



В ЛАБИРИНТАХ ЛИТОХИМИИ*

Я. Э. Юдович, М. П. Кетрис

Институт геологии Коми НЦ УрО РАН, Сыктывкар
yudovich@geo.komisc.ru

* Доклад «Литохимия: метод изучения осадочных пород и их аналогов», прочитанный на пленарном заседании XIX Международной научной конференции (школы) по морской геологии. Москва, Ин-т океанологии им. П. П. Ширшова РАН.

Окончание.

Начало в Вестнике № 1.

По данным Д. В. Борхвардта и С. Б. Фелицина (1992 г.), мощность верхневендских туфов, регионально развитых на Русской платформе, достигает десятков метров. Среди них выделяются две контрастные петрохимические разновидности: (а) кремнистые (преобладающие), содержащие 71–82 % SiO_2 , 7–15 % Al_2O_3 , и (б) высокоглиноземистые с 50–58 % SiO_2 , 21.0–29.5 % Al_2O_3 . Особо примечательна вторая разновидность, в которой содержания примесных элементов-гидролизатов Zr, Hf, Y и Th оказываются в 1.5–2 раза выше, чем во вмещающих их редкинских аргиллитах. Ввиду очевидного несходства составов редкинских туфов и современных (а также голоценовых) кислых вулканических пеплов, петербургские геологи пришли к выводу, что редкинская пирокластика претерпела процесс гальмиролиза, что и стало причиной дифференциации ее химического состава. Допускается, что процесс шел по двум линиям: формировались гидролизатные продукты типа монтмориллонитовых глин с параллельным окремнением вмещающих терригенных осадков за счет вынесенного кремнезема [14, с. 298].

Как видно на модульной диаграмме (рис. 5) средние составы аргиллитов и двух разновидностей туфов хорошо обособляются по величине гидролизатного модуля ГМ. Аналогичная дискриминация возможна здесь и по алюмокремневому модулю АМ (сами авторы использовали величину Si/Al). Высокоглиноземистые туфы аттестуются как щелочные гипогидролизаты (ГМ 0.56–0.62), а кремнистые туфы — как миосилиты (ГМ 0.20–0.28). Аргиллиты, что нормально, оказываются сиаалитами, в данном случае щелочными. Однако тот факт, что на модульной диаграмме аргиллиты образуют как бы единую совокупность с туфами может означать, что аргиллиты в действительности содержат пирокластическую примесь. Интересно, что наибольшую щелочность имеют кремнистые туфы (НКМ 0.31–0.35), они же и более титанисты: ТМ = 0.045–0.061 против 0.046–0.053 в аргиллитах. При

этом минимальную титанистость (ТМ = 0.021) показывает состав *обр. 4* с наивысшей общей щелочностью и глиноземистостью. Очевидно, что эта существенно гидрослюдистая порода сформировалась по наиболее кислому туфу. Вне кластеров располагается также *обр. 3*, он имеет промежуточный состав и, вероятно, может быть отнесен к туфоаргиллитам.

Иногда (в случае молодых отложений) с помощью литохимии удастся даже отличить породы существенно вулканокластические (холодный вулканитовый материал) от пород существенно пирокластических (горячая тефра), что можно видеть на примере верхнего мела Малых Курил (рис. 6).

Вследствие обилия магнезиальных пород для кластеризации здесь наиболее удобна модульная диаграмма $(\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$ –ФМ, где хорошо обособляются три-четыре кластера. Можно выделить, с одной стороны, относительно малощелочные породы кластеров I, III и, с другой, явную серию пород нарастающей щелочности и убывающей фемичности: кластеры II → IV. По-видимому, первые (псевдогидролизаты) пред-

ставляют собой в основном вулканомиктовые породы, а вторые — туффоиды (сиаллиты, вплоть до алкали-тов). Высокофемичный состав *обр. 9* отличается наибольшей магнезиальностью и, вероятно, отвечает породе с примесью оливин-базальтовой кластики. *Обр. 5* отличается повышенной марганцовистостью. Отмечаем характерный признак пирогенных пород: наличие позитивной корреляции фемичности и титанистости и негативной — фемичности и щелочности.

Особенно актуальна задача распознавания примеси пирокластики в отсутствие ее петрографических признаков (что характерно для пород, прошедших глубокий катагенез и тем более метаморфизм). В частности, в наших урало-пайхойских региональных работах на черносланцевом палеозое и метаморфическом докембрии был накоплен большой опыт такой диагностики. Из сотен обработанных нами выборок выдернем наудачу только одну, включающую тринадцать анализов туфов и четыре анализа аргиллитов ордовикского флиша Момского горст-антиклинария (рис. 7). Здесь осадочные породы

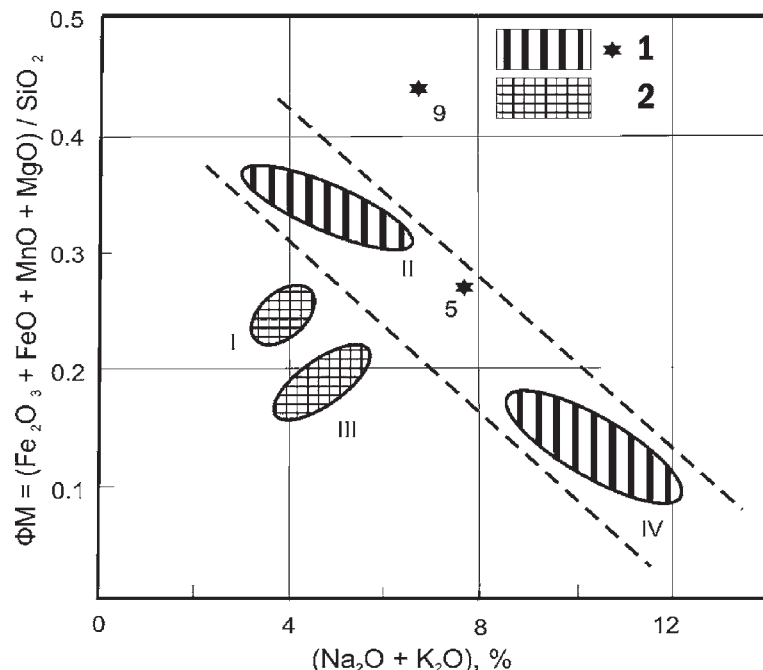


Рис. 6. Модульная диаграмма для верхнемеловых вулканогенно-терригенных пород малокурильской свиты Малых Курил.

Условные обозначения здесь и на рис. 5, 7, 9, 11: 1 — туффоиды, 2 — смешанные кластеры (туффоиды+осадочные породы). Составлено по данным В. К. Гаврилова и Н. А. Соловьевой, 1973 г. [11, с. 229]

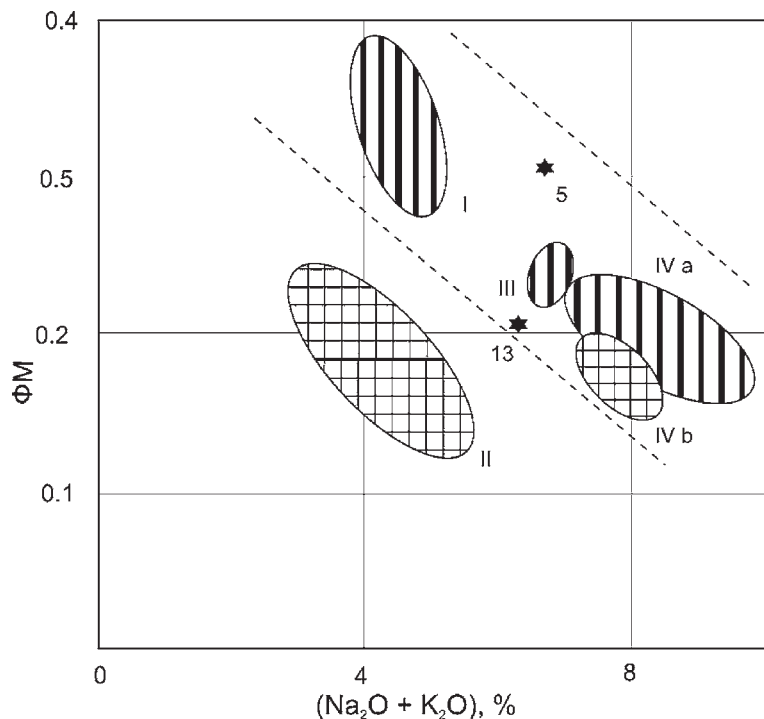


Рис. 7. Модульная диаграмма для щелочно-базитовых туфов, туфопелитов, туфопелитов и аргиллитов ордовикской флишевой вулканогенно-осадочной формации Арга-Тасской зоны Момского горст-антиклинария. Условные обозначения см. на рис. 6. Составлено по данным М. Д. Булгаковой, 1986 г. [14, с. 318]

(аргиллиты, *кластер II*) очень четко отделяются от щелочно-базальтовых туфов (*кластеры I, III, IV*): в аргиллитах гораздо ниже общая щелочность и фемичность.

Что касается самих пирокластиков, то в них четко выделяются псаммитовые основные туфы пироксеновых трахибазальтов, которые аттестуются как псевдогидролизаты (*кл. I*), и более кислые туфы трахиандезитобазальтов (*кл. IVa*). Два других кластера туфов и туфопелитов (*III, IVb*) оказываются смешанными; это указывает на их гетерогенность (о присутствии дополнительных разновидностей говорит и особый состав крупноалевритового туфа — *обр. 5*). Заметим также, что «аргиллиты» *кл. II* магнезиальны, они аттестуются как псевдосиаллиты. **Скорее всего в них имеется пирокластическая примесь, и они должны трактоваться как туффонды.** На это же указывает и состав «аргиллита» *обр. 13* (щелочной псевдосиаллит), очень близкий к полю трахиандезитобазальтовых туфов.

5. С помощью литохимии можно определить протолит метаморфитов. Эффективность такой диагностики по меньшей мере не хуже, чем с помощью широко известных методик А. Н. Неелова, А. А. Предовского и О. М. Розена⁸. Более того, вид модульных диаграмм иногда дает подсказку о проявлении процессов аллохимического метаморфизма (с привносом-выносом компонен-

тов) — этого «бича» всех методик диагностики протолита. Напомним, что именно из этой проблемы, которую разрабатывали О. М. Розен в Москве, А. Н. Неелов в Ленинграде и А. А. Предовский в Апатитах, пошла в рост литохимия в ее современном виде. И хотя указанными геоло-

гами сделано очень много, наш подход также оказался небесполезным.

Показателен пример верхнеархейского сланцевого пояса Яванахалли (Индия). Здесь развита толща высококальциевых гнейсов-метааркозов, которые переслаиваются с эпидотовыми кварцитами и известково-силикатными гнейсами. Однако среди наиболее вероятных материнских пород никаких высококальциевых пород в области сноса нет. Не подтверждается также идея о наложенном К-метасоматозе метааркозов, поскольку они трактуются как петрогенные породы — first cycle sediments. В итоге индийские геологи пришли к заключению, что высококальциевые аркозы являются продуктом древнего выветривания архейских тоналитов, причем в составе субстрата присутствовало также некоторое количество основных и даже ультраосновных пород.

Проверим и уточним эти выводы с помощью литохимии. На модульной диаграмме (рис. 8) удастся отделить метааркозы и их «переходные» разновидности от более основных и менее щелочных пород.

Кластеры II–III представлены метааркозами с резко изменчивыми значениями НКМ и ТМ. Мощная дисперсия ТМ от 0.001 (таких значений не бывает даже в кислых изверженных породах) до 0.057 (а это, наоборот, чересчур много для кислых пород) скорее всего указывает на

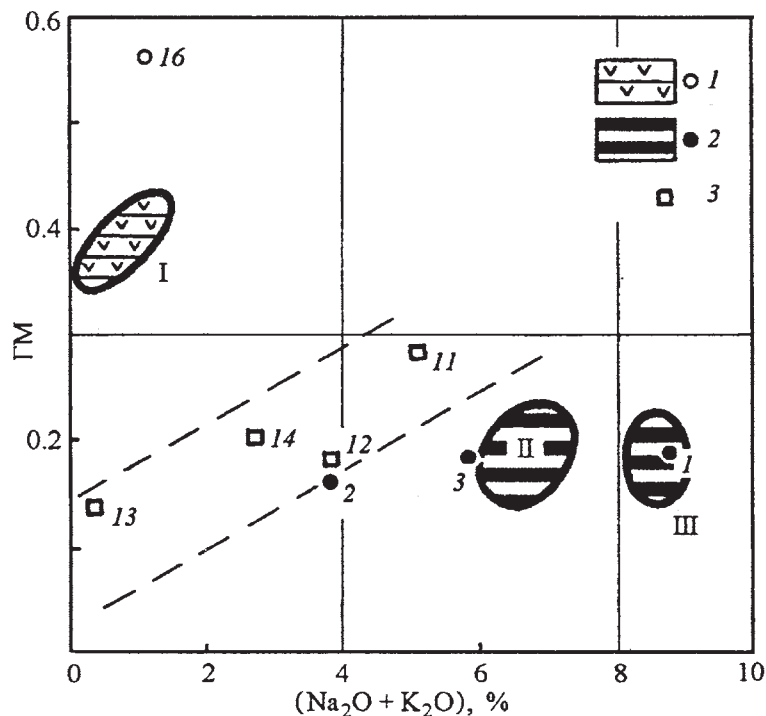


Рис. 8. Модульная диаграмма для верхнеархейских метаморфических пород пояса Яванахалли (Индия).

1 — известково-силикатные гнейсы, 2 — метааркозы, 3 — эпидотовые кварциты. Составлено по данным С. Накви и др., 1980 г. [14, с. 365]

⁸Во всяком случае, как нам сообщил в декабре 2010 г. проф. В. И. Фельдман, на каф. петрографии МГУ давно и с успехом используют нашу литохимию для диагностики субстрата метаморфитов.

смесь кислого и основного материалов. Примесь последнего могла быть не только терригенной, но и вулканогенной — в форме пирокластики. Образцы 11–14 представлены эпидотовыми кварцитами, т. е. породами менее щелочными, более титанистыми и железистыми. Обр. 13 отличается минимальной щелочностью, а обр. 11, напротив, близок по НКМ к метаркозам, а точнее, к их «переходным» разновидностям. Низкие содержания K_2O при ощутимых содержаниях Na_2O подсказывают, что это могли быть какие-то граувакки, например андезитовые вулканокласты с примесью кварца. Кластер I включает магнезиальные породы, супер- и гипержелезистые. К ним тяготеет и железистый псевдогидролизат — обр. 16. Очевидно, что это метабазиты.

Итак, можно думать, что в позднеархейский бассейн седиментации поступал высококалийный терригенный материал из коры выветривания архейских тоналитов, формируя слои высококалийных аркозов. Однако этому процессу скорее всего сопутствовал довольно мощный синхронный вулканизм (андезитовый и базальтовый), что определило значительную примесь основного материала в породах. В итоге получались смешанные породы типа «грауваккоаркозов» (или, может быть, «туфоаркозов»), а периодически формировались покровы (или силлы?) базальтоидов. Заметим, что вся эта картина (включая и состав пород) удивительно напоминает ту, что мы наблюдали в среднерифейской (?) шекуринской свите на Приполярном Урале [16].

Этот пример — один из трудных случаев диагностики. Однако низкокальциевые катархейские метаморфиты гораздо легче поддаются интерпретации. Примером могут служить изучавшиеся Л. М. Реутовым гнейсы и сланцы амедичинского комплекса на Алданском щите, среди которых он выделил металевропсаммиты, метатуфоалевролит и метатуфы. Эти генотипы прекрасно распознаются на модульной диаграмме (рис. 9), причем «металевропсаммиты» (кластеры Ia, Ib) образуют единую серию с «метатуфоалевролитами» (кластер II), что позволяет предполагать и в них присутствие пирогенной примеси, а «метатуфы» (кластер III) резко выделяются по высокой общей щелочности. Аномальные составы обр. 4 (гранат-биотит-полевошпат-кварцевый сланец) и обр. 14 (гранат-силлиманит-кварцевый гнейс) позволяют заподозрить в них метасоматиты.

6. Наконец с помощью литохимии геолог, как правило, получает нетривиальную «информацию к размышле-

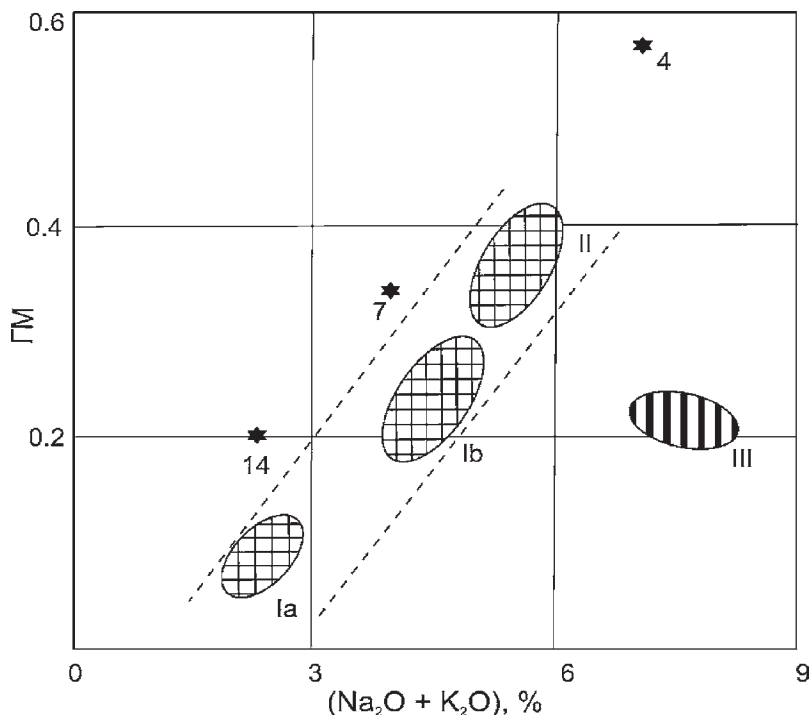


Рис. 9. Модульная диаграмма для слюдяных сланцев и гнейсов катархейского амедичинского комплекса на Алданском щите. Условные обозначения см. на рис. 6. Составлено по данным Л. М. Реутова, 1981 г. [14, с. 263]

нию» — такую, которую ему не дает стандартное литологическое описание. Чаше всего оказывается, что на первый взгляд однотипные осадочные породы (например, глинистые) в действительности обладают некоторыми особенностями химического состава, которые вынуждают сначала выделить в них литохимические разновидности (хемотипы), а потом — искать и находить литологическое обоснование такого выделения (пропущенное при стандартном литологическом описании).

Приводимый ниже пример на эту тему имеет прямо-таки анекдотический характер. Речь идет о породах южно-африканской свиты («формации») Силвертон, которые залегают в верхах надсерии («системы») Трансвааль [3]. В работе П. Эрикссона и др. (1990 г.) был приведен 31 анализ «глинистых пород» этой мощной толщи (названной авторами «архейской», но относящейся, по-видимому, к верхам карелия) и три средних состава. Взвешенное среднее, вычисленное для всей толщи, сравнивалось ими с различными другими средними для древних глинистых пород (и на основе такого сравнения делались далеко идущие выводы!).

Между тем на модульной диаграмме пород свиты (рис. 10) можно выделить не менее семи кластеров, что уже само по себе показывает крайнюю сомнительность каких-либо средних оценок для толщи в целом. А если добавить сюда индивидуальные составы (которые не удается упрятать в кластеры), то в итоге вме-

сто одного литотипа приходится выделять... около 20 хемотипов! В итоге литохимическое исследование показало, что под названием «глинистые породы формации Силвертон» на самом деле объединены весьма различные горные породы: (а) гидролизатные образования — метаморфизованные КВ по кислому и среднему (?) субстратам; (б) небольшое количество нормальных глинистых сланцев, но больше алевросланцев, металевролитов и, по-видимому, метапесчаников-граувакк с обильным глинистым матриксом (?); (в) базитовые туфоиды, или же граувакки с литокластами основного состава.

Чего не может литохимия

Было бы безответственным шарлатанством заявлять о всемогуществе литохимических методов: как и любые другие методы, они также имеют свои ограничения. Например, в проблеме распознавания примеси пирокластики существуют три каверзные ситуации, когда литохимия пробуксовывает в силу объективных причин.

1. Пирокластика имеет андезитовый или дацитовый состав. Такой материал, в отличие от базальтового, может не показывать повышенной титанистости и железистости, а в отличие от риолитового — не иметь и повышенной щелочности! Некоторой подкачкой может послужить лишь повышенное содержание некарбонатного (плагиоклазового) CaO .

Характерным примером являются нижнемеловые песчаники экзехнхской свиты, вскрытые глубокой

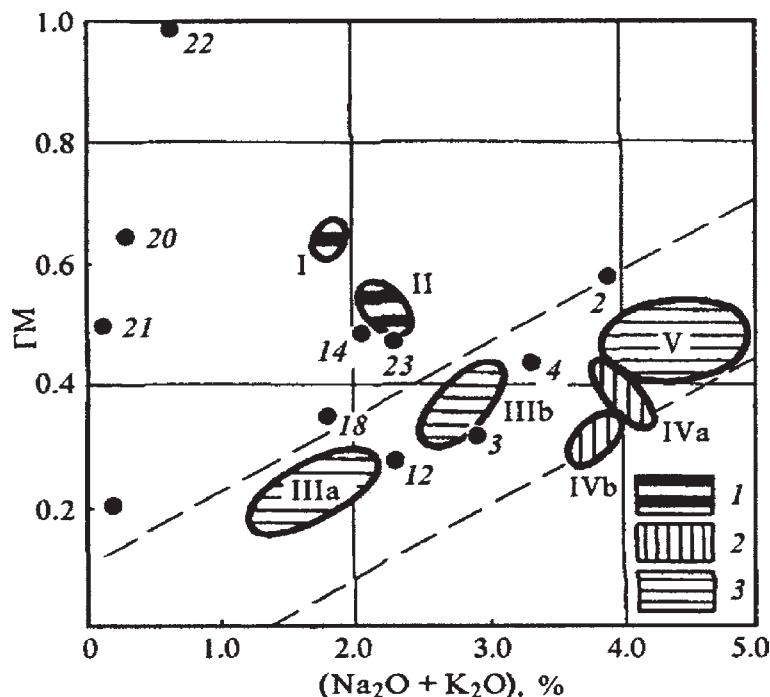


Рис. 10. Модульная диаграмма для «глинистых пород» свиты Силвертон надсерии Трансвааль, Ю. Африка.

1 — метагидролизаты, 2 — метаграувакки и/или метатиффойды, 3 — метапесчаники, метаалевролиты и метапелиты. Составлено по данным П. Эрикссона и др., 1990 г. [14, с. 186]

скважиной Берге-1 (Якутия) на глубинах от 1459 до 2190 м. Как показала литохимическая обработка данных [14, с. 325—326], состав этих пород очень однообразен: все они аттестуются как щелочные миоциты, несмотря на существенную дисперсию содержаний кремнезема: от 57.3 до 70.8 %. Дело в том, что колебания содержаний SiO_2 вызваны присутствием в таких породах существенной примеси карбоната. Якутская исследовательница Г. В. Ивенсен (1991 г.), располагая петрографическими данными, пришла к однозначному выводу о том, что в меловое время в бассейне седиментации поступала пирокластическая именно кислого (близкого к дацитам) состава. Однако справедливости ради необходимо признать, что на основании только химических анализов решение альтернативы — петрогенные аркозы или пирогенные тиффойды — в данном случае невозможно. Причина неясности диагноза заключается как раз в том, что пирогенный материал был не столько риолитовым, сколько гораздо менее выразительным — дацитовым.

2. Пирокластическая захороняется в граувакковых флишевых толщах, которые мало отличаются от неё по своему химическому составу (например, песчаники представлены вулканокластическими граувакками).

3. Пирокластическая подверглась сильному аллохимическому изменению в осадках, на исходные (или малоизмененные) туфы не сохранились.

Есть и другие ситуации, когда литохимия в одиночку не справляется с задачей диагноза. Однако никто ведь не обязывает исследователя пользоваться только приемами литохимии; весьма эффективно сочетание литохимии с геохимией элементов-примесей. Например, при наличии спектров РЗЭ для рифейских алкалитов (рис. 3) наш диагноз стал бы гораздо достовернее.

Заключение

Итак, литохимия вполне состоялась как самостоятельная область геохимии осадочных пород и их аналогов. Занятия литохимией сочетают в себе очень приятное (литохимическую аттестацию составов и построение на компьютере модульных диаграмм) с очень полезным (получением нетривиальной информации об изучаемых породах). О том, что многие геологи это уже поняли, можно судить по литературе. Например, наши коллеги из Москвы, Петербурга, Сыктывкара, Петрозаводска, Уфы, Казани, Екатеринбурга, Новосибирска, Иркутска, Якутска, Магадана, Минска и Киева давно и с успехом применяют методы литохимии в своей работе.

Необходимым условием применения литохимических методов является массовость силикатных анализов. Если в 1960-е гг. в Геологическом ин-те АН СССР (Москва) даже старший научный сотрудник мог рассчитывать не более чем на 10 таких ана-

лизиров в год, то теперь широкое внедрение квантометров и энергодисперсионных спектрометров сделало силикатные анализы достаточно дешевыми и общедоступными. В наши дни практически любой геолог может получать силикатные анализы «как при коммунизме» — по потребности. А это значит, что в ближайшие годы литохимия получит еще более широкое распространение. Можно надеяться, что она найдет свое место и в университетских курсах геохимии⁹.

Литература

1. Заварицкий А. Н. Изверженные горные породы. М.: Изд-во АН СССР, 1955. 479 с.
2. Литохимия в действии: Материалы Второй Всероссийской школы по литохимии. Сыктывкар: Геопринт, 2006. 162 с.
3. Салон Л. И. Геологическое развитие Земли в докембрии. Л.: Недра, 1982. 343 с.
4. Систематика и классификация осадочных пород и их аналогов / В. Н. Шванов, В. Т. Фролов, Э. И. Сергеева и др. СПб.: Недра, 1998. 352 с.
5. Тейлор С. Р., Мак-Леннан С. М. Континентальная кора. Ее состав и эволюция. М.: Мир, 1988. 376 с.
6. Фролов В. Т. К вопросу о классификации осадочных пород // Вестник МГУ. Геология, 1987. № 1. С. 26—36.
7. Фролов В. Т. Литология. Кн. 1. М.: МГУ, 1992. 336 с.
8. Юдович Я. Э. Индикаторное значение отношения Mn/Fe в осадочных породах // Докл. РАН, 2000. Т. 375, № 2. С. 233—234.
9. Юдович Я. Э. Курс геохимии осадочных пород. Избранные главы: Учебное пособие. Сыктывкар: СыктГУ, 2001. 284 с.
10. Юдович Я. Э. Эти черные-нечерные сланцы // Природа, 1994. № 1. С. 16—27.
11. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимические и минералогические индикаторы вулканогенных продуктов в осадочных толщах. Екатеринбург: УрО РАН, 2010. 412 с.
12. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Геохимия черных сланцев. Л.: Наука, 1988. 272 с.
13. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Новое в геохимии литогенеза // Уральский геол. журн., 2011. № 3 (81). С. 47—85.
14. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Основы литохимии. СПб.: Наука, 2000. 479 с.
15. Юдович Я. Э., Кетрис М. П. Химическая классификация осадочных горных пород. Сыктывкар, 1986. 34 с. (Научные доклады / Коми фил. АН СССР. Вып. 148).
16. Юдович Я. Э., Кетрис М. П., Мерц А. В., Ефанова Л. И., Шуленова А. Н. Литохимия древних толщ на Приполярье Урала // Геохимия древних толщ севера Урала / Отв. ред. академик Н. П. Юшкин, ред. сост. Я. Э. Юдович и М. П. Кетрис. Сыктывкар: Геопринт, 2002. С. 7—49.

Рецензент

д. г.-м. н. Ю. А. Ткачёв

⁹На кафедре геологии Сыктывкарского университета студенты 4-го курса уже с 2000 г. знакомились с основами литохимии в рамках спецкурса «Геохимия осадочных пород. Избранные главы» [9].