с проблемами минерального сырья в этом регионе. Месторождения многих полезных ископаемых, отмеченных А. Е. Ферсманом, как вероятные или возможные на Кольском полуострове, уже перешли в категорию эксплуатируемых или подготавливаемых к эксплуатации.

Свыше 55 химических элементов находятся в недрах Кольского полуострова, из них 40 уже используются промышленностью. По запасам апатита и нефелина Кольский полуостров занимает первое место в стране. На базе его месторождений успешно работают комбинаты «Апатит», «Североникель», «Печенганикель», Ковдорский, Оленегорский, Африкандский и др., а также трест «Ковдорслюда» [7]. Характернейшей особенностью минерального сырья Кольского полуострова является его комплексность. Как правило, в руде каждого месторождения содержится несколько полезных минералов, а в рудных минералах — несколько полезных химических элементов [7].

Успехами наших геологических исследований мы во многом обязаны научному наследию А. Е. Ферсмана, который усматривал счастье ученого наших дней в том, чтобы «творческой мыслью и делом превращать все элементы и силы природы в величайшие достижения культуры и промышленности» [17, с. 66]. Замыслы А. Е. Ферсмана превратились в свершения советских людей. В г. Апатиты создан крупный научный центр Академии наук СССР — Ордена Ленина Кольский филиал АН СССР им. С. М. Кирова, объединяющий восемь научных учреждений. В г. Апатиты одна из улиц названа именем А. Е. Ферсмана; на

ней в день 50-летия Филиала в 1980 г. открыт памятник академику А. Е. Ферсману — выдающемуся ученому и гражданину Советского государства.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Белов Н. В.* Нефелин как дубитель.— В кн.: Хибинские апатиты. Л.: ГОНТИ, Ленхимсектор, 1931, т. 3, с. 100—107.
2. *Виттенбург П. В.* Открыватель Хибин.— В кн.: Александр Евгеньевич Ферсман: Жизнь и деятельность. М.: Наука, 1965, с. 254—258.
3. *Влодавец В. И.* Общая характеристика апатитовой дуги.— В кн.: Хибинские апатиты: Сборник. Л.: Гострест «Апатит», 1930, с. 38—47.
4. *Воробьева О. А.* Счастливый удел ученого.— В кн.: Александр Евгеньевич Ферсман: Жизнь и деятельность. М.: Наука, 1965, с. 266—275.
5. Геологическая изученность СССР. Мурманская область. Период 1800—1928. Опубликованные работы. Л.: Наука, 1972. Т. 1, вып. 1. 174 с.
6. Геологическая изученность СССР. Мурманская область. Период 1929—1940. Опубликованные работы. Л.: Наука, 1968. Т. 1. 434 с.
7. *Горбунов Г. И.* Проблемы комплексного использования минерального сырья Кольского полуострова.— В кн.: Проблемы минерального сырья. М.: Наука, 1975, с. 59—70.
8. *Кондриков В. И.* Современное состояние и перспективы развития строительства в районе хибинских разработок.— В кн.: Хибинские апатиты/Под ред. А. Е. Ферсмана. Л.: ГОНТИ, Ленхимсектор, 1932, т. 2, с. 6—31.
9. *Лабунцов А. Н.* Поисково-разведочные работы по апатиту в Хибинских тундрах — краткая история исследований, кончая 1929 г.— В кн.: Хибинские апатиты: Сборник. Л.: Гострест «Апатит», 1930, с. 28—38.
10. *Перельман А. И.* Александр Евгеньевич Ферсман. Научно-биогр. сер. М.: Наука, 1968. 295 с.
11. *Соловьянов Г. Н.* Кольский промышленный узел. М.; Л: Госэкономиздат, 1932. 124 с.
12. *Ферсман А. Е.* Апатито-нефелиновая проблема Хибинских тундр. Л.: ГХТИ, 1929. 96 с.
13. *Ферсман А. Е.* Уроки одного открытия. К вопросу об открытии хибинских апатитов.— Химия и хозяйство, 1929, № 2—3, с. 10—22.
14. *Ферсман А. Е.* Апатит, его месторождения, геохимия, запасы и экономика.— В кн.: Хибинские апатиты. Л.: ГОНТИ. Ленхимсектор, 1931, т. 3.
15. *Ферсман А. Е.* Ископаемое сырье Ленинградской области и его перспективы. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. 38 с.
16. *Ферсман А. Е.* Комплексное использование ископаемого сырья. Л.: Изд-во АН СССР, 1932. 20 с.
17. *Ферсман А. Е.* В. И. Ленин и изучение производительных сил СССР.— Вестн. АН СССР, 1940, № 4—5, с. 64—73.
18. *Ферсман А. Е.* Полезные ископаемые Кольского полуострова. Современное состояние. Анализ. Прогноз. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1941. 345 с.
19. *Ферсман А. Е., Влодавец Н. И.* Нефелин, его месторождения, запасы и экономика.— В кн.: Хибинские апатиты. Л.: ГОНТИ, Ленхимсектор, 1931, т. 3, с. 23—44.
20. *Фивег М. П.* Разведочные работы на части Кукисвумчоррского апатитового месторождения. Предварительные сведения, кончая 1929 г.— В кн.: Хибинские апатиты: Сборник. Л.: Гострест «Апатит», 1930, с. 47—67.
21. Хибинские апатиты: Сборник. Л.: Гострест «Апатит», 1930. 300 с.
22. Хибинские и Ловозерские тундры/Под ред. А. Е. Ферсмана. Л.: НХТИ, 1925. Т. 1. 197 с.
23. Хибинские и Ловозерские тундры/Под ред. А. Е. Ферсмана. Физико-географический очерк. Петрография. Месторождения. М.: НТУ ВСНХ, 1928. Т. 2. 398 с.
24. *Щербаков Д. И.* Неутомимый путешественник и географ.— В кн.: Александр Евгеньевич Ферсман. М.: Наука, 1965, с. 84—93.
25. *Эйхфельд И.* В Хибины за апатитами.— Карело-Мурманский край, 1927, № 2, с. 8—13.

УДК 001.92

Ф. В. ЧУХРОВ

АКАДЕМИК А. Е. ФЕРСМАН — РУКОВОДИТЕЛЬ КОМИССИИ ПО ГЕОЛОГО-ГЕОГРАФИЧЕСКОМУ ОБСЛУЖИВАНИЮ КРАСНОЙ АРМИИ

Все мы, близко соприкасавшиеся с Александром Евгеньевичем Ферсманом, восхищались не только его многогранной одаренностью и кипучей энергией, но и пронизывавшим его деятельность чувством горячего патриотизма.

В самом начале Великой Отечественной войны — в июле 1941 г. по инициативе Александра Евгеньевича была создана Комиссия по геолого-географическому обслуживанию Красной Армии при Отделении геолого-географических наук Академии наук СССР. Руководителем и Председателем этой Комиссии был Александр Евгеньевич. В работах Комиссии участвовали более 150 научных сотрудников, которые были объединены в восемь групп и две экспедиции. Участие в их деятельности геологов, географов, экономистов и других специалистов привело, по словам А. Е. Ферсмана, к тому, что разработка каждой проблемы производилась до конца, от геологии до технологии, с организацией практического осуществления идеи на заводах или на фронтах, при участии научных работников в непосредственной реализации предложений, их внедрении. В качестве одного из примеров успешной деятельности Комиссии можно указать на выявление месторождений маскировочных красок, значимость которых для огромной территории страны была исключительной. По просьбе Главного Управления противовоздушной обороны Борис Владимирович Залесский и Юрий Алексеевич Розанов в 1942 г. составили справочник маскировочных материалов прифронтовой полосы. Кирилл Павлович Флоренский предложил использовать для получения зеленой краски глауконит. Стоимость новой краски была в 15—20 раз ниже получаемой из окиси хрома.

В напряженные и трудные годы Великой Отечественной войны А. Е. Ферсман был примером ученого-гражданина, беспредельно любящего свою Родину. В брошюре «Война и стратегическое сырье» его кредо было выражено в следующих словах: «Наука не есть нечто самодовлеющее. Тысячами нитей она сплетается с мирным трудом, с военной техникой. Не всегда знаешь, где большую роль сыграет какое-либо открытие — в хозяйстве ли, или на поле сражения» [1, с. 56]. В развитие этого положения Александр Евгеньевич Ферсман сформулировал основные задачи в мобилизации геологических ресурсов страны для скорейшего разгрома врага. К ним отнесены: открытие новых месторождений стратегического сырья; увеличение запасов уже разрабатываемых месторождений, особенно вольфрама, молибдена, никеля, меди, титана, ниобия, марганца; тонкое химико-

минералогическое и технологическое изучение качества руд. Подчеркнута важность обнаружения строительных материалов и сырья для эвакуированных на восток предприятий, которые послужили основой быстрого усиления оборонного потенциала страны. Особенно много внимания А. Е. Ферсман в годы войны уделял Уралу, богатства которого он хорошо знал и называл сказочными.

Работы по мобилизации производительных сил Урала для нужд армии в период Великой Отечественной войны проводились под общим руководством Президента АН СССР академика В. Л. Комарова, который выдвинул лозунг объединения усилий различных ученых для решения задач добычи руд и металлургии. В этой работе он опирался на большой коллектив Института геологических наук АН СССР с мощной уральской группой, которая проводила экспедиционные работы в содружестве с местными геологами. Совместная работа минералогов, геохимиков и других представителей геологических наук привела к открытию новых богатств в недрах севера Урала и его южных районов. Душой этих и многих других важных для фронта и тыла работ был А. Е. Ферсман. Его голос непрестанно звучал призывом к активности во имя близкой победы. Свое обращение к геологам Советского Союза Александр Евгеньевич заканчивал страстными, глубоко западавшими в душу словами: «Нет прекраснее удела в жизни, чем бороться за свою Родину, за свободу, счастье и радость будущих поколений» [2, с. 40].

Радостное ощущение приближения победоносного окончания войны с гитлеровским фашизмом нашло у А. Е. Ферсмана выражение в широком развертывании активности, связанной с расширением сырьевых ресурсов страны для восстановления городов, сел и многочисленных предприятий. В этот период А. Е. отдает много сил развитию добычи печорского угля, участвует в решении вопросов обеспечения сырьем Череповецкого металлургического комбината.

В начале 1945 г. его захватили проблемы промышленного развития Мурманской области. Непрестанное творческое горение, основой которого являлась любовь к Родине, было свойственно А. Е. Ферсману до самых последних дней его жизни.

ЛИТЕРАТУРА

1. *Ферсман А. Е.* Война и стратегическое сырье. Красноуфимск: Госполитиздат, 1941. 63 с.
2. *Ферсман А. Е.* Геология и война. М.; Л.: Изд-во АН СССР, 1943. 44 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие 3

Ф. В. Чухров, Н. В. Петровская. Развитие идей А. Е. Ферсмана в современной минералогии 5

В. С. Урусов. Современные пути развития геоэнергетической теории А. Е. Ферсмана 20

Н. Н. Шефталь. Мечты и действительность (синтез кристаллов) . . 34

Б. Е. Боруцкий. Идеи академика А. Е. Ферсмана и современные проблемы Хибин 40

А. П. Хомяков. Минералогические особенности щелочных пегматитов Хибино-Ловозерской провинции 66

В. Л. Барсуков. Современные проблемы геохимии 83

А. И. Перельман. Пути развития геохимических исследований . . . 104

К. М. Феодотьев. О развитии отечественного эксперимента в минералогии и геохимии 121

Л. Н. Овчинников. Современное состояние прикладной геохимии . . 131

Ф. И. Вольфсон. Вопросы генезиса гидротермальных рудных месторождений 152

А. И. Гинзбург. Учение о пегматитах в свете современных знаний . 164

Г. А. Мирлин. Современные проблемы минеральных ресурсов . . . 192

В. П. Петров. Об истории и состоянии изучения неметаллического сырья 215

В. В. Иванов. Перспективы освоения ресурсов редких элементов . . 226

Б. И. Коган. Будущее редких элементов 240

Н. Ф. Челищев. Новые направления в технологии переработки редкометального сырья 260

Г. И. Горбунов, А. С. Сахаров. А. Е. Ферсман и его роль в развитии Кольского горнопромышленного комплекса 273

Ф. В. Чухров. Академик А. Е. Ферсман — руководитель Комиссии по геолого-географическому обслуживанию Красной Армии 280

УДК 549

Развитие идей А. Е. Ферсмана в современной минералогии. Чухров Ф. В., Петровская Н. В.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Фундаментальные труды А. Е. Ферсмана во многом определили современные направления минералогических исследований. Подтверждаются его представления о тесных взаимосвязях минералогии, геохимии, физической химии, об общих путях развития минералогии.

Сохраняют свое значение мысли А. Е. о сложности понятий «минерал», его «вид» и «разновидность». Взгляды А. Е. Ферсмана на кристаллические решетки минералов получили развитие в трудах академика Н. В. Белова и других ученых. Разрабатывается общая теория кристаллического поля. Интересовавшие А. Е. Ферсмана вопросы полиморфизма минералов приобрели новое значение в связи с исследованиями политипии. Активно развивается кристаллохимическое направление в минералогии, базирующееся на использовании тонких физических методов. Создано новое направление исследований, получившее название физики минералов. Использование методов электронной микроскопии и микродифракции электронов позволило доказать правильность предвидения А. Е. Ферсмана о широкой распространенности неоднородных выделений минералов и дать их характеристики.

Идеи А. Е. легли в основу формирующегося в последние десятилетия учения о типоморфизме; определились задачи и методы исследований зависимостей в этой области. Результаты исследований по типоморфизму все шире используются в практике поисков и разведки минеральных месторождений. Реализуется пожелание А. Е. по объединению сил минералогов нашей страны: активно работают Всесоюзное минералогическое общество и его отделения. Библиогр. 29 назв.

УДК 548.3 : 550.4

Современные пути развития геоэнергетической теории А. Е. Ферсмана. Урусов В. С.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Очерчена роль А. Е. Ферсмана — создателя геоэнергетического анализа природных процессов как самостоятельного направления геохимической мысли и одного из родоначальников энергетической кристаллохимии. Прослеживается полувековой путь развития основных идей А. Е. Ферсмана, относящихся к этой пограничной области знания. Показано, что в соответствии с предсказаниями А. Е. Ферсмана способы количественного решения многих из поставленных им минералогических и геохимических проблем даются аппаратом современной энергетической кристаллохимии. Библиогр. 26 назв.

УДК 549.7 : 548.5

Мечты и действительность (синтез кристаллов). Шефталь Н. Н.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Отмечается роль А. Е. Ферсмана в постановке синтеза кристаллов. Разбирается научное направление и особенно синтез технически ценных кристаллов, таких, как искусственный пьезокварц, слюда, стержни, из которых изготовляются нитеводители, кристаллы для лазеров. Отмечается актуальность работ по выращиванию кристаллов. Библиогр. 28 назв.

УДК 549.6 : 552.33

Идеи академика А. Е. Ферсмана и современные проблемы Хибин. Боруцкий Б. Е.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Современное состояние изученности Хибинского массива, проблемы и задачи геолого-петрологических и минералого-геохимических исследований его пород и минералов, направленные на совершенствование и расширение базы фосфатной промышленности, рассматриваются в плане развития соответствующих идей А. Е. Ферсмана. Показано, что ряд высказанных А. Е. Ферсманом гипотез и предположений блестяще оправдались, а сформированные им проблемы и задачи, намеченные им пути и решения не потеряли своего руководящего значения и на современном этапе. Особое значение приобретают в настоящее время рекомендации А. Е. Ферсмана о комплексном использовании хибинских апатит-нефелиновых руд, а также об охране уникальных щелочных минеральных комплексов Кольского полуострова как ценнейших памятников природы. Ил. 3. Библиогр. 42 назв.

УДК 549.6 : 552.33

Минералогические особенности щелочных пегматитов Хибино-Ловозерской провинции. Хомяков А. П.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

В глубоких зонах щелочных массивов рассматриваемой провинции в период с 1970 по 1982 г. сотрудниками ИМГРЭ и других организаций установлено около 50 новых минералов, среди которых преобладают силикаты и фосфаты: Na, K, Sr, Ba, TR, Ti, Nb, Zr. Основная их часть приурочена к ультраагпаитовым пегматитам и гидротермалитам — новому типу дериватов нефелиновых сиенитов. Полученные результаты резко расширяют представления о формах концентрации фосфора и редких элементов в земной коре. Табл. 3. Библиогр. 27 назв.

УДК 550.4

Современные проблемы геохимии. Барсуков В. Л.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Излагается развитие геохимии процессов рудообразования, прикладной геохимии, геохимии глубинных зон Земли, космохимии. У истоков этих направлений стоял А. Е. Ферсман, сейчас они шагнули далеко вперед. Показано разнообразие источников рудного вещества и задачи, стоящие перед геохимиками. Одним из методов познания глубин Земли является моделирование, его приложение должно быть расширено. Показано расширение данных о глубинах Земли, а также об океаническом дне. Приведены новые данные о космохимии. Ил. 5. Библиогр. 35 назв.

УДК 550.4

Пути развития геохимических исследований. Перельман А. И.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука. 1983 г.

Развитие идей геохимии, практическое применение этой науки во многом связаны с деятельностью А. Е. Ферсмана. Освещается вклад ученого в теорию и практику геохимии. Охарактеризованы современные представления по важнейшим ее разделам: распространенности элементов (кларки), миграции химических элементов в земной коре, радиогеологии и геохимии изотопов, геохимии рудных месторождений, региональной геохимии, геохимии отдельных элементов, исторической геохимии, прикладной геохимии. В заключение даются руководящие идеи и перспективы развития геохимии. Библиогр. 42 назв.

УДК 550.84

О развитии отечественного эксперимента в минералогии и геохимии. Феодотьев К. М.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Показаны в исторической последовательности развитие экспериментальной минералогии: термический анализ (кривые нагревания и обезвоживания), совершенствование синтеза минералов в сухих расплавах и в гидротермах; развитие экспериментальной геохимии: миграция атомов в растворах, формирование растворов, растворимость газов, теоретические работы. Библиогр. 38 назв.

УДК 550.8

Современное состояние прикладной геохимии. Овчинников Л. Н.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Основой прикладной геохимии — геохимии индикаторов — являются закономерности распределения в пространстве и времени химических элементов-примесей, передающихся через кларки, и проявления закона многоликой геохимической зональности. На это опираются различные методы геохимических поисков, раскрытия геохимических закономерностей внутреннего строения рудных тел, металлогении и прогноза, генетической интерпретации разнообразных геологических процессов, геохимической оценки загрязнения окружающей среды. Ил. 3. Библиогр. 42 назв.

УДК 553.2

Вопросы генезиса гидротермальных рудных месторождений. Вольфсон Ф. И.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

А. Е. Ферсман при выяснении вопросов генезиса месторождений особое внимание обращал на выявление связи оруденения с магматизмом и тектоникой. Проанализировано современное состояние этих вопросов. Сделана попытка различать месторождения, оруденение которых связано с периферическими гранитными и нижними базальтоидными очагами. Последние возникают в условиях проникновения разломов до верхней мантии. Тектонические условия формирования оруденения определяются его положением в различных структурных этажах. Библиогр. 5 назв.

УДК 551.322.2 : 553.064

Учение о пегматитах в свете современных знаний. Гинзбург А. И.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Гранитные пегматиты образуются в различных структурных этажах земной коры различными путями — благодаря локальному обогащению апикальных участков гранитных куполов летучими соединениями (хрусталеносные пегматиты), вследствие далеко зашедшей дифференциации гранитных комплексов и образования остаточных магм (редкометальные, частично слюдоносные пегматиты), при процессах ультраметаморфизма (слюдоносные, керамические или редкоземельные пегматиты). Современные данные подтверждают представления А. Е. Ферсмана о происхождении пегматитов в условиях относительно замкнутой системы. Процесс начинается как магматический, проходит через надкритический этап — сосуществование силикатного расплава, предельно насыщенного водой, с водным флюидом, и завершается как гидротермальный. В гипабиссальных условиях возникают аналоги пегматитов — «редкометальные» граниты и онгониты. Табл. 2. Ил. 2. Библиогр. 38 назв.

УДК 553.042.(091)

Современные проблемы минеральных ресурсов. Мирлин Г. А.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Показана динамика использования минерального сырья: за последнее 20-летие из недр планеты извлечено свыше 40—70% полезных ископаемых. Наблюдается тенденция увеличения добычи. В капиталистических странах предполагается недостаток сырья в ближайшем будущем. Экономика СССР, развивающаяся на собственной сырьевой базе, не имеет явлений кризиса сырья. Дана перспектива роста резерва полезных ископаемых. Указано на многогранность проблемы ресурсов. Табл. 2. Ил. 1. Библиогр. 16 назв.

УДК 553.6

Об истории и состоянии изучения неметаллического сырья. Петров В. П.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

В XVIII и XIX вв. в России существовала крупная промышленность неметаллических полезных ископаемых, обеспечивавшая сырьем почти все потребности хозяйства. Во второй половине XIX в. возник процесс его замены стандартизированным заграничным. В начале XX в. в царскую Россию ввозили почти все виды неметаллического сырья. В первые годы после революции началось создание сырьевой базы нерудной промышленности. В этом процессе велика роль А. Е. Ферсмана. Сейчас Советский Союз обладает всеми видами неметаллического минерального сырья, но необходимы в дальнейшем большие геологические работы по поискам новых месторождений. Библиогр. 20 назв.

УДК 553.042

Перспективы освоения ресурсов редких элементов. Иванов В. В.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Рассмотрена роль А. Е. Ферсмана в развитии редкометальной сырьевой базы, предложены методы прогнозной оценки минеральных сырьевых ресурсов редких металлов и возможное увеличение потребностей в них с учетом новых областей применения. Проведено сопоставление прогнозных ресурсов с перспективными потребностями зарубежных стран в редких металлах. Табл. 1. Библиогр. 25 назв.

УДК 553.042

Будущее редких элементов. Коган Б. И.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

В 1932 г. А. Е. Ферсман прозорливо предсказал предстоящее теоретическое, химическое и геохимическое значение проблемы редких элементов, ее большую роль в технике будущего. За прошедшие с тех пор 50 лет этот прогноз полностью подтвердился — РЗ прочно вошли в современную технику. Они эффективно используются в черной и цветной металлургии, производстве легких, специальных и сверхтвердых сплавов и в других производствах и разных отраслях хозяйства. Значительно расширились сырьевые ресурсы, добыча и производство РЗ и феноменально расширился их научный потенциал. Ил. 2. Табл. 4. Библиогр. 57 назв.

УДК 549.6

Новые направления в технологии переработки редкометального сырья. Челищев Н. Ф.— В кн. Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Дан анализ современного состояния технологии переработки редкометального сырья и приведены новые данные об извлечении редких элементов из нетрадиционных сырьевых источников. Намечены новые направления в технологии переработки редкометального сырья, основанные на изучении технологических свойств редкометальных минералов. Показана важная роль ионного обмена на стадии вскрытия руд и получения товарных продуктов, а также при решении природоохранных задач. Табл. 5. Библиогр. 9 назв.

УДК 549.75 : 553.641

А. Е.Ферсман и его роль в развитии Кольского горнопромышленного комплекса. Горбунов Г. И., Сахаров А. С.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

Дается краткий обзор развития района Кольского полуострова и его хозяйственного освоения. В 20-х годах открыто коренное залегание апатита. К концу 20-х годов при энергичных действиях А. Е. Ферсмана началось освоение Хибин. Позднее, при картировании, выявлены многие полезные ископаемые. Показано, что ценность горно-рудной промышленности Кольского полуострова — в ее комплексности. Библиогр. 25 назв.

УДК 001.92

Академик А. Е. Ферсман — руководитель Комиссии по геолого-географическому обслуживанию Красной Армии. Чухров Ф. В.— В кн.: Развитие минералогии и геохимии и их связь с учением о полезных ископаемых. М.: Наука, 1983 г.

По инициативе А. Е. Ферсмана в июле 1941 г. была создана Комиссия по геолого-географическому обслуживанию Красной Армии при Отделении геолого-географических наук АН СССР. В работе Комиссии участвовало более 150 научных сотрудников, которые были объединены в восемь групп и две экспедиции. Разработка каждой проблемы проводилась от геологии до технологии. Одним из примеров деятельности Комиссии было выявление маскировочных красок. Особенно много внимания А. Е. Ферсман уделял работам по мобилизации для нужд обороны производительных сил Урала. Библиогр. 2 назв.

РАЗВИТИЕ МИНЕРАЛОГИИ
И ГЕОХИМИИ
И ИХ СВЯЗЬ
С УЧЕНИЕМ
О ПОЛЕЗНЫХ ИСКОПАЕМЫХ

Утверждено к печати
Отделением геологии, геофизики и геохимии

Редактор Т. А. Николаева
Художник Ф. Н. Буданов
Художественный редактор М. В. Версоцкая
Технический редактор С. Г. Тихомирова
Корректоры Д. Ф. Арапова, Л. П. Стрельчук

ИБ № 27281

Сдано в набор 03.01.83
Подписано к печати 12.04.83
Т-09302. Формат 60×90$^{1}/_{16}$
Бумага типографская № 1
Гарнитура литературная
Печать высокая
Усл. печ. л. 18. Усл. кр. отт. 18,12
Уч.-изд. л. 21,7. Тираж 1200 экз. Тип. зак. 4408
Цена 3 р. 60 к.

Издательство «Наука»
117864 ГСП-7, Москва, В-485, Профсоюзная ул., 90
2-я типография издательства «Наука»
121099, Москва, Г-99, Шубинский пер., 10

В ИЗДАТЕЛЬСТВЕ «НАУКА»

готовятся к печати книги:

Ударные кратеры на Луне и планетах. 20 л. 3 р. 40 к.

В книге дана сравнительная характеристика ударных кратеров Луны, Марса, Меркурия и Земли. Описываются закономерности строения этих кратеров в зависимости от их размеров и возраста. Рассмотрены проблемы формирования и эволюции кратерных популяций на поверхности планетных тел. Описаны строение ударных кратеров Земли и особенности вещественного состава продуктов ударного процесса. Показана важная роль ударного морфолитогенеза в преобразовании оболочек планетных тел земного типа на ранних этапах их эволюции.

Вернадский В. И. **Очерки геохимии.** 30 л. 4 р. 80 к.

Классический труд В. И. Вернадского является важным пособием для понимания основ геохимии и истории ее развития. В настоящее время книга особенно актуальна в связи с новыми идеями космохимии и вопросами теории охраны биосферы, которые привлекают внимание всего человечества.

Книги можно предварительно заказать в магазинах Центральной конторы «Академкнига», в местных магазинах книготоргов или потребительской кооперации.

Для получения книг почтой заказы просим направлять по адресу: 117192 Москва, Мичуринский проспект, 12, магазин «Книга — почтой» Центральной конторы «Академкнига»; 197345 Ленинград, Петрозаводская ул., 7, магазин «Книга — почтой» Северо-Западной конторы «Академкнига» или в ближайший магазин «Академкнига», имеющий отдел «Книга — почтой».

3928