Записки Ленинградского орденов Ленина и Трудового Красного Знамени горного института им. Г. В. Плеханова, т. LVI, вып. 2, 1969 г.

УСПЕХИ ПРИКЛАДНОЙ ГЕОХИМИИ

Н. К. Морозенко, Е. М. Квятковский

Геохимия, как наука, изучающая химию Земли в ее историческом развитии, зародилась в конце XIX в. и окончательно оформилась в качестве самостоятельной отрасли в начале следующего столетия, главным образом, благодаря трудам наших соотечественников — В. И. Вернадского и А. Е. Ферсмана, а также В. М. Гольдшмидта, Ф. У. Кларка и Х. С. Вашингтона. Дальнейшее развитие геохимии обязано исследованиям А. П. Виноградова, А. А. Саукова, В. В. Щербины и др. Практическое использование общих положений, сформулированных в трудах основателей этой науки, началось также в нашей стране в годы первой пятилетки.

Прикладная геохимия прошла сложный путь развития и в настоящее время занимает прочное место в общем комплексе геологических исследований. Круг вопросов, объединяемых понятием *прикладная геохимия,* весьма широк. Рассмотрим основные из них: геохимические методы при геологических исследованиях в рудных районах и составление геохимических карт; геохимические методы поисков рудных месторождений полезных ископаемых.

Геохимические методы при геологических исследованиях и составление геохимических карт. Быстрому развитию прикладной геохимии в нашей стране способствовала все нарастающая потребность в выявлении запасов минеральных ресурсов для удовлетворения нужд промышленности. Переход геологической службы страны от мелкомасштабных геологических съемок и поисков к средним и крупным, особенно в рудных провинциях, потребность научно обоснованного прогнозирования и направления поисков, необходимость выявления полезных ископаемых на закрытых площадях требовали разработки и совершенствования научных основ геологической съемки, поисков, металлогенических исследований. Новым качеством в решении этой задачи является комплексное применение различных геологических методов, среди которых существенное место занимает прикладная геохимия. О значении и внимании к прикладной геохимии и накоплении солидного опыта в этой области свидетельствуют проведенные в последнем десятилетии Всесоюзные конференции и совещания по геохимическим методам поисков, организованные Министерством геологии и Академией наук СССР.

Развитие прикладной геохимии началось с разработки отдельных направлений в трудах А. Е. Ферсмана, Н. И. Сафронова, В. А. Соколова и др. В обобщающей работе «Геохимические и минералогические

методы поисков полезных ископаемых» (1939) А. Е. Ферсман рассмотрел представления о геохимических эпохах и провинциях, применение геохимических методов при геологических исследованиях и основные задачи и принципы составления геохимических карт.

Созданное В. И. Вернадским и А. Е. Ферсманом регионально-геохимическое направление развито А. А. Сауковым и другими учеными, показавшими геохимическую специализацию элементов и их групп в ходе геологического развития земной коры и отдельных провинций. Это направление, развитое в трудах Ю. А. Билибина и коллектива работников Всесоюзного геологоразведочного института, создавших учение о металлогенических эпохах и провинциях и закономерностях концентрации рудных полезных ископаемых в ходе геологического развития складчатых областей и платформ, дало научную основу для оценки перспектив рудоносности провинций, районов и структурно-металлогенических зон.

Существенное развитие получило применение геохимических методов при исследовании геологических объектов и геологической съемке. С помощью этих методов осадочные породы изучали Н. М. Страхов, А. Б. Ронов, С. М. Катченков и др. На основании этих методов выявляются геохимические особенности стратиграфических разрезов, сопоставляются свиты, толщи и горизонты осадочных и вулканогенных образований.

В значительной мере разработаны методы корреляции по геохимическим данным магматических и особенно интрузивных массивов, интрузивных комплексов, выяснены геохимические критерии связи оруденения с интрузиями или интрузивными комплексами по парагенетическим группам элементов и элементам-примесям, их поведение и миграция в истории развития магматических и гидротермальных процессов. На этой основе в ряде регионов выделены рудоносные комплексы интрузивов и установлены их геохимические особенности.

Л. В. Таусон, В. Л. Барсуков, А. В. Рабинович и ряд других исследователей показали значение изучения форм нахождения элементов-примесей в породе. По распространению элементов-примесей в породообразующих и акцессорных минералах установлены особенности рудоносных гранитов в некоторых металлогенических зонах: олововольфрамовых, молибденовых и полиметаллических.

Большое значение для решения этих вопросов и успешного применения геохимических методов при геологических и металлогенических исследованиях имеют последние работы Н. И. Сафронова, введенное и обоснованное им понятие «первично-конституциональное рассеяние элементов». Изучение первично-конституционального рассеяния позволяет установить геохимические провинции, коррелировать разрозненные выходы пород (осадочных, изверженных и метаморфических), оценивать перспективы рудоносности интрузий и т. д. В коллективной работе «Критерии связи оруденения с магматизмом применительно к изучению рудных районов» (Е. Т. Шаталов, В. С. Коптев-Дворников и др., 1965) и в труде «Генетическая связь оруденения с гранитоидными интрузиями» (Х. М. Абдуллаев, 1954) рассмотрены геохимические критерии такой связи.

Накопление материала способствовало появлению методических работ по применению геохимических исследований при геологической съемке и поисках в детальных масштабах. Это работы А. А. Беуса, С. В. Григорьяна и других. Теоретические исследования А. П. Виноградова и А. И. Тугаринова по изотопам различных элементов вызвали в практике применение этого метода анализа для корреляции интру-

зивных массивов и решения вопроса о генетической связи с интрузивными комплексами оруденения, а также для освещения некоторых генетических вопросов.

Советская страна — родина металлогенической науки — занимает передовые позиции в этой области учения о полезных ископаемых. Это новое направление, выявляющее закономерности распределения полезных ископаемых в пространстве и времени, является основой их прогнозирования и определения перспективных площадей для поисков. В металлогенических построениях и при составлении металлогенических карт разных, особенно детальных масштабов все большее место занимают геохимические методы. Обобщение в этой области дано в работе «Применение геохимических методов при металлогенических исследованиях рудных районов» (И. И. Гинзбург и др., 1966).

Большая роль в металлогенических исследованиях и прогнозировании принадлежит геохимическим картам. Излагая основные принципы составления геохимических карт, А. Е. Ферсман еще в 1939 г. отмечал, что выдвинутые им положения скорее напоминают план будущих работ, чем проверенную и разработанную методику. Оживленный интерес к геохимическим картам, к разработке методики их составления проявился лишь в последние годы, когда, во-первых, возросла потребность прогнозирования оруденения на глубину и на закрытых площадях и, во-вторых, повысилась точность спектральных и других массовых анализов геохимических проб.

Принципы и методика составления общих геохимических карт для коренных пород изложены Ю. Н. Капковым, Е. М. Квятковским, В. И. Яковлевым (Зап. Ленинградского горного института, т. LI, вып. 2, 1966). Они составили общую и моноэлементную геохимические карты для оловоносного района. В несколько ином варианте разработали методику и составили геохимические карты для других районов А. А. Смыслов, В. И. Казмин и Н. В. Орлов.

Геохимические карты демонстрируют геохимическую специализацию структурных ярусов, разновозрастных осадочно-вулканогенных толщ, магматических комплексов и их рудных производных, характер миграции парагенных ассоциаций элементов в истории геологического развития района. В ряде случаев они сами по себе дают возможность прогнозировать распространение полезных ископаемых, а в общем являются важной составной частью общего сложного комплекса карт и данных геологических, структурных, петрографических, минералогических и т. д. На этих данных базируется составление прогнозно-металлогенических карт, определяющих перспективы рудоносности и направление поисковых работ.

Геохимические методы поисков месторождений полезных ископаемых. Геохимические методы поисков основаны на изучении и использовании закономерностей распределения и миграции химических элементов в процессе формирования и разрушения месторождений полезных ископаемых. Возникновение этих методов обычно связывают с именами Н. И. Сафронова и В. А. Соколова, которые еще в начале 30-х годов предложили использовать ореолы рассеяния вокруг рудных и нефтегазовых месторождений с целью повышения надежности расшифровки геофизических аномалий и прямых поисков месторождений. В дальнейшем четко обозначились две основные ветви развития геохимических методов поисков — разработка методов поисков рудных месторождений и методов поисков нефтяных месторождений. За рубежом геохимические методы поисков как рудных, так и нефтегазовых месторождений начали развиваться примерно на 5—10 лет позже. По

данным публикаций, отставание сохраняется и поныне — по основным вопросам методики и особенно объемам работ.

По общепринятой в Советском Союзе классификации В. И. Красникова, геохимические методы поисков рудных месторождений подразделяются на: литохимические (по первичным ореолам в коренных породах, по вторичным ореолам рассеяния и по потокам рассеяния в рыхлых отложениях); гидрохимические (по ореолам и потокам рассеяния в подземных и поверхностных водах); биохимические (по ореолам рассеяния в растениях, по ореолам рассеяния в животных организмах); атмохимические (по ореолам рассеяния в почвенном воздухе, по потокам рассеяния в приземном слое атмосферы).

Литохимические методы занимают ведущее место среди других геохимических методов поисков. Ежегодно на территории Советского Союза отбирается 6—7 млн. литохимических проб, и только десятки тысяч проб относятся к другим методам.

Литохимические методы поисков по первичным ореолам занимают все более важное место среди других литохимических методов, так как они направлены на решение задачи поисков скрытых на значительной глубине рудных тел. С каждым годом это приобретает особое значение в районах действующих горнорудных предприятий. В основу теории этих методов положены представления С. С. Смирнова, Д. С. Коржинского, Ю. А. Билибина, В. И. Смирнова и других исследователей о зональном строении рудных тел. Применительно к геохимическим поискам глубокозалегающих месторождений процесс формирования первичных ореолов анализировали А. А. Сауков, который обратил внимание на наличие первичных ореолов ртути у многих гидротермальных месторождений, Н. И. Сафронов, который рекомендовал использовать при изучении первичных ореолов элементы «широкого рассеяния» (иода, брома) и изотопный состав легких элементов (бора, лития). В работах А. П. Соловова и Р. И. Дубова сделаны первые шаги в количественной оценке основных параметров первичных ореолов эндогенных месторождений.

Трудами Н. Н. Сочеванова, Каблукова, С. В. Григоряна, Н. А. Озеровой, В. З. Фурсова, Р. В. Поликарпочкина, К. М. Муканова, Е. М. Квятковского и многих других геологов и геофизиков разработана и внедрена методика исследования первичных ореолов применительно к различным типам эндогенных месторождений — урановых, ртутно-сурьмяных, полиметаллических, золоторудных, медноколчеданных, медноникелевых, оловянных и др.

До последнего времени все исследования как теоретического, так и практического характера касались первичных ореолов эндогенных месторождений. Осадочные же месторождения, роль которых в общем балансе промышленных месторождений достаточно велика, до сих пор оставались фактически вне поля зрения поисковой геохимии. Общие теоретические положения, на базе которых могут и, несомненно, в ближайшем будущем будут развиваться литохимические методы поисков экзогенных месторождений по их первичным ореолам, рассмотрены в трудах Н. М. Страхова, Л. В. Пустовалова, А. И. Перельмана и др.

Литохимические методы поисков по вторичным ореолам и потокам рассеяния достаточно хорошо разработаны для широкого круга рудных месторождений в различной ландшафтно-геохимической обстановке. Основой для районирования территории Советского Союза по условиям проведения литохимических поисков по вторичным ореолам и потокам рассеяния служит учение о геохимических ландшафтах, созданное Б. Б. Полыновым и развитое для геохимических поисков

А. И. Перельманом, под редакцией которого составлены карты (1 : 4000000) геохимических ландшафтов СССР и условий геохимических поисков. Для отдельных регионов (например, Урала, Казахстана, Кольского полуострова) ландшафтно геохимические исследования с поисковым уклоном проводили М. А. Глазовская, М. М. Ермолаев, В. В. Добровольский и др. Теоретические основы литохимических методов поисков по вторичным ореолам и потокам рассеяния разрабатывались Н. И. Сафроновым, впервые предложившим классификацию вторичных ореолов рассеяния, А. П. Солововым, показавшим реальную возможность и целесообразность применения количественных расчетов при анализе процессов формирования ореолов и потоков рассеяния и при их геологической интерпретации, И. И. Гинзбургом, рассмотревшим процесс формирования ореолов рассеяния с точки зрения более общих закономерностей формирования коры выветривания в различных климатических зонах, Н. В. Квашневской, Н. Н. Сочевановым, Ю. В. Шарковым, Е. М. Квятковским и др.

Методика поисков рудных месторождений по вторичным ореолам и потокам рассеяния для различных типов месторождений в различной ландшафтно-геохимической обстановке рассмотрена в работах Е. А. Сергеева, С. Д. Миллера, Н. Ф. Майорова, М. Н. Афанасьева, Г. С. Вахромеева, Д. Л. Поскотина, О. А. Савадского и многих других геологов и геофизиков. В связи с завершением поисковых литохимических съемок на площадях развития так называемых открытых вторичных ореолов рассеяния в наиболее изученных рудных районах (Казахстане, Забайкалье, Южном Урале и др.) встал вопрос о разработке и внедрении глубинных литохимических поисков. В этом направлении большие успехи были достигнуты, например, А. Н. Еремеевым, А. П. Солововым в Казахстане, И. Р. Заворотных в Забайкалье. Темпы развития глубинных литохимических поисков в ближайшие годы, несомненно, будут возрастать.

Гидрохимические методы поисков в массовом масштабе стали применяться в Советском Союзе лишь около пятнадцати лет назад. В трудах А. М. Овчинникова, А. А. Бродского, Г. Б. Свешникова, С. Р. Крайнова, П. А. Удодова, Е. Е. Беляковой, А. И. Германова, Г. А. Голевой и других геологов, геохимиков и гидрогеологов этот метод получил прочное теоретическое обоснование, которое продолжает совершенствоваться и углубляться. По сравнению с литохимическими методами гидрохимические поиски характеризуются большей глубинностью, ограниченной практически глубиной циркуляции подземных вод. В настоящее время наиболее разработана методика гидрохимических поисков сульфидных месторождений, залегающих в зоне интенсивного водообмена горно-складчатых областей. Однако несомненна возможность использования этих методов при поисках практически всех типов рудных месторождений в районах с любым климатом и рельефом. По мере совершенствования химико-аналитической базы все более расширяется круг элементов, обнаруживаемых в гидрохимических ореолах и потоках рассеяния. В последние годы получены положительные результаты при проведении гидрохимических поисков месторождений олова, вольфрама, ниобия, циркония, хрома и др. Доказано существование в гидрохимических ореолах рассеяния золота. Дальнейшее развитие гидрохимических методов требует перехода к глубинным съемкам с отбором проб из подземных вод в местах, обусловленных особенностями формирования гидрохимических ореолов рассеяния в данной геологической обстановке. Значительно большее внимание должно уделяться и режимным наблюдениям, без учета которых невозможно совершенствование ин-

терпретации результатов поисковых гидрохимических исследований. Так же как и при поисках скрытых рудных тел по первичным ореолам, огромную роль при гидрохимических поисках играет зональность водных ореолов, которая в сочетании с изменением ореола во времени позволяет получить более полную информацию о расстоянии до рудного тела и его вещественном составе.

Биохимические методы поисков опираются на общие теоретические положения, изложенные в трудах А. П. Виноградова и Б. Б. Полынова. Развитие теории и особенно методики биохимических поисков связано с трудами Д. П. Малюги, С. М. Ткалича, В. В. Поликарпочкина, в которых обобщен многолетний опыт работ в районах Урала, Восточной Сибири и Забайкалья. Биохимические методы поисков особенно эффективны в районах, где в силу тех или иных причин использование лито- и гидрохимических методов затруднено. Такие условия встречаются главным образом в районах с аридным климатом на участках, перекрытых аллохтонными отложениями. В этих районах в последние годы получены положительные результаты при биохимических поисках золоторудных месторождений (Средняя Азия) и редкометальных месторождений (Восточное Забайкалье). Интересна также рекомендация применения биохимических методов поисков в зимних условиях в районах развития многолетней мерзлоты на заболоченных (маревых) площадях. Широкая проверка этой рекомендации — дело ближайшего будущего.

Атмохимические методы поисков по ореолам рассеяния в почвенном воздухе нерадиоактивных газов (He, CO_2, O_2, N_2, Hg) по существу не вышли еще из стадии экспериментально-теоретической разработки. Интерес к ним в последнее время несколько повысили работы И. А. Петерсилье, А. И. Фридмана по исследованию состава газов в эндогенных образованиях, А. Г. Граммакова, И. М. Хайковича — по теории формирования гелиевых ореолов рассеяния, В. С. Глебовской, Н. Н. Куликовой — по практическому изучению и использованию ореолов гелия и углекислоты в подпочвенном воздухе ряда месторождений, В. З. Фурсова — по ореолам ртути.

Техника и методика геохимических поисков. Развитие геохимических методов поисков во многом определяется уровнем техники отбора и обработки геохимических проб, особенно методов анализа. Существуют достаточно удачные образцы агрегатов для глубинного (до 20 *м*) отбора литохимических проб (виброагрегаты, гидрозадавливатели), механической обработки (дробилки, истиратели и т. д.). С каждым годом обеспеченность партий и экспедиций современной техникой по отбору и обработке все улучшается. На очереди стоит вопрос разработки техники глубинного отбора гидрохимических проб. С самого момента возникновения геохимические методы поисков в Советском Союзе базировались на использовании главным образом спектрального анализа, методика которого применительно к анализу горных пород и руд разработана В. К. Прокофьевым еще в начале 30-х годов. Дальнейшее совершенствование методов спектрального анализа при геохимических исследованиях связано с трудами А. К. Русанова, М. М. Клера, С. М. Катченкова, Е. А. Сергеева, П. А. Степанова, В. В. Хохлова и др. В настоящее время спектральные лаборатории оснащены современной отечественной аппаратурой (дифракционными спектрографами, микрофотометрами, спектропроекторами и т. д.), полуавтоматическими и автоматическими установками для массового анализа порошковых проб конструкции А. К. Русанова, Ю. А. Копейкина, В. Г. Теплякова и др. Производительность установок достигает многих сотен проб

в день. По этому же пути развивались и методы анализа гидрохимических проб. Основной объем выполняется спектральным методом. Анализ сухого остатка, благодаря трудам В. Б. Алесковского, А. Д. Миллера, П. А. Удодова, И. Л. Онуфриенок, почти полностью заменен анализом различных сорбентов, извлекающих из воды растворенные в ней элементы.

Наряду со спектральными методами, Е. А. Сергеевым, А. Д. Миллером, Н. Ф. Майоровым, Н. И. Бродской развивались различные микрохимические методы при литохимических поисковых исследованиях и еще более широко — А. А. Резниковым, Е. П. Муликовской, А. Д. Миллером, А. И. Марковой, Г. Н. Поповой, И. Ю. Соколовым — при анализе гидрохимических проб. Широкую известность получили полевые гидрохимические лаборатории.

Различные модификации перспективных ядерно-физических методов анализа пока не нашли широкого применения в практике поисковых геохимических работ главным образом в связи с низкой чувствительностью анализа при использовании безопасных в работе источников излучения. Практически пока завершена только разработка ядерных методов анализа на бор и бериллий. Интересные результаты получены в Узбекистане при использовании активационного анализа на золото при поисках по вторичным лито- и биохимическим ореолам рассеяния. Чувствительность анализа на золото при облучении проб в ядерном реакторе достигает 10^{-8}%, что на один-два порядка выше, чем специальных методик спектрального анализа.

Математические методы при геохимических исследованиях привлекают все большее и большее внимание в связи с необходимостью, во-первых, обработки, обобщения и расшифровки огромного количества информации, содержащейся в результатах анализа многих тысяч и десятков тысяч проб и, во-вторых, разработки и внедрения количественных методов интерпретации геохимических данных. Первая задача решается главным образом использованием различных методов математической статистики. Значительные успехи в этом направлении, включая использование электронных вычислительных машин, достигнуты благодаря трудам А. Б. Вистелиуса, Н. К. Разумовского, В. В. Налимова, А. Д. Родионова, Ю. К. Буркова, М. И. Толстого и др. Вторая задача связана с разработкой методов математического анализа процессов образования месторождений полезных ископаемых, их первичных и вторичных ореолов и потоков рассеяния. В этом направлении интересные результаты получены Н. И. Сафроновым, который процесс образования месторождений рассматривает с общих позиций затрат энергии при концентрации или рассеянии элементов в земной коре. Математический анализ первичных ореолов эндогенных месторождений различного типа, а также методы количественных расчетов и интерпретации вторичных литохимических ореолов рассеяния рассмотрены в работах А. П. Соловова, Р. И. Дубова, Е. М. Квятковского, И. Н. Крицук и др. Количественные расчеты гидрохимических ореолов предложены Н. А. Огильви, С. П. Албулом и др.

Комплексирование методов. Эффективность геохимических методов поисков во многом зависит от их рационального комплексирования между собой и с другими поисковыми методами — геологическими, геофизическими и техническими. Именно такой подход характерен для всей истории развития геохимических методов в Советском Союзе, начиная с самых ранних этапов. Тем не менее в этой важной и сложной проблеме много нерешенных вопросов, в первую очередь экономического характера. Отсутствует единая точка зрения на комплексиро-

вание лито- и гидрохимических методов поисков в различной ландшафтно-геохимической обстановке на различных этапах поисков. Наиболее полный анализ проблема рационального комплексирования методов поисков получила в трудах В. И. Красникова.

За истекшие три с половиной десятилетия поисковые геохимические исследования в значительных объемах проведены во всех рудных районах Советского Союза, особенно широко — в Казахстане, Забайкалье, Средней Азии, на Урале и Кавказе. Геологическая эффективность геохимических методов поисков весьма высока: открыто много промышленных месторождений свинца, цинка, меди, молибдена, вольфрама, олова, золота и выявлены сотни рудопроявлений в коренном залегании и многие тысячи вторичных ореолов рассеяния, требующих дальнейшей проверки на глубину. Если учесть, что затраты на геохимические исследования составляют не свыше 4—5% от общих ассигнований на геологопоисковые работы в рудных районах и что почти все новые месторождения цветных и редких металлов выявляются в последние десятилетия при существенной роли геохимических методов в общем комплексе, то следует признать их эффективность весьма высокой. Наиболее широко и успешно геохимические методы применяют при поисках месторождений никеля, меди, цинка, молибдена, олова, золота, ртути и свинца, несколько менее широко, но достаточно успешно — месторождений фтора, фосфора, хрома, кобальта, ниобия, сурьмы, вольфрама, висмута. Некоторый опыт накоплен и по поискам осадочных месторождений титана, ванадия, марганца и циркония. Если учесть, что многие элементы используются при геохимических поисках как элементы-индикаторы, то из 92 элементов практически пока остаются вне поля зрения около двадцати элементов, к числу которых относятся пока и элементы группы платины, вовлечение которых в сферу поисковых геохимических исследований — дело недалекого будущего.

О кадрах прикладной геохимии. В конце 20-х годов в Ленинградском политехническом институте по инициативе академика Ф. Ю. Левинсона-Лессинга и Д. С. Белянкина было открыто геохимическое отделение для подготовки геологов-геохимиков. В дальнейшем подготовка геохимиков была сосредоточена в ряде университетов и прежде всего в Московском, где геохимическое отделение и кафедру геохимии возглавил академик А. П. Виноградов. В последние годы кафедра геохимии открыта в Ленинградском государственном университете. В нескольких университетах страны на геологических факультетах введена геохимическая специальность, готовящая геохимиков научно-исследовательского профиля.

Специальный курс геохимических методов поисков месторождений полезных ископаемых впервые начали читать в 30-х годах в Ленинградском горном институте для студентов-геофизиков.

Теперь его слушают и студенты геологоразведочного факультета. Этот курс читают в Московском геологоразведочном институте, Свердловском горном и некоторых других геологических вузах страны. Курс геохимических методов поисков нефтяных и газовых месторождений читается на геологических специальностях нефтяных институтов.

Для повышения квалификации инженеров-геологов в области прикладной геохимии министерство геологии почти ежегодно организует очные и заочные курсы при ВУЗах, геологических управлениях и других производственных геологических организациях.

О росте значения геохимических методов поисков и внимании к подготовке квалифицированных специалистов в этой области свидетельствует организация в Ленинградском горном институте первой в стране специальной кафедры геохимических и радиоактивных методов поисков месторождений полезных ископаемых.

Ближайшей неотложной задачей является создание в нескольких геологических и горных институтах специальности по геохимическим методам поисков, где бы готовили инженеров-геохимиков. Такие специалисты необходимы производственным геологическим организациям для повышения эффективности поисков и развития и совершенствования методов прикладной геохимии в целях быстрейшего выявления минеральных богатств в недрах Советского Союза.