

Е. И. ЗАЙЦЕВ,
Ю. П. СОТСКОВ,
Р. С. РЕЗНИКОВ

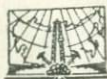
Нейтронно-
активационный
анализ
горных пород
на редкие
элементы

Е. И. ЗАЙЦЕВ,
Ю. П. СОТСКОВ,
Р. С. РЕЗНИКОВ

552: 12

Нейтронно-
активационный
анализ
горных пород
на редкие
элементы

2323



МОСКВА
«НЕДРА»
1978



Зайцев Е. И., Сотсков Ю. П., Резников Р. С. Нейтронно-активационный анализ горных пород на редкие элементы. М., «Недра», 1978, 101 с. (Ин-т минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов).

Рассмотрены особенности многоэлементного анализа горных пород нейтронно-активационным методом путем облучения образцов тепловыми нейтронами в ядерном реакторе и измерения наведенного гамма-излучения с помощью полупроводниковых детекторов. Оценена селективность измерений различных линий радиоизотопов определяемых элементов и даны рекомендации по выбору удобных для анализа линий, а также длительности облучения, остывания и измерения. Значительное внимание уделено рассмотрению дополнительных возможностей анализа по рентгеновскому характеристическому и мягкому гамма-излучению радиоизотопов с использованием полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения; приведены спектры 32 активированных природных элементов, полученные на планарном германиевом радиационном детекторе. Показана возможность количественных определений в горных породах 12 редкоземельных и ряда сопутствующих элементов, в том числе Sc, Th, U, Hf, Cs, Co, Ba, Rb, Sb и др. Оценена точность, чувствительность и производительность анализа.

Книга рассчитана на специалистов, работающих в области ядерно-физических методов анализа вещества.

Табл. 18, ил. 42, список лит. — 25 назв.

Выпущено по заказу Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов

ПРЕДИСЛОВИЕ

Определение содержания редких элементов в горных породах является важной составной частью геохимических исследований. Изучение распределения Ta, Nb, Cs, Rb, Hf, Zr, U, Th, лантаноидов и ряда других элементов-индикаторов геохимических процессов позволяет решать разнообразные задачи, связанные с оценкой рудоносности, генезиса, формационной принадлежности пород, металлогенической специализацией геологических провинций и т. д. Вместе с тем количественное определение редких элементов в породах и породообразующих минералах является сложной аналитической задачей, поскольку концентрации этих элементов часто не превышают $n \cdot 10^{-4} \div n \cdot 10^{-5}\%$, и для проб характерны значительные вариации состава при наличии практически всех элементов периодической системы.

Традиционные аналитические методы далеко не всегда удовлетворяют требованиям практики, в связи с трудоемкостью и низкой производительностью (химические методы), недостаточной точностью (спектральный анализ) или чувствительностью (рентгено-спектральный анализ). Поэтому закономерен интерес к использованию нейтронно-активационного метода, который является потенциально одним из наиболее чувствительных и точных при определении микропримесей в различных материалах.

В последние годы значительные успехи как в Советском Союзе, так и за рубежом достигнуты в разработке и применении инструментальных вариантов этого метода, что обусловлено, в первую очередь, внедрением полупроводниковых детекторов (ППД) гамма-излучения, обладающих на порядок лучшим энергетическим разрешением по сравнению со сцинтилляционными счетчиками. Применение ППД резко повысило селективность измерений наведенного гамма-излучения и дало возможность определять широкий круг элементов с высокой точностью, чувствительностью и производительностью.

В основу предлагаемой книги положены результаты исследований, проводившихся в лаборатории ядерно-физических методов Института минералогии, геохимии и кристаллохимии редких элементов (ИМГРЭ), по оценке возможностей многоэлементного анализа горных пород при облучении проб в ядерном реакторе и последующем измерении их гамма-активности с помощью ППД. Значительное внимание уделено рассмотрению селективности определений, а также особенностей анализа по мягкому гамма-излучению продуктов (n, γ)-активации, поскольку эти вопросы мало освещены в литературе.

Активацию образцов проводили тепловыми нейтронами в реакторе типа ТВР (поток $1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/см²·с) через Московское отделение Всесоюзного объединения «Изотоп».

В работе над книгой принимали участие В. Г. Лаптев и Г. И. Фадеев. Авторы выражают благодарность сотрудникам лаборатории А. Н. Лукиной, А. М. Шильникову и А. В. Горбуну, оказавшим большую помощь при подготовке рукописи.

1. МЕТОДИКА АНАЛИЗА ПРОБ ГОРНЫХ ПОРОД

Активационные методы анализа основаны на облучении исследуемых образцов ядерным излучением и последующем измерении активности радиоизотопов, образовавшихся при облучении в результате ядерных реакций.

Наибольшее практическое применение нашло облучение тепловыми нейтронами. Это обусловлено высоким сечением активации большинства элементов, возникновением ядерной реакции только одного типа (n, γ), в результате которой образуется изотоп того же элемента, малым влиянием конкурирующих реакций, большой проникающей способностью нейтронов и возможностью облучения мощными потоками нейтронов реактора.

При активации образца сложного состава возникает большое количество радиоизотопов. Выделить и измерить активность интересующего изотопа можно двумя способами: 1) отделить данный элемент от других радиоактивных элементов, присутствующих в пробе, химическими методами и измерить его активность с помощью простой радиометрической аппаратуры (например, β -счетчиком). Такой вариант анализа называется радиохимическим; 2) применить спектрометрическую аппаратуру и выбрать такие условия измерения, при которых влиянием других радиоизотопов можно пренебречь. Этот вариант называется инструментальным. Поскольку большинство продуктов активации испускают γ -излучение с характерной для каждого радиоизотопа энергией, при инструментальном анализе наибольшее распространение получили спектрометры γ -излучения.

Радиохимический вариант является более чувствительным, с его помощью можно определять содержание почти любого элемента в образцах различного состава. Однако он трудоемкий и дорогостоящий; при химической обработке проб могут быть внесены дополнительные ошибки, связанные с частичной потерей определяемого элемента.

Значительно большая производительность может быть достигнута при использовании инструментальных вариантов анализа, возможности которых резко возросли в связи с разработкой и применением полупроводниковых детекторов (ППД), обладающих во много раз лучшим энергетическим разрешением по сравнению со сцинтилляционными счетчиками. В настоящее время при облучении проб нейтронами в ядерном реакторе с последующим измерением наведенного γ -излучения на многоканальных спектрометрах с ППД возможно селективное определе-

ние в горных породах значительного числа редких элементов с чувствительностью $1 \cdot 10^{-4}$ — $n \cdot 10^{-5}\%$ [7, 8, 17, 18, 19].

К достоинствам инструментального нейтронно-активационного анализа (ИНАА) по сравнению с традиционными методами следует отнести независимость результатов измерений от химических свойств элементов (вида химического соединения, близости химических свойств определяемых элементов и т. п.); возможность определения большого числа элементов из одной навески пробы; возможность исследования небольших навесок (до единиц миллиграмма), что чрезвычайно важно при изучении минеральных фракций; высокую надежность результата анализа, поскольку исключена опасность частичной потери элемента в процессе анализа; высокую производительность.

Ограничениями ИНАА являются низкая чувствительность определений ряда элементов (Zr, Nb, Sn, Te, Tl, Bi и др.); значительная продолжительность анализа, достигающая в некоторых случаях месяца и даже больше; существенное ухудшение пороговой чувствительности определений при высоком содержании в пробе элементов с большим сечением активации (Eu, Sc, Ta, Co и др.), деления (U) или поглощения нейтронов (Gd, B, Li).

Основные положения методики анализа заключаются в следующем. Навески исследуемых проб, а также эталонных образцов упаковывают в материал, практически не активирующийся под действием нейтронов (или дающий продукты активации, которые быстро распадаются, как, например, алюминий) и помещают в пенал из чистого алюминия, который облучают в течение определенного времени тепловыми нейтронами в реакторе. По окончании облучения, после некоторой выдержки («остывания») измеряют спектр наведенного гамма-излучения каждой пробы и по интенсивности гамма-линий соответствующих радиоизотопов рассчитывают содержание определяемых элементов.

При выборе навески приходится учитывать несколько факторов. С увеличением навески, с одной стороны, улучшается представительность пробы, повышается чувствительность измерений, а с другой стороны — возрастает опасность влияния самоэкранирования нейтронного потока на результаты анализа, повышается радиационная опасность для оператора, увеличивается стоимость облучения одной пробы (одновременно может быть облучено ограниченное количество материала). Как показал опыт, при анализе горных пород оптимальной является навеска 300—400 мг, обеспечивающая удовлетворительную представительность при обычной подготовке пробы (например, как для химического анализа). В связи с большой трудоемкостью отбора мономинеральных фракций их анализ можно проводить из навески в несколько десятков миллиграммов, при этом потеря чувствительности может быть скомпенсирована в определенной степени увеличением длительности облучения или мощности нейтронного потока. При анализе минералов с высоким содержа-

нием редкоземельных элементов (лопарит, монацит и т. п.) приходится уменьшать навеску до нескольких миллиграммов, чтобы исключить влияние самоэкранирования. При этом неизбежна потеря чувствительности определений.

Удобным материалом для упаковки проб перед активацией является полиэтиленовая пленка (типа ВД) толщиной 0,2—0,5 мм. Пакетик из этой пленки, куда помещают пробу, легко загерметизировать, оплавив края; пленка практически чистая в отношении примесей, не активируется, имеет удовлетворительную радиационную стойкость и выдерживает облучение потоком $1 \cdot 10^{13}$ нейтр/с·см² в течение 6—7 ч. Такой интегральный поток обычно вполне достаточен при анализе горных пород, ибо дальнейшее увеличение гамма-активности пробы, как правило, приводит к импульсной перегрузке спектрометра.

Если требуется большая длительность активации (в случае анализа малых навесок минерала), полиэтиленовая пленка для упаковки не пригодна, так как в результате радиационных и тепловых воздействий при облучении становится хрупкой и теряет герметичность; в этом случае пробы можно упаковывать в фольгу из чистого алюминия (свертывая ее в виде пакетика). Следует, однако, иметь в виду, что даже в «чистой» фольге может присутствовать заметное количество некоторых элементов (Sc, Ta). Поэтому фольга должна предварительно проверяться на содержание микропримесей. В некоторых случаях приходится перед измерением переупаковывать пробу, убирая ее из фольги, в которой она облучалась.

В стандартный пенал для облучения (диаметр 40 мм, высота 120 мм) помещается до 50—70 упакованных в пленку или фольгу проб.

В качестве эталонов мы применяли аттестованные стандартные образцы горных пород и руд, а также нанесенные на фильтровальную бумагу дозированные количества стандартного раствора определяемых элементов и образцы горных пород и руд подходящего состава, предварительно тщательно проанализированные несколькими методами. Обычно используются три навески эталона, расположенные соответственно в нижней, средней и верхней частях пенала с пробами, что позволяет контролировать и при необходимости учитывать различия в интегральном потоке нейтронов по высоте пенала. Как правило, эти различия не превышают 5—10%.

Аналитические лаборатории, проводящие нейтронно-активационный анализ геологических образцов, обычно расположены не при реакторах, а на расстоянии от них в несколько десятков километров, и измерение облучаемых проб возможно лишь через несколько часов после окончания облучения. Поэтому мы будем рассматривать возможности ИНАА по радиоизотопам с периодом полураспада не менее 2—3 ч. Условно назовем изотопы с

периодом полураспада T от 2—3 ч до 1—2 дней — короткоживущими, а с $T > 2—3$ дней — долгоживущими.

Основная доля активности проб горных пород в первые дни после облучения обычно обусловлена натрием (^{24}Na , $T=15$ ч). При среднем содержании в породах $\text{Na}=3\%$ и общей массе одновременно облученных образцов 20 г/т (50 проб по 400 мг), длительности активации 6 ч в потоке $1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/с·см² гамма-активность за счет ^{24}Na составляет примерно 0,4 Ки. После выдержки в течение 7—10 дней общая активность образцов снижается обычно до 1—2 мКи и работа с пробами не требует сложной системы защиты.

Технически трудно осуществить с достаточной чувствительностью измерения гамма-активности и короткоживущих и долгоживущих изотопов при однократном облучении одной навески пробы. Это объясняется разными требованиями к режиму активации и остыванию проб. Для обеспечения необходимой активности долгоживущих изотопов, а следовательно, и высокой чувствительности их определения, необходимо облучение проб большим интегральным потоком — 4—6 ч в потоке $1,2 \times 10^{13}$ нейтр/с·см². При этом измерения могут проводиться после практически полного распада ^{24}Na .

Для определения короткоживущих изотопов измерение гамма-спектра пробы необходимо проводить через несколько часов после окончания облучения. В этом случае гамма-активность пробы за счет ^{24}Na столь велика, что, во-первых, аппаратный спектр содержит интенсивную составляющую фона, обусловленную комптоновским рассеянием гамма-излучения натрия, и, во-вторых, для исключения импульсной перегрузки спектрометра приходится удалять пробу на большое расстояние (метры) от детектора. И то и другое приводит к резкой потере чувствительности измерений. Поэтому в случае, когда необходимо измерять и короткоживущие, и долгоживущие изотопы, целесообразно использовать две навески пробы; одну облучать 5—10 мин для измерений короткоживущих изотопов, а другую — 4—6 ч для анализа по долгоживущим продуктам (n, γ)-активации. В зависимости от периода полураспада определяемых элементов длительность остывания выбирается от нескольких часов до 1—2 дней в первом случае и от 5—7 дней до 30—40 дней — во втором.

Часто бывает необходимо определить несколько элементов с различным периодом полураспада соответствующих изотопов. В этом случае для обеспечения максимальной чувствительности или селективности измерений длительность остывания должна быть различной для каждого элемента. Однако с целью повышения производительности измерений длительность остывания выбирается средней для группы элементов с относительно близкими периодами полураспада.

Длительность измерения определяется необходимой статистической точностью измерения аналитических линий и составляет обычно 5—15 мин.

Аппаратурный спектр гамма-излучения пробы, полученный с помощью ППД и многоканального анализатора импульсов, представляет собой непрерывное распределение, обусловленное комптоновским рассеянием гамма-квантов в кристалле детектора, на фоне которого имеются узкие фотопики. Положение фотопика на горизонтальной шкале определяется энергией зарегистрированной гамма-линии, а его интенсивность (высота) — содержанием соответствующего элемента. Чтобы найти численное значение величины фотопика, необходимо просуммировать количество зарегистрированных импульсов в каналах, соответствующих всей ширине пика, и вычесть из полученной суммы величину фона. Фон находят по среднему уровню непрерывного распределения слева и справа от фотопика. Содержание определяемого элемента вычисляют по формуле

$$C_{\text{пр}} = \frac{C_{\text{эт}} \cdot N_{\text{пр}} \cdot t_{\text{эт}} \cdot m_{\text{эт}}}{N_{\text{эт}} \cdot t_{\text{пр}} \cdot m_{\text{пр}}},$$

где $N_{\text{пр}}$ и $N_{\text{эт}}$ — количество зарегистрированных импульсов в аналитическом пике по спектрограммам пробы и эталона; $m_{\text{пр}}$ и $m_{\text{эт}}$ — масса пробы и эталона, г; $t_{\text{пр}}$ и $t_{\text{эт}}$ — длительность измерений пробы и эталона, мин; $C_{\text{эт}}$ — содержание искомого элемента в эталоне, %.

Чем выше энергетическое разрешение спектрометра, тем уже фотопики и, следовательно, меньше вероятность наложения близких по энергии гамма-линий (выше селективность анализа). Поскольку в аппаратурном спектре пробы содержится обычно большое количество фотопиков, ручная обработка результатов измерений малопродуктивна. Поэтому в последнее время для обработки спектрометрической информации используют ЭВМ.

2. ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКАЯ АППАРАТУРА С ППД¹

При активации геологических образцов образуется большое количество радиоизотопов. Поэтому спектр облученного образца содержит множество гамма-линий в диапазоне энергий от единиц килоэлектронвольта до 2—3 МэВ.

Для измерений относительно жесткого гамма-излучения с энергией примерно от 100 кэВ до 2—3 МэВ целесообразно использовать коаксиальные Ge (Li)-детекторы с достаточно большим чувствительным объемом, так как с увеличением объема возрастает эффективность регистрации гамма-квантов с высокой энергией.

¹ Раздел написан при участии В. Г. Лаптева.

Для спектрометрических измерений в области рентгеновского излучения (10—100 кэВ) выгоднее использовать планарные детекторы на основе Ge потому, что из-за небольшой толщины они обладают существенно меньшей чувствительностью к жесткому гамма-излучению, которое в данном случае является мешающим. Такие детекторы должны иметь достаточно тонкое входное окно, «прозрачное» для гамма-квантов рентгеновского диапазона энергий, и более высокое по сравнению с коаксиальными детекторами энергетическое разрешение (менее 1 кэВ).

В наших работах были использованы следующие детекторы, выпускаемые отечественной промышленностью: 1) коаксиальный Ge (Li)-детектор типа ДГДК с чувствительным объемом 50 см³; 2) планарный детектор рентгеновского излучения (радиационный германиевый) типа ДГР с площадью чувствительной поверхности 50 мм², толщиной чувствительного слоя 4 мм.

На рис. 1 и 2 показаны эффективность регистрации и энергетическое разрешение детекторов в зависимости от энергии гамма-излучения. Эффективность рассчитана как выраженное в процентах отношение числа зарегистрированных в фотопике импульсов к числу гамма-квантов данной энергии, попавших на чувствительную поверхность детектора в единицу времени. Измерения проведены с использованием образцовых спектрометрических гамма-источников (ОСГИ). Приведенное на рис. 1 и 2 энергетическое разрешение является суммарным — для детектора в сочетании с регистрирующей аппаратурой. Указанные детекторы могут эксплуатироваться и храниться только при температуре жидкого азота, поэтому помещенный в криостат кристалл постоянно охлаждается с помощью металлического хладопровода, опущенного в дьюар с жидким азотом. Азот периодически доливают.

В комплект спектрометра с ППД обычно входят предварительный усилитель, основной усилитель, усилитель-экспандер, многоканальный амплитудный анализатор, устройства для регистрации результатов измерений, а также источник высоковольтного питания ППД и генератор импульсов стандартной амплитуды. Блок-схема спектрометра с ППД показана на рис. 3.

При фотоэлектрическом поглощении гамма-кванта в детекторе, на его выходе образуется кратковременный электрический сигнал с амплитудой, пропорциональной энергии поглощенного кванта. Одна из особенностей ППД — малые амплитуды этих сигналов. Так, при регистрации гамма-кванта с энергией 1 МэВ амплитуда импульса напряжения на выходе составляет тысячные доли вольта. Для того чтобы энергетическое разрешение детектора не ухудшалось за счет собственных шумов усилительной аппаратуры, а амплитуда выходного сигнала при заданной энергии излучения слабо зависела от изменения емкости ППД, применяют специальный зарядочувствительный предусилитель с низким уровнем шумов, расположенный в непосредственной бли-

зости от детектора. Такой предусилитель имеет энергетический эквивалент шумов порядка 1 кэВ, что практически не сказывается на разрешении спектрометра при регистрации гамма-квантов с энергией в несколько сот килоэлектронвольт. В случае

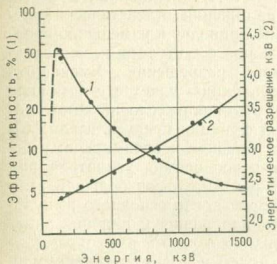


Рис. 1. Эффективность регистрации гамма-излучения Ge(Li)-детектором с чувствительным объемом 50 см³ (1) и энергетическое разрешение спектрометра с данным ППД (2)

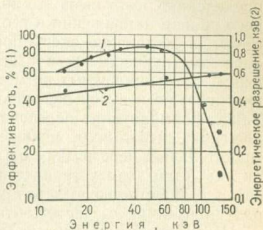


Рис. 2. Эффективность регистрации гамма-излучения радиационным Ge-детектором типа ДГР (1) и энергетическое разрешение спектрометра с данным детектором (2)

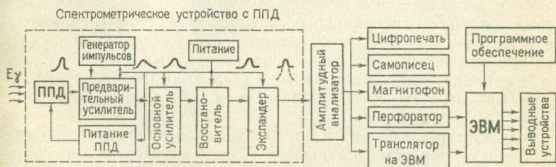


Рис. 3. Блок-схема гамма-спектрометра с ППД

применения детекторов мягкого γ -излучения, энергетическое разрешение которых составляет доли килоэлектронвольта, требуется значительно более низкий уровень шумов предусилителя. С этой целью головной каскад предусилителя помещают непосредственно в криостат детектора, где он охлаждается до температуры жидкого азота.

Функцией основного усилителя является линейное усиление и формирование сигнала, поступающего с предусилителя. В целях оптимизации отношения сигнал/шум предусмотрены цепи дифференцирования и интегрирования сигнала. Однако простое интегрирование и дифференцирование не обеспечивают наилуч-

шее отношение сигнал/шум. Дело в том, что наличие выброса после основного импульса приводит к увеличению мертвого времени усилителя. Кроме того, из-за выброса происходит искажение базовой линии для последующих импульсов, которое становится заметнее при повышении частоты следования входных импульсов; наряду с эффектом наложения статистически распределенных импульсов это явление приводит к изменению среднего уровня напряжения и его большой флуктуации и, как следствие, к ухудшению энергетического разрешения. Уменьшить смещение нулевой линии и ее флуктуацию удастся с помощью цепей, синтезированных по методу отыскания условий компенсации полюсов и нулей передаточной функции предусилителя [6]. Такое формирование обеспечивает близкое к оптимальному отношению сигнал/шум, меньшее мертвое время усилителя при значительных перегрузках от входных импульсов большой амплитуды (при этом устраняется выброс после основного импульса) и незначительную зависимость положения и ширины аппаратурной линии от частоты следования входных импульсов.

Принцип компенсации полюса нулем использован, например, в линейном усилителе, входящем в комплект амплитудного анализатора LP 4840 фирмы «Nokia». В нем предусмотрена регулировка, позволяющая для конкретной формы входного сигнала подбирать условия, при которых отсутствует выброс после основного сигнала. Схема формирования сигнала выдает импульсы, приближающиеся по форме к гауссовой кривой. Постоянная времени регулируется и имеет значения 0,5; 1; 2; 4; 8 мкс. При использовании однополярного сигнала может быть включена цепь восстановления базовой линии с переключением параметров при изменении частоты следования входных импульсов.

Многоканальный амплитудный анализатор предназначен для измерения амплитудного распределения импульсов, поступающих с усилителя.

Анализаторы с большим числом каналов являются сложными и весьма дорогими приборами. В ряде случаев можно обойтись анализатором со значительно меньшим числом каналов, особенно, если необходимо изучение узкого участка энергетического спектра. Однако для этого нужно иметь устройство для «вырезания» исследуемого диапазона амплитудного спектра. Для этих целей предназначен усилитель-экспандер, включаемый между усилителем и анализатором. Усилитель-экспандер линейно усиливает сигналы, амплитуда которых превышает некоторый заданный порог (уровень экспандирования). Иначе говоря, с его помощью можно «отсекать» в аппаратурном спектре амплитуд все, что ниже уровня экспандирования, а остальную часть спектра «растягивать» на всю шкалу анализатора.

Генератор импульсов стабильной амплитуды нужен для контроля основных характеристик измерительного тракта (энергетический эквивалент шумов, зависимость шумов от различных па-

раметров, проверка стабильности), а также для стыковки и энергетической калибровки частичных спектров, учета мертвого времени анализатора (замешиванием его сигналов в измеряемый спектр).

Источник питания ППД используется для создания необходимой напряженности электрического поля в чувствительном объеме ППД. Должна быть предусмотрена возможность плавной регулировки выходного напряжения, чтобы можно было медленно, без скачков поднимать или снижать напряжение на ППД, чтобы исключить возможность электрического пробоя входного усилительного каскада зарядочувствительного усилителя [12].

Для вывода с анализатора и записи результатов измерений имеются различные устройства, входящие обычно в комплект анализатора. С помощью цифropечатающего устройства фиксируется на бумажной ленте последовательно номер канала и количество зарегистрированных в нем импульсов. В таком виде информация о спектре пригодна лишь для ручной обработки. Запись результатов может быть также осуществлена в определенном коде на магнитную ленту с помощью магнитофона, и с магнитной ленты введена в ЭВМ для автоматической обработки или, при необходимости — обратно в анализатор, для последующей записи на другие типы регистрирующих устройств. Информация может быть записана в виде кривой амплитудного распределения с помощью самописца, а также в определенном коде — на перфоленту, которая затем используется для ввода этой информации в ЭВМ. Применение того или иного способа записи результатов измерений определяется решаемой задачей и характером имеющихся технических средств их обработки.

В наших работах было использовано два комплекта спектрометрической аппаратуры. Один состоял из прибора ЭЭС2-02 («Лангур») в сочетании с многоканальным анализатором АИ-4096. Прибор ЭЭС2-02 выпускается отечественной промышленностью и включает предварительный усилитель, линейный усилитель, усилитель-экспандер, генератор стабильной амплитуды, источник высоковольтного питания ППД.

Второй комплект представлял собой 800-канальный анализатор типа LP 4840 финского производства, содержащий все необходимые узлы и блоки для работы с ППД, включая перечисленные выше устройства для вывода и записи результатов измерений.

3. ВОЗМОЖНЫЕ ИСТОЧНИКИ ПОГРЕШНОСТЕЙ АНАЛИЗА

Представительность навески и точность взвешивания. Существуют определенные правила отбора и сокращения геологических проб, обеспечивающие представительность навески в I—

2 г, поступающей на химический анализ [13]. Как показали проведенные нами исследования по оценке воспроизводимости результатов ИНАА и сопоставлению ИНАА и химического анализа разнообразных горных пород и редкометалльных руд, навеска 200—400 мг обеспечивает вполне удовлетворительную представительность, соответствующую установленной точности рядовых количественных анализов. Исключением является золото, которое крайне неравномерно распределено в породах.

Погрешность взвешивания навески входит составной частью в погрешность анализа, поэтому нужно стремиться к точности взвешивания не хуже 1—2% при навесках 200—400 мг и максимально возможной точности при работе с малыми навесками (миллиграммы и доли миллиграмма). Часто промахи при взвешивании малых количеств пробы становятся источником недопустимых ошибок анализа.

Точность аттестации эталонов. Поскольку активационный анализ является относительным методом, погрешности аттестации содержания элементов в эталонной пробе входят составной частью в ошибку анализа. Наиболее надежными являются стандартные образцы горных пород и руд, прошедшие государственную аттестацию, но даже в них содержания установлены с определенной точностью, которая и определяет максимально достижимую точность ИНАА при их использовании.

Эталоны, приготовленные нанесением стандартного раствора определяемых элементов на фильтровальную бумагу, могут давать погрешности в результаты анализа до 10—15% относительных.

Неоднородность потока нейтронов. Различия в плотности потока тепловых нейтронов в различных точках канала облучения могут привести к неодинаковой активации проб, расположенных в пенале на разной высоте, что вызывает дополнительные погрешности. Как показали эксперименты, в используемых нами каналах реактора типа ТВР плотность потока по высоте пенала с пробами изменяется несильно; градиент потока равен примерно 5% на 10 см. В этих условиях применение трех эталонных или контрольных проб (мониторов), расположенных соответственно в верхней, средней и нижней частях пенала, позволяет контролировать неоднородность потока и учесть ее с точностью до 1—2%. При большем градиенте плотности потока целесообразно использовать большее число контрольных проб.

Эффект самоэкранирования. При облучении пробы, содержащей элементы, сильно поглощающие нейтроны, некоторая доля нейтронов поглотится в наружном слое пробы, в связи с чем внутренняя часть образца будет активироваться слабее. Степень уменьшения наведенной активности пробы за счет эффекта самоэкранирования нейтронов зависит от содержания поглощающего нейтроны элемента, массы и формы образца и некоторых других факторов, что затрудняет точные расчеты. Для

оценки влияния самоэкранирования при анализе проб горных пород нами было использовано эмпирическое соотношение [20]

$$\frac{\sigma m}{A} \approx 0,03,$$

где σ — сечение поглощения тепловых нейтронов для данного элемента;

m — масса образца в граммах;

A — атомная масса элемента.

При выполнении приведенного соотношения эффект самоэкранирования составляет 10%, что можно считать допустимым.

В табл. 1 приведены результаты расчета фактора $\sigma \cdot m/A$ для элементов с повышенным сечением поглощения, при массе элемента, соответствующей его кларковому содержанию, и навеске пробы 400 мг. В последней графе таблицы приведено содержание поглощающего элемента, при котором $\sigma \cdot m/A \approx 0,03$, т. е. когда расчетный эффект самоэкранирования равен 10%.

Сопоставление полученных данных с результатами расчета самоэкранирования по формуле из работы [4] для случая, когда

Таблица 1

Эффект самоэкранирования для элементов с высоким сечением поглощения нейтронов

Элемент	Сечение поглощения σ , бари	Кларк в породах, %	Масса элемента (навеска 400 мг)	Фактор $\frac{\sigma m}{A}$	Содержание элемента (%) при $\frac{\sigma m}{A} \approx 0,03$ (навеска 400 мг)
Li	71	$4 \cdot 10^{-3}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-4}$	0,75
B	758	$5 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	0,115 (03)
Cl	31	$2 \cdot 10^{-2}$	$8 \cdot 10^{-5}$	$7,1 \cdot 10^{-5}$	8,4
Fe	2,6	5,0	$2 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-4}$	100
Ag	64	$1 \cdot 10^{-5}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$2,4 \cdot 10^{-8}$	12,5
Cd	2540	$2 \cdot 10^{-5}$	$8 \cdot 10^{-8}$	$1,8 \cdot 10^{-6}$	0,33 (1)
In	194	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$2,0 \cdot 10^{-7}$	4,5 (14)
Sm	5830	$8 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,2 (0,6)
Eu	4400	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	0,2 (0,8)
Gd	46600	$8 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-6}$	$9,5 \cdot 10^{-4}$	0,025
Dy	936	$5 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-5}$	1,25 (4,2)
Er	173	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	7,5
Tm	127	$3 \cdot 10^{-5}$	$1,2 \cdot 10^{-7}$	$9,0 \cdot 10^{-8}$	10
Lu	112	$8 \cdot 10^{-5}$	$3,2 \cdot 10^{-7}$	$2,5 \cdot 10^{-7}$	9,7
Hf	102	$1 \cdot 10^{-4}$	$4 \cdot 10^{-7}$	$2,3 \cdot 10^{-7}$	13
Ta	210	$3 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-6}$	$1,4 \cdot 10^{-6}$	6,4
Au	48,8	$5 \cdot 10^{-7}$	$2 \cdot 10^{-9}$	$1,0 \cdot 10^{-9}$	15
Hg	374	$8 \cdot 10^{-6}$	$4 \cdot 10^{-8}$	$7,5 \cdot 10^{-8}$	3,2

$$\Sigma = 3,5 \cdot 10^{-3}$$

матрица имеет малое сечение поглощения, а самоэкранирование происходит благодаря примеси с большим сечением поглощения, показывает (см. цифры в скобках в последней графе табл. 1), что расчет по фактору $\sigma \cdot m/A$ накладывает примерно втрое более жесткие ограничения. Но даже по параметру $\sigma \cdot m/A$ влияние самоэкранирования для горных пород несущественно, так как сумма величин $\sigma \cdot m/A$ для всех элементов табл. 1 примерно на порядок ниже допустимого. Это значит, что при содержании всех элементов на порядок выше кларкового, эффект самоэкранирования составит 10%. По-видимому, наибольшую опасность может представлять гадолиний, так как повышенные содержания редких элементов (до 1—2% в сумме) могут встречаться в некоторых измененных породах.

При анализе проб с высоким содержанием редкоземельных или других элементов с высоким сечением поглощения нейтронов для исключения эффекта самоэкранирования приходится уменьшать навеску пробы, что приводит к потере чувствительности анализа. Например, при изучении лопарита, содержащего около 35% редкоземельных элементов, навеску приходится уменьшать до 1—2 мг.

Другой способ учета эффекта самоэкранирования заключается в активации и измерении нескольких образцов пробы разной массы. Находят зависимость эффекта самопоглощения от массы и используют ее для внесения поправки. Для примера на рис. 4 приведены экспериментальные данные по зависимости удельной активности (т. е. активности на единицу массы) некоторых проб от величины облучаемой навески.

Влияние самоэкранирования уменьшается при разубоживании исследуемой пробы материалом, слабо поглощающим нейтроны, например графитом. При этом важно, чтобы разбавитель был свободен от микропримесей.

Влияние конкурирующих реакций. В активной зоне реактора, где происходит облучение образцов, помимо тепловых нейтронов имеется некоторая доля быстрых нейтронов, вызывающих реакции типа (n, p) , (n, α) и др. В результате этих конкурирующих реакций может образоваться тот же радиоактивный изотоп, что и по реакции (n, γ) , но на изотопах других элементов, и результат анализа окажется завышенным.

Основные конкурирующие реакции, которые могут оказать заметное влияние при анализе геологических проб, приведены в табл. 2. В последнем столбце таблицы приведено отношение масс мешающего и определяемого элемента (K), при котором основная и конкурирующая реакции приводят к образованию равных количеств аналитического радиоизотопа. Для расчета величины K использованы ядерные константы из работы [15] и принято, что доля быстрых нейтронов в потоке составляет 10%. Из табл. 2 видно, что при этом конкурирующие реакции могут оказывать влияние лишь в случае определения Sc в минералах Ti,

Мп в минералах Fe, Na, в бокситах и в некоторых других частных случаях. Значение коэффициента K , необходимое для учета влияния конкурирующей реакции, обычно находят экспериментально облучением в заданных условиях определенных навесок мешающего и определяемого элемента. При этом важно, чтобы мешающий элемент не имел заметных примесей определяемого элемента.

В наших условиях при облучении в канале реактора типа ТВР с плотностью потока $1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/(с·см²) доля быстрых (надкадмиевых) нейтронов составляет примерно 0,6% от потока тепловых нейтронов [11], поэтому влиянием конкурирующих реакций можно пренебречь.

Микропримеси в материале упаковки. Выше отмечалось,

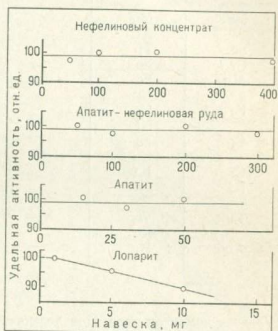


Рис. 4. Зависимость удельной активности от величины навески образца

что для упаковки проб при массовом анализе обычно используется полиэтиленовая пленка типа ВД или алюминиевая фольга марки А-995 как относительно «чистые» радиационно устойчивые и доступные материалы. Однако в некоторых случаях содержания микропримесей в них приходится учитывать, чтобы не внести заметных искажений в результаты анализа.

Продукты деления урана. Под действием тепловых нейтронов происходит деление ядер изотопа ^{235}U . Осколки деления представляют собой радиоизотопы элементов, расположенных в средней части периодической системы [3]. Наиболее существенные помехи создают такие продукты деления, как ^{140}Ba (^{140}La), ^{141}Ce , ^{147}Nd , ^{99}Mo и ^{95}Zr , поскольку эти радиоизотопы используются для определения в пробах лантана, церия, неодима, молибдена и циркония. В табл. 3 приведены расчетные значения наведенной активности соответствующего радиоизотопа при облучении 1 мкг природного урана и 1 мкг определяемого элемента (соответственно $A_{\text{дел}}$ и A), а также отношение $A_{\text{дел}}/A$, характеризующее уровень помех от урана. Расчет выполнен для следующих условий $\Phi = 1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/с·см²; $t_{\text{обл}} = 8$ ч. Расчетные данные находятся в удовлетворительном согласии с полученными экспериментально. Таким образом, при повышенных содержаниях урана в пробе необходимо вносить соответствующие поправки в результаты определения элементов, указанных в табл. 3.

Влияние конкурирующих реакций

Определяемый элемент	Мешающий элемент	Конкурирующая реакция	K
Na	Mg	$^{24}\text{Mg}(n, p)^{24}\text{Na}$	$5,6 \cdot 10^3$
	Al	$^{27}\text{Al}(n, \alpha)^{24}\text{Na}$	$9,1 \cdot 10^3$
Sc	Ti	$^{46}\text{Ti}(n, p)^{46}\text{Sc}$	$6,9 \cdot 10^5$
Cr	Fe	$^{54}\text{Fe}(n, \alpha)^{51}\text{Cr}$	$3,2 \cdot 10^5$
Mn	Fe	$^{56}\text{Fe}(n, p)^{56}\text{Mn}$	$5,7 \cdot 10^5$
	Co	$^{59}\text{Co}(n, \alpha)^{56}\text{Mn}$	$9,3 \cdot 10^5$
Fe	Co	$^{59}\text{Co}(n, p)^{59}\text{Fe}$	120
	Ni	$^{62}\text{Ni}(n, \alpha)^{59}\text{Fe}$	$6,4 \cdot 10^4$
Co	Ni	$^{60}\text{Ni}(n, p)^{60}\text{Co}$	$8,3 \cdot 10^4$
	Cu	$^{63}\text{Cu}(n, \alpha)^{60}\text{Co}$	$1,4 \cdot 10^6$
Cs	Ba	$^{134}\text{Ba}(n, p)^{134}\text{Cs}$	$1,1 \cdot 10^6$
Hf	Ta	$^{181}\text{Ta}(n, p)^{181}\text{Hf}$	$1,1 \cdot 10^4$
	W	$^{184}\text{W}(n, \alpha)^{181}\text{Hf}$	$6 \cdot 10^5$
Ta	W	$^{182}\text{W}(n, p)^{182}\text{Ta}$	$3,6 \cdot 10^5$
	Re	$^{185}\text{Re}(n, \alpha)^{182}\text{Ta}$	$5,8 \cdot 10^5$
Au	Hg	$^{198}\text{Hg}(n, p)^{198}\text{Au}$	$1,6 \cdot 10^5$

Таблица 3

Уровень помех от продуктов деления ^{235}U

Элемент	Радиоизотоп	Наведенная активность, распад/с $t_{\text{ост}} = 1$ сут		$\frac{A_{\text{дел}}}{A}$	Наведенная активность, распад/с $t_{\text{ост}} = 15$ дн.		$\frac{A_{\text{дел}}}{A}$
		$A_{\text{дел}}$	A		$A_{\text{дел}}$	A	
		Zr	^{95}Zr ^{97}Zr	24 800	3,1 9,1	7,8 8,8	21 0
Mo	^{90}Mo	450	480	0,94	14	15	0,94
La	^{140}La	30	3300	0,009	55	10	5,5
Ce	^{141}Ce ^{143}Ce	55 700	160 450	0,34 1,55	40 0,95	117 0,6	0,34 1,55
Nd	^{147}Nd	50	270	0,18	30	110	0,18

Контроль за содержанием урана в пробе с целью определения поправок при его повышенном содержании можно проводить по интенсивности гамма-излучения ^{239}Np , являющегося продуктом активации изотопа ^{238}U , или по гамма-излучению одного из продуктов деления ^{235}U , например радиоизотопа ^{131}I . Высокие содержания урана затрудняют или делают невозможным определение элементов, приведенных в табл. 3, при их низких концентрациях.

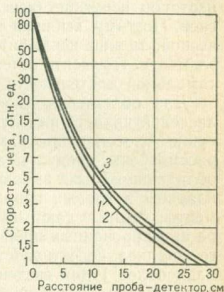
Геометрия измерений. Под геометрией измерений понимают взаимное расположение образца и детектора. Чувствительность

измерений, т. е. количество импульсов, зарегистрированных в фотопике за единицу времени, зависит от расстояния между пробой и детектором, от размеров и формы образца и детектора и ряда других факторов. Поэтому всегда стремятся эталон и пробу измерять в одинаковой геометрии, т. е. при равном расстоянии проба — детектор (d) и близких размерах пробы и эталона. Если проба и эталон имеют различные размеры, то расстояние d должно быть достаточно большим, чтобы размеры и пробы, и детектора были значительно меньше.

По мере приближения источника к детектору зависимость чувствительности от расстояния становится все более резкой (рис. 5). Так, при $d \approx 1-2$ см изменение расстояния на 2 мм приводит к изменению скорости счета на 7—10%. Поэтому при повторных установках пробы на торце криостата

Рис. 5. Зависимость чувствительности регистрации гамма-квантов от расстояния источник — детектор:

1 — для энергии 122 кэВ; 2 — для энергии 779 кэВ; 3 — для энергии 1408 кэВ



детектора ($d \approx 0,7-1$ см) трудно добиться воспроизводимости лучше, чем 10%. В связи с этим целесообразно проводить измерения проб при $d \geq 2-5$ см.

Другим ограничением при выборе расстояния d является частотная перегрузка усилительно-регистрирующего тракта, приводящая к ухудшению энергетического разрешения и подсчетам импульсов. Применяемая нами аппаратура допускала частотные загрузки до $5-10 \cdot 10^3$ имп/с, что и учитывалось при выборе расстояния d .

Следует обратить внимание еще на один факт, который необходимо учитывать при измерениях; зависимости чувствительности от величины d для гамма-линий с разной энергией различаются. Это объясняется изменением эффективной толщины детектора при изменении телесного угла, под которым падает измеряемое излучение. Для примера на рис. 5 показаны кривые для гамма-линий изотопа ^{152}Eu с энергией соответственно 122, 779 и 1408 кэВ. В качестве источника использован облученный препарат европия массой 1 мкг, нанесенный в виде диска диаметром 1,5 см на фильтровальную бумагу. Измерения проведены на Ge(Li)-детекторе с чувствительным объемом 50 см^3 .

4. АНАЛИЗ ПО ДОЛГОЖИВУЩИМ ИЗОТОПАМ

Одной из главных задач при выборе условий измерений является обеспечение необходимой селективности выделения активности определяемого изотопа среди активностей других продуктов активации. Несмотря на то, что применение ППД с высоким энергетическим разрешением значительно уменьшает вероятность наложения гамма-линий разных изотопов, в некоторых случаях такое наложение имеет место. Большинство радиоизотопов испускает несколько гамма-линий с различной энергией. Поэтому, выбирая ту или иную линию в качестве аналитической, можно исключить или уменьшить влияние мешающего элемента. Повысить селективность удастся и за счет выбора оптимальной длительности остывания пробы.

Для облегчения выбора условий измерений авторы оценили селективность выделения основных гамма-линий долгоживущих изотопов при различной длительности остывания. Были рассмотрены продукты активации 30 химических элементов, обладающих или высоким сечением активации, или высоким кларком в горных породах. Фактически рассмотрены все элементы, которые дают заметные по интенсивности линии в спектре активированных проб горных пород. Результаты проведенного анализа селективности для изотопов с периодом полураспада более 1 дня сведены в табл. 4. Значения энергии гамма-линий взяты из таблиц [22, 24]. Чувствительность измерений, указанная в столбце 2, получена экспериментально измерением активированных проб чистых элементов на Ge(Li)-детекторе с чувствительным объемом 50 см^3 , при расстоянии проба — детектор 5 см; активацию проб осуществляли в течение 4 ч при потоке $1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/с·см². Длительность остывания указана в таблице.

Принято, что мешающим является излучение с энергией, отличающейся от энергии аналитической линии не более чем на ± 5 кэВ. Степень влияния мешающих элементов охарактеризована эквивалентом определяемого элемента, т. е. отношением содержания мешающего элемента к содержанию определяемого элемента при равной интенсивности их гамма-линий в рассматриваемой энергетической области, или по-другому — отношение интенсивности гамма-излучения определяемого элемента к интенсивности излучения мешающего элемента при равном содержании этих элементов в пробе. Например, при определении лантана по линии 329 кэВ для длительности остывания 5 дней, 8,8% U эквивалентно по интенсивности измеряемого излучения 1% La.

Эти данные получены на основании расчета интенсивности гамма-линий, определяемых и мешающих элементов при их одинаковых содержаниях по известной формуле активации [14]. Значения выхода гамма-линий и сечения активации тепловыми

нейтронами взяты из работ [5, 22, 24]. Поскольку сечения активации известны с определенными погрешностями и энергетическое распределение нейтронов в каналах облучения несколько отличается от распределения для тепловых нейтронов, полученные значения эквивалентов являются ориентировочными. Тем не менее они позволяют в каждом конкретном случае оценивать опасность и уровень помех за счет наложения и обоснованно выбирать аналитическую линию и длительность остывания. Рассмотрим кратко эти вопросы применительно к каждому из элементов. Начнем с группы редкоземельных элементов, раздельное определение которых является сложной аналитической задачей и вместе с тем имеет большое значение при геохимических исследованиях.

Лантан. Обладает несколькими интенсивными линиями, и большинство из них может быть использовано в качестве аналитических. Обычно наиболее удобной является линия 329 кэВ, так как для горных пород фактически единственным потенциально опасным элементом является уран. Контроль за уровнем содержания урана и при необходимости учет его влияния целесообразно осуществлять по одной из линий изотопа ^{239}Np с энергией 228 и 278 кэВ. При измерениях по линии 487 кэВ существенную опасность помимо урана представляет гафний. Повышенные содержания гафния могут быть установлены и учтены по результатам повторного измерения после остывания в течение 25—30 дней, когда изотоп ^{140}La практически полностью распадается. Линия 1597 кэВ удобна тем, что в этой области энергий уровень комптоновского фона значительно ниже, что определяет лучшую статистическую точность измерений. Оптимальная длительность остывания ($t_{\text{ост}}$) — 6—8 дней.

Церий. Имеет единственную интенсивную линию 145 кэВ. Из мешающих элементов: помимо урана, следует отметить железо; при содержании церия 0,01% результат анализа будет завышен примерно на 10% отн., если в пробе содержится 15% железа. Поэтому при низких содержаниях церия необходимо контролировать интенсивность, например, линии 192 кэВ ^{59}Fe и по этим данным, если нужно, исправлять результаты измерений церия.

Неодим. Более селективны измерения по линии 531 кэВ. Фактически единственным мешающим элементом при анализе горных пород может явиться уран. О способе контроля за содержанием урана и учета его влияния говорилось выше.

Самарий. Обычно анализ ведут по линии 103 кэВ. Из мешающих элементов наибольшую опасность представляют торий, тантал и уран, если их содержание на порядок и более превышает содержание самария. Наиболее удобными линиями для контроля за уровнем содержания и учета влияния этих элементов являются соответственно 312 кэВ, 222 кэВ и 278 кэВ.

Селективность анализа по долгоживущим изотопам

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ, выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, нмп/мин на 1 мкг элемента при 1) $t_{ост}=5$ дн. 2) $t_{ост}=15$ дн. 3) $t_{ост}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=5$ дн.	$t_{ост}=15$ дн.	$t_{ост}=30$ дн.
Лантан ^{140}La 40,2 ч 329 (24); 487 (46,5); 816 (23,4); 868 (6); 925 (8,7); 1597 (94,5)	329 1) 180 2) 2,8 3) 0,006	Уран	^{140}Ba (^{140}La)	12,8 (1,7)	329	8,8	0,18	—
		Иридий	^{194}Ir	0,8	329	$3,4 \cdot 10^{-2}$	7,2	—
		Рутений	^{97}Ru	2,9	324	109	12,8	—
		Неодим	^{151}Nd (^{151}Pm)	1,2	324	280	800	—
		Кадмий	^{115}Cd ($^{115\text{m}}\text{In}$)	2,2 (4,4 ч)	336	4,9	1,8	—
487 1) 270 2) 4,3 3) 0,009	487	Уран	^{140}Ba (^{140}La)	12,8 (1,7)	487	8,8	0,18	—
		Барий	^{143}Ce	1,4	493	—	—	—
		Осмий	^{131}Ba	11,5	487	5300	145	—
		Иридий	^{193}Os	1,25	485	86	274	—
		Кадмий	^{192}Ir	74,2	485	$5,6 \cdot 10^{-2}$	$6 \cdot 10^{-3}$	—
		Гафний	^{115}Cd	44,2	492	2,2	0,62	—
		Теллур	^{181}Hf	42,5	482	5,2	0,1	—
		Европий	$^{129\text{m}}\text{Te}$	34,1	487	$3 \cdot 10^4$	570	—
		Кальций	^{152}Eu	12,7 года	489	79	1,1	—
		Церий	^{47}Ca (^{47}Sc)	4,5 (3,4)	489	$8,2 \cdot 10^5$	$6,1 \cdot 10^4$	—
		Церий	^{143}Ce	1,4	490	270	580	—
1597 1) 145 2) 2,4 3) 0,005	1597	Уран	^{140}Ba (^{140}La)	12,8 (1,7)	1597	8,8	0,18	—
		Европий	^{154}Eu	16 лет	1597	450	6	—

Церий ^{141}Ce 32,5 дня 145 (48)	145 1) 30 2) 25 3) 18	Уран	^{141}Ce	32,5	145	—	—	—
		Молибден	^{99}Mo (^{99}Tc)	2,8 (0,25)	141	0,41	1,95	2,9
		Железо	^{131}Te (^{131}I)	1,2 (8,1)	150	—	—	—
		Иттербий	^{99}Mo (^{99}Tc)	2,8 (0,25)	141	1,4	14	450
		Торий	^{59}Fe	44,6	142	$1,5 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^4$
		Теллур	^{175}Yb	4,2	145	1,2	5,4	26
		Тантал	^{233}Pa	27	145	25	26	28
			^{131}Te (^{131}I)	1,2 (8,1)	150	83	$4,7 \cdot 10^3$	∞
			^{182}Ta	115,1	152	0,7	0,6	0,5
		Неодим ^{147}Nd 71,0 дней 91,1 (21) 531 (10,5)	91,1 1) 19 2) 10 3) 4	Уран	^{147}Nd	11,0	91,1	5,6
Гафний	^{175}Hf			70	89,6	3,2	1,9	0,9
Тербий	^{160}Tb			72,3	86,8	0,13	$7,5 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-2}$
Торий	^{233}Pa			27	86,6; 94,7	0,2	0,14	0,08
Тантал	^{182}Ta			115,1	98,4	—	—	—
Барий	^{131}Ba			11,5	84,7	2,5	1,4	0,6
Иттербий	^{169}Yb			30,6	92,3	$1,9 \cdot 10^3$	$1,8 \cdot 10^3$	$1,6 \cdot 10^3$
Селен	^{75}Se			120	93,6	2,45	1,6	0,9
Гадолиний	^{153}Gd			242	96,7	23,2	12,8	5,6
					^{153}Gd	242	97,5	2,5
Самарий ^{153}Sm 47,1 ч 69,7 (4); 103,2 (28,2)	103,2 1) 7050 2) 200 3) 1,0	Гадолиний	^{153}Gd	242	97,5	$6 \cdot 10^2$	20	0,15
		Торий	^{233}Pa	27	103,2	—	—	—
		Уран	^{239}Np	2,35	98,4; 103,9	140	6	0,06
		Тантал	^{182}Ta	115,1	103,6	50	27	5
		Осмий	^{193}Os	1,2	106,0	120	3,6	0,02
		Иттербий	^{169}Yb	30,6	100,1	830	$5,2 \cdot 10^3$	∞
					107,0	20	0,7	0,01

Определяемый элемент; радиоизотоп; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ; выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, нмп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{ост}=5$ дн. 2) $t_{ост}=15$ дн. 3) $t_{ост}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радиоизотоп	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=5$ дн.	$t_{ост}=15$ дн.	$t_{ост}=30$ дн.
Европий ^{152}Eu 12,7 года 121,8 (33,2); 245 (7,2) 344 (31,4) 444 (3,3) 779 (15,2) 964 (17,3) 1086 (10) 1408 (24,3) ^{154}Eu 16 лет 123 (40,5) 248 (6,6) 723 (19,7) 996 (10,3) 1274 (35,5)	121,8+123,1 1) 800 2) 800 3) 800	Селен	^{75}Se	120	121	190	200	210
		Неодим	^{147}Nd	11,0	121	$3,5 \cdot 10^3$	$5,2 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^3$
		Иттербий	^{169}Yb	30,6	118	36	49	75
		Тантал	^{182}Ta	115,1	116	250	280	330
	245+248 1) 120 2) 120 3) 120	Серебро	^{110m}Ag	250	116	$2,2 \cdot 10^3$	$2,4 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^3$
		Рений	^{186}Re	3,7	123	15	82	$1,3 \cdot 10^3$
		Барий	^{131}Ba	11,5	124	$3,1 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$	$7,8 \cdot 10^3$
		Барий	^{131}Ba	11,5	240; 247 249	$3,3 \cdot 10^3$	$6,0 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^4$
		Неодим	^{151}Nd (^{151}Pm)	(1,2)	237; 240	320	$1,2 \cdot 10^5$	∞
		Уран	^{127}Sb	3,8	250	210	$1,9 \cdot 10^3$	∞
		Уран	^{131}Te (^{131}I)	1,2 (8,1)	241	210	$1,9 \cdot 10^3$	∞
		Лютеций	^{177}Lu	6,7	250	3,8	10	50
		Иттербий	^{175}Yb	4,2	251	88	480	$5,3 \cdot 10^3$
		Осмий	^{193}Os	1,2	252	87	$2,9 \cdot 10^4$	∞
344 1) 250 2) 250 3) 250	Гафний		^{175}Hf	70	343	8,9	10	12
			^{181}Hf	42,5	346			
		Неодим	^{151}Nd (^{151}Pm)	(1,2)	340; 345	670	$2,5 \cdot 10^5$	∞
		Торий	^{233}Pa	27	341	30	41	65
		Церий	^{143}Ce	1,4	351	890	$1,3 \cdot 10^5$	∞
	Уран		^{143}Ce	1,4	351	530	$7,8 \cdot 10^4$	∞

779 1) 46 2) 46 3) 46	Молибден	^{99}Mo	2,8	778	98	$1,2 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^4$
	Бром	^{82}Br	1,4	776	0,8	85	$1,2 \cdot 10^5$
	Теллур	^{131m}Te	1,2	774; 783	530	$1,5 \cdot 10^5$	∞
	Вольфрам	^{187}W	1,0	773	6,5	$6,5 \cdot 10^3$	∞
	Уран	^{132}Te (^{132}I)	3,2 (0,1)	773			
1408 1) 45 2) 45 3) 45	Уран	^{99}Mo	2,8	778	45	500	$5 \cdot 10^3$
		^{131}Te (^{131}I)	1,2 (8,1)	780			
	Практически нет						

Гадолиний ^{153}Gd 242 дня 97,5 (31,7) 103,2 (21)	97,5 1) 7,4 2) 7,2 3) 6,9	Селен	^{75}Se	120	96,7	4,9	5,1	5,4
		Платина	^{191}Pt	2,7	96,5	40	390	∞
		Неодим	^{151}Nd (^{151}Pm)	(1,2)	98—105	2,1	420	∞
		Тантал	^{182}Ta	115,1	100,1	0,12	0,12	0,13
		Торий	^{233}Pa	27	94,7 98,4	0,06	0,08	0,12

103,2 1) 5,1 2) 5,0 3) 4,8	Неодим		^{151}Nd (^{151}Pm)	(1,2)	98—105	2,1	420	∞
		Тантал	^{182}Ta	115,1	100,1	0,07	0,07	0,08
		Теллур	^{131}Te (^{131}I)	1,2 (8,1)	101,7	12	150	210
		Самарий	^{129}Te	34,1	105,5			
		Торий	^{153}Sm	2,0	103,2	$7 \cdot 10^{-4}$	0,025	4,2
	Торий		^{233}Pa	27	103,9	1,0	1,3	1,8

Тербий ^{160}Tb 72,3 дня 86,8 (13,9) 197 (5,1) 299 (27) 879 (29,7)	299 1) 145 2) 135 3) 115	Европий	^{152}Eu	12,7	296	49	44	35
		Иридий	^{192}Ir	74,1	296	0,16	0,15	0,14
		Церий	^{143}Ce	1,4	293	56	$8,4 \cdot 10^3$	∞
		Уран	^{143}Ce	1,4	293	30	290	550
		Торий	^{140}Ba (^{140}La)	12,8 (1,7)	304	11	12,5	15,5
		Селен	^{233}Pa	27	300			
			^{75}Se	120	304	850	840	770

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ; выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{ост}=5$ дн. 2) $t_{ост}=15$ дн. 3) $t_{ост}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=5$ дн.	$t_{ост}=15$ дн.	$t_{ост}=30$ дн.
962 (9,9) 966 (25,2) 1178 (15,2) 1272 (7,4)	879 1) 49 2) 44 3) 38	Европий Уран Церий Серебро	¹⁵⁴ Eu ¹⁴³ Ce ¹³³ I (¹³³ Xe) ¹⁴³ Ce ^{110m} Ag	16 лет 1,4 0,9 (5,3) 1,4 250	873 880 875 880 884	50 500 2,8·10 ³ 26	45 1,5·10 ⁴ 4,2·10 ⁵ 23	36 ∞ ∞ 21
Туллий ¹⁷⁰ Tm 128,4 дня 84,3 (3,4)	84,3 1) 102 2) 97 3) 89	Платина Уран Барий Теллур Тантал Торий Тербий Гафний	¹⁹¹ Pt ¹³¹ Te (¹³¹ I) ¹³³ I (¹³³ Xe) ¹³³ Ba ¹³¹ Ba ¹³¹ Te (¹³¹ I) ¹⁸² Ta ²³³ Pa ¹⁶⁰ Tb ¹⁷⁵ Hf	2,7 1,2 (8,1) 0,9 (5,3) 10,7 года 11,5 1,2 (8,1) 115,1 27 72,3 70	82,4 80,2 81,0 81,0 79,6 80,9 84,7 86,6 86,8 89,4	540 14 6,5·10 ³ 510 6,0 4,0 1,5 93	7,3·10 ³ — 8,6·10 ³ 1,4·10 ³ 6,1 6,2 1,6 94	∞ — 1·10 ⁴ 4,7·10 ³ 6,4 8,6 9,8 100
Иттербий ¹⁸⁹ Yb 30,6 дней 63,1 (45)	110(+114 ¹⁷⁵ Yb) 1) 410 2) 120 3) 45	Осмий Гадолиний Уран	¹⁹³ Os ¹⁶¹ Gd (¹⁶¹ Tb) ¹⁵³ Gd ¹²⁹ Te ²³⁹ Np	1,2 (7,2) 242 34,1 2,35	107 106 103 106 106	46 80 8,7·10 ³ 2,9	1·10 ⁴ 24 1·10 ⁴ 16	∞ 9,5 1,5·10 ⁴ 225

110 (18) 131 (11) 177 (22) 198 (35) 308 (10)		Торий Лютеций Тантал Серебро	²³³ Pa ¹⁷⁷ Lu ¹⁸² Ta ^{110m} Ag	27 6,7 115,1 250	110—114 113 114; 116 116	15 0,3 52 620	16 0,7 16 570	18 1,7 0,9 440
177 1) 73 2) 59 3) 43		Неодим Платина Тантал Осмий Молибден Теллур Уран	¹⁵¹ Nd (¹⁵¹ Pm) ¹⁹¹ Pt ¹⁸² Ta ¹⁹³ Os ⁹⁹ Mo ¹³¹ Te ⁹⁹ Mo ¹³¹ Te	(1,2) 2,7 115,1 1,2 2,8 1,2 2,8 1,2	177 179 179 180; 182 181 182; 183 181; 182 183	46 3·10 ³ 17 90 55 2,7·10 ³ 65	1,5·10 ⁴ 3,2·10 ⁴ 15 2,4·10 ⁴ 580 9,9·10 ⁴ 870	∞ 1,1·10 ⁶ 13 8,8·10 ⁷ 1,2·10 ⁴ ∞ 1,8·10 ⁴
198 1) 110 2) 87 3) 63		Тербий Железо Индий Ртуть Тантал Селен Неодим	¹⁶⁰ Tb ⁵⁹ Fe ¹¹⁴ In ¹⁹⁷ Hg ¹⁸² Ta ⁷⁵ Se ¹⁵¹ Nd (¹⁵¹ Pm)	72,3 44,6 50 2,7 115,1 120 (1,2)	197 192 192 192 198 199 202	1,6 1,7·10 ⁴ 26 66 20 410 3·10 ³	1,4 1,6·10 ⁴ 24 750 17 350 7,9·10 ⁷	1,2 1,5·10 ⁴ 21 ∞ 14 275 ∞
175Yb 4,2 дня 283 (3,7) 396 (6)	283 1) 230 2) 43 3) 3,6	Ртуть Селен Осмий Уран Неодим	²⁰³ Hg ¹⁹⁷ Hg ⁷⁵ Se ¹⁹³ Os ¹³¹ I ¹⁴⁹ Nd (¹⁴⁹ Pm)	46,4 1,0 120,4 1,3 8,1 0,8 (2,2)	279 280 280 281 284 286	6,5 45 14 140 3,1·10 ⁴	1,6 9 600 75 1,3·10 ⁴	— — — — —
396 1) 330 2) 62 3) 5,2		Тербий Неодим Селен	¹⁶⁰ Tb ¹⁴⁷ Nd ⁷⁵ Se	72,3 11 120,4	392 398 401	65 7,7·10 ⁴ 270	14 2,7·10 ⁴ 52	— — —

Определяемый элемент; радиоизотоп; период полураспада; энергия основных γ-линий, кэВ, выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{ост}=5$ дн. 2) $t_{ост}=15$ дн. 3) $t_{ост}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радиоизотоп	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ-линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=5$ дн.	$t_{ост}=15$ дн.	$t_{ост}=30$ дн.
Лютеций ^{177}Lu 6,7 дня 113 (3,2) 208 (6,1)	208 1) 2350 2) 840 3) 180	Платин	^{199}Pt (^{199}Au)	(3,1)	208	150	460	$2,5 \cdot 10^3$
		Иридий	^{192}Ir	74,1	206	2,1	0,8	0,21
		Неодим	^{151}Nd (^{151}Pm)	(1,2)	209	$4 \cdot 10^3$	$4,8 \cdot 10^3$	∞
Уран		Уран	^{239}Np	2,35	209	41	270	∞
		Иттербий	^{169}Yb	30,6	93,6	2,7	2,3	2,0
		Селен	^{75}Se	120,4	96,7	110	90	64
Торий ^{232}Pa 27 дней 94,7 (7)+ 98,4 (12) 300 (6,3) 312 (34) 341 (3,9)	94,7+98,4 1) 88 2) 68 3) 47	Гадолиний	^{153}Gd	242	97,5	12	10	7
		Тантал	^{182}Ta	115,1	100	1	0,8	0,5
		Теллур	^{131}Te	1,2	102	540	$2,8 \cdot 10^4$	∞
	312 1) 82 2) 64 3) 44	Неодим	^{151}Nd (^{151}Pm)	(1,2)	102; 100	240	$3,4 \cdot 10^4$	∞
		Самарий	^{153}Sm	2,0	103	0,015	0,4	12
		Тербий	^{160}Tb	72,3	310	15	12	9
		Иридий	^{192}Ir	74,2	308; 316	$1,6 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,0 \cdot 10^{-2}$
		Иттербий	^{169}Yb	30,6	308	4	3,5	3
		Рутений	^{105}Rh	1,5	306; 319	21	$1,5 \cdot 10^3$	$1,0 \cdot 10^3$
Скандий ^{46}Sc 83,8 дня 889 (100) 1120 (100)	889 1) 405 2) 375 3) 325	Серебро	^{110m}Ag	250	885	215	200	180
		Европий	^{154}Eu	16 лет	893	$3,6 \cdot 10^3$	$3,3 \cdot 10^3$	$2,9 \cdot 10^3$
		Цинк	^{65}Zn	245	1115	450	450	440
	1120 1) 360 2) 340 3) 310	Тербий	^{160}Tb	72,3	1115	230	240	250
		Тантал	^{182}Ta	115,1	1121	28	27	27
		Неодим	^{151}Nd (^{152}Pm)	(1,2)	104,9 102,100	130	$2,3 \cdot 10^3$	—
Уран ^{239}Np 2,35 дня 106 (23) 228 (12) 278 (14)	106 1) 140 2) 7,5 3) 0,2	Гадолиний	^{153}Gd	242	103,2	2,0	1,5	—
		Самарий	^{151}Gd (^{161}Tb)	7,2	106,1	0,02	0,04	—
		Теллур	^{153}Sm	2,0	103,2	140	9,4	—
	228 1) 27 2) 1,4 3) 0,04	Тантал	^{129m}Te	34,1	106	2,4	0,14	—
		Осмий	^{182}Ta	115,1	100,1	26	300	—
		Иттербий	^{193}Os	1,25	107	0,9	0,06	—
	278 1) 14 2) 0,7 3) 0,02	Торий	^{169}Yb	30,6	110	39	2,7	—
		Гадолиний	^{233}Pa	27	103,9	3	0,18	—
		Тантал	^{159}Gd	0,75	226	$1,3 \cdot 10^3$	∞	—
		Бром	^{182}Ta	115,1	229	5,1	30	—
		Кадмий	^{82}Br	1,4	221	67	74	—
		Церий	^{115}Cd	2,2	231	150	$1,2 \cdot 10^3$	—
		Неодим	^{143}Ce	1,4	232	380	$4,8 \cdot 10^3$	—
		Неодим	^{151}Nd (^{151}Pm)	(1,2)	232	47	14	—
		Бром	^{147}Nd	11,0	275	1,6	9,0	—
		Ртуть	^{151}Nd (^{151}Pm)	(1,2)	275	0,5	0,03	—
		Селен	^{82}Br	1,4	273	0,5	0,03	—
		Осмий	^{203}Hg	46,6	279	2,8	0,15	—
		Иттербий	^{197}Hg	1,0	280	7,2	85	—
		Иттербий	^{75}Se	120,4	280	0,06	$1,6 \cdot 10^{-2}$	—
		Иттербий	^{193}Os	1,2	281	—	—	—
		Иттербий	^{175}Yb	4,2	283	—	—	—

Определяемый элемент; радиоизотоп; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ; выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{ост}=5$ дн. 2) $t_{ост}=15$ дн. 3) $t_{ост}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радиоизотоп	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=5$ дн.	$t_{ост}=15$ дн.	$t_{ост}=30$ дн.
Уран ^{140}Ba (^{140}La) 12,8 дня (40,2 ч) 1597 (94,5)	1597 1) 4,0 2) 2,3 3) 1,0	Лантан Европий	^{140}La ^{154}Eu	1,7 16 лет	1597 1597	$2,7 \cdot 10^{-2}$ 17	1,0 12	200 5,5
Тантал ^{182}Ta 115,1 дня 67,8 (42) 100,1 (14) 152 (7) 222 (8) 1121 (37) 1189 (17) 1221 (29) 1231 (12)	222 1) 20 2) 19	Бром Уран	^{82}Br ^{239}Np	1,4 2,35	221 228	3 0,7	$4,2 \cdot 10^2$ 13,6	∞ 425
		Скандий Цинк Тербий	^{46}Sc ^{65}Zn ^{160}Tb	83,8 245 72,3	1120 1115 1115	0,04 16 3	0,04 16 3,1	0,04 16 3,4
	1189 1) 6,0 2) 5,7 3) 5,2	Иридий	^{194}Ir	0,8	1184	16	$7,1 \cdot 10^6$	∞
	1221+1231 1) 13 2) 12,5 3) 11,5	Олово Мышьяк Европий	^{125}Sn ^{76}As ^{152}Eu	9,4 1,1 12,7 года	1221 1229; 1216 1220 1213	$5,7 \cdot 10^4$ 3,1 4,3	$1 \cdot 10^5$ $5,7 \cdot 10^4$ 4,0	$3,5 \cdot 10^5$ ∞ 3,7
Цезий ^{134}Cs 2,07 года 563 (8) 569 (14) 605 (98) 796 (88) 802 (9)	605 1) 29 2) 29 3) 28,5	Иридий Сурьма Бром Рутений Уран	^{192}Ir ^{124}Sb ^{82}Br ^{103}Ru ^{97}Zr (^{97}Nb) ^{131}Te (^{131}I) ^{103}Ru	74,2 60,4 1,4 39,4 0,7 1,2 39,4	604; 612 603 606 610 602 602 610	0,15 1,3 28 65 602 300	0,16 1,45 $3 \cdot 10^3$ 83 480	0,19 1,8 ∞ 120 700
	796 1) 19 2) 19 3) 18,7	Олово Уран	^{125}Sn ^{131}Te (^{131}I)	9,4 1,2	800 794	$2,9 \cdot 10^4$ 480	$5,8 \cdot 10^4$ $2,1 \cdot 10^5$	$1,5 \cdot 10^5$ ∞
Рубидий ^{86}Rb 18,7 дня 1077 (7,8)	1077 1) 0,4 2) 0,25 3) 0,13	Практически нет						
Натрий ^{24}Na 14,96 ч 1369 (100) 1732 анниг. 2754 (100)	1369 1) 94 2) $1,4 \cdot 10^{-3}$ 3) —	Практически нет						
	1732 1) 1,6 2) $0,2 \cdot 10^{-4}$ 3) —	Практически нет						

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ, выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{ост}=5$ дн. 2) $t_{ост}=15$ дн. 3) $t_{ост}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=5$ дн.	$t_{ост}=15$ дн.	$t_{ост}=30$ дн.
Гафний ¹⁸¹ Hf 42,5 дня 133 (40) 136 (6) 346 (13) 482 (81)	133+136 1) 125 2) 105 3) 84	Иттербий	¹⁶⁹ Yb ¹⁷⁵ Yb	30,6 4,2	131 138	2,5	2,5	3
		Осмий	¹⁹¹ Os ¹⁹³ Os	14,6 1,25	129 139	1,5	4,5	6,4
		Барий Ртуть Вольфрам Селен Рений Неодим Уран	¹³¹ Ba ¹⁹⁷ Hg ¹⁸⁷ W ⁷⁵ Se ¹⁸⁶ Re ¹⁵¹ Nd (¹⁵¹ Pm) ¹³¹ Te (¹³¹ I)	11,5 1,0 1,0 120,4 3,7 1,2 1,2	134 134 134 136 137 139 135	$5,1 \cdot 10^3$ 10 1,1 12,6 0,10 $1,3 \cdot 10^3$ $5,4 \cdot 10^3$	$7,8 \cdot 10^3$ $8,6 \cdot 10^3$ 960 11,9 0,63 $3,6 \cdot 10^5$ $1,5 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^4$ ∞ ∞ 11,7 7,8 ∞ ∞
346 1) 28 2) 25 3) 21	Неодим Европий Гадолиний Церий Уран	¹⁵¹ Nd (¹⁵¹ Pm)	1,2	345; 340	7,8	$1,3 \cdot 10^3$	∞	
		¹⁵² Eu	12,7 года	344	0,12	0,1	0,07	
		¹⁵⁹ Gd ¹⁴³ Ce ¹⁴³ Ce	0,75 1,4 1,4	348 351 351	510 41 25	$4,5 \cdot 10^6$ $5 \cdot 10^3$ $3 \cdot 10^3$	∞ ∞ ∞	
482 1) 52 2) 44	Барий Вольфрам Иридий	¹³¹ Ba	11,5	481; 487	$6,8 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$	$2,0 \cdot 10^4$	
		¹⁸⁷ W	1,0	479	0,09	88	∞	
		¹⁹² Ir	74,2	485	0,64	0,60	0,57	
3) 35	Кадмий Осмий Лантан Европий Уран	¹¹⁶ Cd	44,2	485	160	190	200	
		¹⁹³ Os	1,25	485	140	$2,6 \cdot 10^4$	∞	
		¹⁴⁰ La ¹⁵² Eu ¹⁴⁰ Ba (¹⁴⁰ La)	1,7 12,7 года 12,8 (1,7)	487 489 487	0,2 18 13	11 15 17	$3,9 \cdot 10^3$ 12 30	
Цирконий ⁹⁵ Zr (⁹⁵ Nb) 65,2 дня 35,6 дня 724 (43) 757 (54,6) 766 (99)	724 1) 0,04 2) 0,035 3) 0,03	Европий	¹⁵² Eu	12,7 года	719	$3 \cdot 10^{-3}$	$2,9 \cdot 10^{-3}$	$2,5 \cdot 10^{-3}$
		Сурьма	¹⁵⁴ Eu ¹²⁴ Sb	16 лет 60,4	723 723	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$	$1,7 \cdot 10^{-2}$
		Церий Осмий Индий Уран	¹⁴³ Ce ¹⁸⁵ Os ¹¹⁴ In ¹³¹ I ¹⁴³ Ce ⁹⁵ Zr (⁹⁵ Nb)	1,4 93,6 50 8,1 1,4 65,2	722 717 725 730 722 724	0,43 13 0,16 0,16 0,13	58 12 0,16 0,13	∞ 12 0,17 0,13
757 1) 0,035 2) 0,031 3) 0,026	Лантан Европий Уран	¹⁴⁰ La	1,7	752	0,002	0,15	65	
		¹⁵⁴ Eu	16 лет	757	0,02	0,02	0,017	
		⁹⁵ Zr	65,2	757	0,13	0,13	0,13	
766 1) 0,006 2) 0,019 3) 0,028	Тербий Серебро Вольфрам Уран	¹⁶⁰ Tb	72,3	765	$2 \cdot 10^{-3}$	$8,0 \cdot 10^{-3}$	$1,2 \cdot 10^{-2}$	
		^{110m} Ag	250,4	764	$1,2 \cdot 10^{-2}$	$5 \cdot 10^{-2}$	$9 \cdot 10^{-2}$	
		¹⁸⁷ W ⁹⁵ Zr (⁹⁵ Nb)	1,0 65,2 (35,6)	773 766	$1,4 \cdot 10^{-3}$ 0,13	5,3 0,13	$7,8 \cdot 10^5$ 0,13	
Стронций ⁸⁵ Sr 63,2 дня 514 (100)	514 1) 0,1 2) 0,09 3) 0,08	Теллур	¹²¹ Te	17	508	41	56	85
		Цирконий	⁹⁷ Zr	0,7	508	120	∞	∞
		Натрий Цинк Вольфрам	²⁴ Na ⁶⁵ Zn ¹⁸⁷ W	15,0 ч 245 1,0	511 511 512	0,04 1,0 0,03	3000 0,9 30	∞ 0,85 ∞

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ, выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{ост}=5$ дн. 2) $t_{ост}=15$ дн. 3) $t_{ост}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=5$ дн.	$t_{ост}=15$ дн.	$t_{ост}=30$ дн.
Барий ^{131}Ba 11,5 дня 124 (16) 216 (10) 373 (7,6) 496 (24)	124 1) 0,28 2) 0,15 3) 0,064	Европий	^{154}Eu ^{152}Eu	16 лет 12,7 года	123 122	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-5}$
		Селен Неодим Иттербий	^{75}Se ^{147}Nd ^{169}Yb	120,4 11,0 30,6	121 120 118; 131	0,06 8,5 $6,3 \cdot 10^{-3}$	0,03 8,8 $4,2 \cdot 10^{-3}$	0,02 9,5 $2,5 \cdot 10^{-3}$
		Рутений Тербий Неодим Осмий Платина Бром Тантал	^{97}Ru ^{160}Tb ^{151}Nd (^{151}Pm) ^{193}Os ^{191}Pt ^{82}Br ^{182}Ta	2,9 72,3 1,2 1,25 2,7 1,4 115,1	216 216 209 219 220 221 222	0,04 $4,1 \cdot 10^{-3}$ 0,7 0,09 8 $1,6 \cdot 10^{-4}$ $6,5 \cdot 10^{-3}$	0,2 $2,4 \cdot 10^{-3}$ 80 11,0 46 1,0 $3,7 \cdot 10^{-3}$	2,5 $1,2 \cdot 10^{-3}$ $1,8 \cdot 10^5$ ∞ 470 ∞ $1,8 \cdot 10^{-3}$
496 1) 0,11 2) 0,063 3) 0,026	Кадмий Церий Кальций Лантан Рутений Уран	^{115}Cd ^{143}Ce	2,2 1,4	492 490	$4,6 \cdot 10^{-2}$ 1,2	0,5 96	17 $6,6 \cdot 10^4$	
		^{47}Ca ^{140}La ^{103}Ru ^{143}Ce	4,5 1,7 39,4 1,4	489 487 497 490	330 $4 \cdot 10^{-4}$ $1 \cdot 10^{-2}$ 0,72	890 0,015 $8 \cdot 10^{-3}$ 41	$3,7 \cdot 10^3$ 2,9 $5 \cdot 10^{-3}$ $1 \cdot 10^4$	
		Неодим Родий Рутений Иридий Лютеций Осмий Уран	^{151}Nd (^{151}Pm) ^{147}Nd ^{105}Rh ^{97}Ru ^{192}Ir ^{177}Lu ^{193}Os ^{147}Nd ^{105}Rh	1,2 11,0 1,5 2,9 74,2 6,7 1,25 11,0 1,5	324 319 319 324 316 321 322 319 319	$1 \cdot 10^3$ $1,4 \cdot 10^3$ 2,9 120 $2,4 \cdot 10^{-3}$ $2,0 \cdot 10^{-3}$ 0,3 1,8 82 140	$2,6 \cdot 10^3$ ∞ $1,4 \cdot 10^{-3}$ 2,1 ∞ 230	
Хром ^{51}Cr 27,7 дня 320 (9)	320 1) 11 2) 8,5 3) 6,0	Цезий Тербий	^{134}Cs ^{160}Tb	2,1 года 72,3	1168 1179	64 0,7	64 0,8	64 1,0
		Практически нет						
Железо ^{59}Fe 44,6 дня 192 (2,6) 1099 (56,5) 1292 (43,2)	192 1) 0,0063 2) 0,0054 3) 0,0043	Ртуть Индий Германий	^{197}Hg ^{114}In ^{77}Ge	2,7 50 0,47	192 190 195	$2,4 \cdot 10^{-4}$ $1,5 \cdot 10^{-3}$ 13	$2,8 \cdot 10^{-2}$ $1,5 \cdot 10^{-3}$ ∞	0,78 $1,4 \cdot 10^{-3}$ ∞
		Европий Тербий Церий Уран	^{152}Eu ^{160}Tb ^{143}Ce ^{143}Ce	12,7 года 72,3 1,4 1,4	1090 1103 1103 1103	$1,2 \cdot 10^{-2}$ $3,9 \cdot 10^{-2}$ 4,0 2,4	$1,0 \cdot 10^{-2}$ $3,7 \cdot 10^{-2}$ 540 215	$8,1 \cdot 10^{-3}$ $3,5 \cdot 10^{-3}$ ∞ ∞
		Кадмий Тантал Кальций Европий	^{115}Cd ^{182}Ta ^{47}Ca ^{152}Eu	44,2 115,1 4,5 12,7 года	1290 1289 1297 1299	11 0,02 4,8 $2,6 \cdot 10^{-3}$	11 0,018 18 $2,2 \cdot 10^{-3}$	11 0,015 143 $1,8 \cdot 10^{-3}$

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ, выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{ост}=5$ дн. 2) $t_{ост}=15$ дн. 3) $t_{ост}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=5$ дн.	$t_{ост}=15$ дн.	$t_{ост}=30$ дн.
Мышьяк ^{76}As 26,8 ч 554 (6,8) 559 (44,6) 657 (6,3) 1216 (3,4)	559 1) 95 2) 0,2 3) $2 \cdot 10^{-5}$	Бром Индий Цезий Европий Сурьма	^{82}Br	33,3 ч	554	1,1	0,25	$2,8 \cdot 10^{-2}$
			^{114m}In	50	558	$3 \cdot 10^2$	0,70	$9 \cdot 10^{-5}$
			^{134}Cs	2,07 года	563	33	$7 \cdot 10^{-2}$	$7 \cdot 10^{-6}$
			^{152}Eu	12,7 года	564	17	$3,5 \cdot 10^{-2}$	$3,5 \cdot 10^{-6}$
			^{122}Sb	2,74	564	0,5	$1 \cdot 10^{-2}$	$4,2 \cdot 10^{-5}$
Сурьма ^{122}Sb 2,74 дня 564 (66) 692 (3,5)	564 1) 200 2) 17 3) 0,5	Мышьяк Цезий Европий	^{76}As	26,8 ч	559	2,0	100	$2,4 \cdot 10^4$
			^{134}Cs	2,07 года	563 569	25	2,1	$6 \cdot 10^{-2}$
			^{152}Eu	12,7 года	564	35	3,0	$9 \cdot 10^{-2}$
Сурьма ^{124}Sb 60,4 дня 603 (98) 645 (7,2) 723 (11,3) 1691 (49)	603 1) 22 2) 20 3) 16	Иридий Цезий	^{192}Ir	74,2	604	0,1	0,1	0,1
			^{136}Cs	2,07 года	605	0,8	0,7	0,6
			Практически нет					
	1691 1) 2,0 2) 1,8 3) 1,5							
Молибден ^{99}Mo 2,8 дня 140,5 (95) 740 (14)	140,5 1) 22 2) 1,8 3) $4 \cdot 10^{-2}$	Селен Гафний Рений Железо Церий	^{75}Se	120,4	136	1,4	0,1	$2,8 \cdot 10^{-3}$
			^{181}Hf	42,5	136	0,2	$2 \cdot 10^{-2}$	$4,8 \cdot 10^{-4}$
			^{186}Re	3,7	137	$5,8 \cdot 10^{-2}$	$3,4 \cdot 10^{-2}$	$1,4 \cdot 10^{-2}$
			^{59}Fe	44,6	142	$8,1 \cdot 10^3$	$7,8 \cdot 10^2$	22
			^{141}Ce	32,5	145	0,7	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$2,2 \cdot 10^{-3}$
Селен ^{76}Se 120,4 дня 136 (58,5) 265 (61) 280 (25,4)	265 1) 9,0 2) 8,6 3) 7,9	Иттербий Тантал	^{169}Yb	30,6	261	3,3	4,0	5,0
			^{182}Ta	115,1	264	0,8	0,8	0,8
Вольфрам ^{187}W 24 ч 72 (11) 134 (10) 479 (26) 686 (32)	479 1) 580 2) 0,5 3) $1,4 \cdot 10^{-5}$	Гафний Кадмий	^{181}Hf	42,5	482	11	$1 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-7}$
			^{115}Cd	44,2	485	$1,9 \cdot 10^4$	20	$1 \cdot 10^{-3}$
	686 1) 550 2) 0,5 3) $1,4 \cdot 10^{-5}$	Тербий Сурьма Серебро Европий	^{160}Tb	72,3	682	840	0,7	$2 \cdot 10^{-5}$
			^{122}Sb	2,74	692	83	0,9	$1 \cdot 10^{-3}$
			^{110m}Ag	250,4	687	830	0,8	$2 \cdot 10^{-5}$
			^{152}Eu	12,7 года	689	97	$8,8 \cdot 10^{-2}$	$2,4 \cdot 10^{-6}$
			^{154}Eu	16 лет	692			
Цинк ^{65}Zn 245 дней 1115 (49)	1115 1) 0,8 2) 0,8 3) 0,7	Европий Тербий Скандий Тантал	^{152}Eu	12,7 года	1112	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$
			^{160}Tb	72,3	1115	0,5	0,6	0,6
			^{46}Sc	83,8	1120	$3,0 \cdot 10^{-3}$	$3,2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-3}$
			^{182}Ta	115,1	1121	$6,1 \cdot 10^{-2}$	$6,2 \cdot 10^{-2}$	$6,4 \cdot 10^{-2}$
Серебро ^{107m}Ag 250,4 дня 658 (94,4)	658 1) 3,7 2) 3,6 3) 3,5	Мышьяк	^{76}As	26,8 ч	657	0,34	$1,8 \cdot 10^2$	∞

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ, выход, %	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{\text{ост}}=5$ дн. 2) $t_{\text{ост}}=15$ дн. 3) $t_{\text{ост}}=30$ дн.	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{\text{ост}}=5$ дн.	$t_{\text{ост}}=15$ дн.	$t_{\text{ост}}=30$ дн.
764 (22,6) 884 (75,1) 937 (34,4) 1384 (26,1)	884 1) 1,9 2) 1,9 3) 1,8	Тербий Скандий	^{160}Tb ^{46}Sc	72,3 83,8	879 889	$3,9 \cdot 10^{-2}$ $4,7 \cdot 10^{-3}$	$4,2 \cdot 10^{-2}$ $5 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-2}$ $5,6 \cdot 10^{-3}$
Кадмий ^{115}Cd ($^{115\text{m}}\text{In}$) 2,2 дня (4,4 ч) 492 (8,1) 528 (27,5) +336 (45)	528 1) 8,0 2) 0,34 3) $3,2 \cdot 10^{-3}$	Неодим Уран	^{147}Nd	11,0	531	1,2	0,1	$2,5 \cdot 10^{-3}$
			^{147}Nd ^{133}Xe	11,0 5,3	531 529	0,38	$6 \cdot 10^{-2}$	$1,6 \cdot 10^{-3}$
	336 1) 37 2) 1,6 3) $1,5 \cdot 10^{-2}$	Теллур Уран Тербий Неодим	$^{131\text{m}}\text{Te}$	1,2	335	$3 \cdot 10^2$	$4,3 \cdot 10^3$	$2 \cdot 10^5$
			$^{131\text{m}}\text{Te}$	1,2	335	$3,5 \cdot 10^2$	$5,1 \cdot 10^3$	$2,5 \cdot 10^5$
			^{160}Tb	72,3	337	19	0,9	$1 \cdot 10^{-2}$
			^{151}Pm	28,4 ч	340	$1 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^3$	$7,5 \cdot 10^5$
Золото ^{198}Au 2,7 дня 412 (95)	412 1) $1 \cdot 10^4$ 2) 740 3) 16	Европий	^{152}Eu	12,7 года	411	470	35	0,8

Европий. Хорошо активизируется, имеет большое число интенсивных линий. Наиболее удобны для использования в качестве аналитических линии 122 кэВ, 779 кэВ и 1408 кэВ.

Гадолиний. Определение гадолиния по линиям 97,5 или 103,2 кэВ может быть серьезно осложнено помехами от урана, тория, самария и тантала. Влияние самария и урана исключается выдержкой в течение 20—30 дней. Уровень помех от тория значительно меньше при анализе по линии 103,2 кэВ. Поправка на влияние тория может быть найдена по линии 312 кэВ ^{233}Ra , или по соотношению линий 97,5 и 103,2 кэВ, поскольку вклад тория в них различен. Определения гадолиния становятся затруднительными, если помимо тория проба содержит повышенные количества тантала. Более высокая селективность определений гадолиния достигается при использовании полупроводникового детектора рентгеновского излучения.

Тербий. Наиболее удобны линии 299 и 879 кэВ. Линия 879 кэВ практически не имеет помех. Влияние европия, как правило, незначительно, так как тербий и европий присутствуют в пробах обычно в соизмеримых количествах. Однако при высоких содержаниях скандия значительно возрастает уровень комптоновского фона под пиком, что ухудшает точность и чувствительность определений. При анализе по линии 299 кэВ основным мешающим элементом является торий; влияние тория учитывают по линии 312 кэВ.

Тулий. Определения тулия по линии 84,3 кэВ обычно затруднены в связи с низким уровнем его содержания в пробах, а также значительными помехами от тербия (86,8 кэВ), тория (86,5 кэВ) и тантала (84,7 кэВ). Селективность измерений улучшается при использовании ППД рентгеновского излучения с энергетическим разрешением 0,5—0,7 кэВ. В этом случае единственным мешающим элементом является тантал, влияние которого можно проконтролировать и учесть, например, по линии 67,8 кэВ.

Иттербий. Наиболее селективны измерения по линии 177 кэВ; мешающим в этом случае является лишь тантал, при его содержании в 10—15 раз выше, чем иттербия. Однако эта линия часто оказывается на крутом участке комптоновского распределения, в результате чего возрастают погрешности измерения ее интенсивности. Более удобна линия 283 кэВ ^{175}Yb , которая, как правило, не осложнена мешающими линиями и при длительности остывания 8—10 дней позволяет определять иттербий с чувствительностью и точностью, более высокой по сравнению с линией 177 кэВ. В некоторых случаях можно использовать и линии 396 кэВ.

Лютеций. Лучшая селективность обеспечивается при измерениях по линии 208 кэВ. В этом случае помех, как правило, нет.

Торий. Определению тория по линии 98,4 кэВ мешают тантал и в меньшей степени иттербий. При повышенных содержаниях тантала использование этой линии нецелесообразно. Результаты анализа по линии 312 кэВ могут быть искажены в случае, когда содержание тербия и иттербия в 5—10 раз превышает содержание тория. Обычно влияние этих элементов не существенно.

Скандий. Любая из двух линий может быть использована в качестве аналитической. Линия 889 кэВ расположена на крутом склоне комптоновского распределения, что может при низких содержаниях скандия затруднить точное определение уровня фона и привести к значительным погрешностям анализа. Определения по линии 1120 кэВ, как правило, достаточно селективны. Однако при энергетическом разрешении спектрометра хуже 4—5 кэВ линия 1112 кэВ европия частично накладывается на аналитическую. Другими источниками помех являются повышенные содержания тантала и цинка.

Уран. Хотя линия 106 кэВ имеет более высокую интенсивность по сравнению с другими линиями этого изотопа, ее использование обычно затруднено из-за больших помех, в первую очередь от влияния самария. Более высокую селективность обеспечивают измерения линий 228 или 278 кэВ. Возможным мешающим элементом в первом случае является тантал, а во втором — иттербий. С учетом этого обстоятельства выбирают ту или иную линию. Показателем отсутствия помех может служить отношение интенсивностей этих двух пиков, $t_{\text{ост}} = 5 \div \div 7$ дней. Другой способ высокоселективного определения урана заключается в измерении одной из линий изотопа ^{140}La после выдержки в течение 25—30 дней. Способ основан на том, что при делении ядер урана (^{235}U) под действием нейтронов образуется радиоизотоп ^{140}Ba , при распаде которого возникает изотоп ^{140}La . Период полураспада ^{140}Ba 12,8 дней. Следовательно, активность изотопа ^{140}La , образованного из урана, убывает с периодом полураспада 12,8 дня, тогда как активность изотопа ^{140}La , являющегося продуктом активации лантана, убывает с периодом полураспада 40,2 ч и через 25—30 дней практически полностью исчезает.

Тантал. Высокая селективность и чувствительность анализа обеспечивается при использовании линии 1221 кэВ или суммы линий 1221+1231 кэВ [8]. В ряде случаев удобно проводить определения по линии 222 кэВ, которая также не имеет практически помех.

Цезий. Наибольшая чувствительность анализа достигается при измерениях линии 605 кэВ. В случае повышенных содержаний сурьмы целесообразно использовать линию 796 кэВ, которая обычно не имеет помех.

Рубидий. Определяется с высокой селективностью по линии 1077 кэВ.

Натрий. Определение натрия в геологических пробах обычно не представляет каких-либо сложностей, в связи с его высоким содержанием и большим сечением активации. Измерение удобно проводить по линии 1369 кэВ.

Гафний. Более удобна линия 482 кэВ; влияние лантана исключается выдержкой в течение 25—30 дней. В редких случаях возможны помехи от европия, урана и кальция. Контроль осуществляется по другим линиям этих элементов. Если пробы не содержат повышенных количеств иттербия, может быть использована линия 133 кэВ.

Цирконий. Чувствительность определений не высока, так как цирконий имеет низкое сечение активации. Анализ эффективен при изучении поведения циркония и гафния в циркониевых минералах и их рудах. Мешающим элементом при анализе по любой линии является уран, влияние которого при не очень высоких содержаниях может быть учтено. Кроме того, для линии 757 кэВ возможны помехи от европия, а для линии 766 кэВ — от тория, что следует учитывать при выборе аналитической линии.

Стронций. Измерения по линии 514 кэВ обеспечивают высокую селективность анализа при $t_{\text{ост}} > 12—15$ дней.

Барий. Наиболее удобной является линия 496 кэВ; при $t_{\text{ост}} = 20 \div 30$ дней помехи обычно незначительны.

Хром. Имеется одна линия с энергией 320 кэВ. Влияние мешающих элементов, как правило, не существенно.

Кобальт. Более удобна линия 1333 кэВ, практически не имеющая помех.

Железо. При анализе горных пород, содержащих обычно несколько процентов железа, в качестве аналитической может быть использована любая из трех приведенных линий. Наиболее селективны определения по линии 192 кэВ. При высоких содержаниях кальция необходимо корректировать результаты измерений по линии 1292 кэВ, если $t_{\text{ост}} < 35—40$ дней.

Мышьяк. При анализе по наиболее интенсивной линии 559 кэВ основным мешающим элементом является сурьма. При использовании современных ППД, обладающих достаточным энергетическим разрешением для разделения линий мышьяка и сурьмы, их взаимное влияние исключается; $t_{\text{ост}} = 5 \div 6$ дней. Если в пробах возможны высокие содержания индия, цезия и европия, контроль за уровнем помех от этих элементов может быть осуществлен путем повторного измерения с $t_{\text{ост}} = 10 \div 15$ дней; при наличии пика в аналитической области значение его интенсивности вычитается из результатов первого измерения.

Селен. Наиболее удобна для анализа линия с энергией 265 кэВ. Возможное влияние тантала следует контролировать по одной из его аналитических линий.

Сурьма. При анализе по линии 564 кэВ основным мешающим элементом является мышьяк, влияние которого должно учитываться, если энергетическое разрешение спектрометра недостаточно для разделения этих линий. Для уменьшения влияния мышьяка длительность остывания может быть увеличена до 9—10 дней. Для линии 603 кэВ изотопа ^{124}Sb мешающим является излучение цезия; контроль и учет его проводится по линии 796 кэВ. Наиболее высокая селективность достигается при использовании линии 1691 кэВ.

Молибден. Современные спектрометры с ППД обладают достаточным энергетическим разрешением для отделения аналитической линии молибдена от мешающих линий селена, гафния и церия.

Вольфрам. Обычно одна из двух приведенных аналитических линий или обе линии свободны от помех.

Цинк. Чувствительность определений цинка, а также рассмотренных ниже элементов (серебро, кадмий, золото), как правило, недостаточна для их выявления в горных породах. Метод эффективен при анализе сульфидных минералов и руд.

Единственная линия цинка с энергией 1115 кэВ может быть осложнена наложением излучения европия, скандия, тантала и в меньшей степени тербия. Поэтому необходимо контролировать содержание в пробе этих элементов и при необходимости вводить соответствующие поправки. При высоком уровне помех их точный учет может оказаться затруднительным.

Серебро. Наиболее интенсивная линия 658 кэВ является и самой «чистой» от помех. При длительности остывания более 10—15 дней влияние других элементов несущественно.

Кадмий. Измерение линии 528 кэВ при $t_{\text{ост}}=5\div 6$ дней, как правило, достаточно селективно. Контроль уровня помех можно осуществить путем повторного измерения через 15—20 дней, когда изотоп ^{115}Cd практически полностью распадается. В большинстве случаев возможно использование и линии 336 кэВ.

Золото. Обычно влияние мешающих элементов незначительно. При необходимости влияние европия можно учесть по результатам измерений других его линий.

Рассмотренные изотопы имеют различные периоды полураспада от 1 дня до нескольких лет. Оптимальная длительность остывания также различна. При групповом анализе целесообразно разделить все определяемые элементы на группы с близкими периодами полураспада с тем, чтобы свести число повторных измерений пробы к минимуму. Опыт производственного использования метода показал, что в большинстве случаев достаточно трех измерений, включающих определение следующих элементов: а) $t_{\text{ост}}=5\div 8$ дней — La, Sm, Yb, Lu, U, Na, As, Sb, Mo, W, Cd, Au; б) $t_{\text{ост}}=12\div 15$ дней — Ce, Nd, Lu, Th, Rb, Ba,

Чувствительность ИНАА по долгоживущим изотопам

Элемент	Энергия аналитической линии, кэВ	Время остывания, дни	Порог чувствительности, 10^{-4} , %	Элемент	Энергия аналитической линии, кэВ	Время остывания, дни	Порог чувствительности, 10^{-4} , %
La	329	5—8	0,8	Na	1369	5—8	10
Ce	145	30—40	3,0	Hf	482	30—40	0,8
Nd	531	12—15	50	Zr	766	30—40	80
Sm	103	5—8	0,6	Sr	514	30—40	80
Eu	122	30—40	0,1	Ba	496	12—15	100
Gd	103	30—40	15	Cr	320	12—15	20
Tb	299	30—40	0,8	Co	1333	30—40	0,7
Tm	84	30—40	1,0	Fe	192	30—40	500
					1099		300
Yb	396	5—8	0,8	As	559	5—8	1,0
Lu	208	12—15	0,5	Se	265	30—40	10
Th	312	12—15	1	Sb	564	5—8	0,8
					1691	30—40	1,0
Sc	889	30—40	0,2	Mo	141	5—8	30
	1120	30—40	0,2	W			
U	278	5—8	5,0		686	5—8	5,0
	1596	30—40	7,0	Zn	1115	30—40	70
Ta	222	30—40	1,0	Ag	658	30—40	30
	1221	30—40	0,6				
Cs	605	30—40	0,5	Cd	336	5—8	50
	796	30—40	0,7				
Rb	1077	12—15	8,0	Au	412	5—8	0,06

Cr, Yb; в) $t_{\text{ост}}=30\div 40$ дней — Eu, Gd, Tb, Tm, Sc, U, Ta, Cs, Hf, Zr, Sr, Co, Fe, Sb, Zn, Ag, Se.

Уменьшать время остывания для первой группы элементов обычно не целесообразно, так как чувствительность измерений этих изотопов лимитируется расстоянием проба — детектор, которое определяется в основном активностью натрия (из-за частотной перегрузки аппаратуры). Поскольку период полураспада натрия меньше, чем любого из определяемых элементов, выгоднее проводить измерение на малом расстоянии проба —

Таблица 6

Состав образцов

Элемент	Содержание, $\times 10^{-4}\%$						
	1	2	3	4	5	6	7
Na	1,9%	1,9%	12,5%	2700	8,2%	3,1%	4,65%
K	7800	8300	7,3%	2000	5,4%	3,7%	1,22%
Sc	0,05	1,6	0,2	32	0,2	11	—
Cr	—	—	—	—	—	39	—
Mn	470	1300	490	4000	1400	1200	380
Fe	8000	2,6%	2,2%	17%	2,2%	3,8%	—
Co	4,0	12	0,7	20	0,5	9,5	—
Cu	—	—	—	150	—	57	—
Zn	—	—	—	—	—	130	—
Rb	—	—	210	—	180	130	—
Sr	1,7%	8000	170	650	170	110	4700
Zr	—	1200	150	—	—	—	160
Cs	1,5	2,8	2,0	—	2,1	5,5	—
Ba	—	2500	950	—	600	1400	—
La	2100	1700	30	5800	390	42	11,1%
Ce	3200	3600	77	1,5%	710	100	22,6%
Pr	350	330	—	2900	—	—	1,85%
Nd	1000	1200	25	5500	210	35	3,9%
Sm	170	260	5,0	1500	40	8,0	1700
Eu	56	78	2,0	75	10	1,5	550
Gd	180	300	5,4	2300	43	5,6	—
Tb	9,0	14	0,6	230	1,6	0,4	30
Dy	66	82	9,5	2600	8,0	—	90
Ho	8,0	17	—	500	2,2	—	30
Er	4,9	51	—	1100	6,0	—	150
Tm	6,0	7,2	—	290	—	—	—
Yb	9,0	12	1,4	2000	6,0	2,2	270
Lu	1,2	1,7	0,2	320	0,8	0,45	32
Hf	1,5	35	4,8	250	53	6,0	—
Ta	1,5	170	1,1	20	22	0,5	5600
W	—	—	—	490	—	—	—
Th	17	120	4,0	4500	50	25	4800
U	1,0	3,0	—	—	—	9,0	—

Примечание. 1 — апатит-нефелиновая руда; 2 — сфеновый концентрат; 3 — нефелиновый концентрат; 4 — иттро-сикхизитовая руда; 5 — нефелиновый сиенит; 6 — гранодиорит; 7 — лопарит.

детектор сразу после спада основной доли активности натрия, т. е. при $t_{\text{ост}}=5\div 7$ дней.

Только три элемента — Gd, Hf и Zr — требуют длительности остывания не менее 25—30 дней. Поэтому в случае, когда определение этих элементов не требуется, можно объединить вторую и третью группу в одну с $t_{\text{ост}}=15\div 20$ дней, что почти не отразится на чувствительности анализа и даст значительный выигрыш в производительности.

В табл. 5 приведены значения пороговой чувствительности определения перечисленных выше элементов при анализе проб горных пород в навесках 400 мг, при длительности облучения 6 ч в потоке $1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/с·см² и длительности измерений 15 мин. За порог чувствительности принято содержание в пробе элемента, дающее аналитический пик, по интенсивности равный тройной среднеквадратичной флуктуации величины фона под ним [2]. Приводимые цифры являются средними для пород разного состава.

Для примера в прилож. 1 приведены спектрограммы некоторых образцов. Измерения проведены при расстоянии проба — детектор, равном 5 см. Состав проб приведен в табл. 6.

5. АНАЛИЗ ПО ОТНОСИТЕЛЬНО КОРОТКОЖИВУЩИМ ИЗОТОПАМ

В настоящем разделе рассмотрены возможности анализа по изотопам с периодом полураспада от 1—2 до 30—50 ч, которые мы условно назвали короткоживущими. Изотопы с меньшими периодами полураспада нами не использовались, поскольку время, необходимое для доставки образцов в лабораторию после окончания их активации, составляло 4—5 ч, в течение которых эти изотопы практически полностью распадаются.

Чтобы иметь возможность измерять пробы уже через несколько часов после облучения, длительность активации потоком $1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/с·см² не должна превышать 5—10 мин. Основным фактором, ограничивающим чувствительность ИНАА горных пород по короткоживущим изотопам, является высокая гамма-активность проб, обусловленная натрием (²⁴Na) и марганцем (⁵⁶Mn) и приводящая к высокому уровню фона комptonовского распределения и частотной перегрузке спектрометра.

Короткое облучение позволяет дополнительно определить Pг, Dy, Ho, Er, K, Mn, Cu, Ga, In и некоторые другие элементы. Кроме того, при небольшом времени остывания повышается селективность измерения элементов с периодом полураспада 1—2 дня (La, Sm, W и др.) по отношению к долгоживущим изотопам; повышается также экспрессность анализа.

В табл. 7 приведены результаты оценки селективности измерений основных линий короткоживущих изотопов при дли-

Селективность анализа по короткоживущим изотопам

Определяемый элемент; радиоизотоп; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ, (выход, %)	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{ост}=6$ ч 2) $t_{ост}=24$ ч	Мешающие элементы					
		Элемент	Радиоизотоп	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента	
						$t_{ост}=6$ ч	$t_{ост}=24$ ч
Лантан ^{140}La 40,22 ч 329 (24) 487 (46,5) 816 (23,4) 1597 (94,5)	329 1) 467 2) 343	Иридий Уран	^{194}Ir	0,81	329	0,15	0,21
			^{131}Te ^{140}La	1,2 1,675	335 329		
	487 1) 652 2) 478	Гафний Кадмий	^{181}Hf ^{115m}Cd ^{115}Cd ^{117m}Cd	42,45 44,2 2,2 0,14	482 484 492 485	84 94	62 $1 \cdot 10^2$
1597 1) 393 2) 288	Уран Галлий	^{192}Ir ^{131m}Te ^{140}La	74,17 1,2 1,675	485 493 487	26,2 50	19,3 50	
		^{140}La ^{72}Ga	1,675 0,58	1596 1597	51 20	50 37	
Церий ^{143}Ce 33,4 ч 57,4 (11,6) 293 (41,3) 664 (5,2)	293 1) 11,4 2) 7,8	Осмий Иридий Эрбий Тербий Торий Уран	^{193}Os	1,29	289; 299	2,3	2,3
			^{194}Ir	0,81	294	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^{-2}$
			^{192}Ir	74,17	296	$4,4 \cdot 10^{-2}$	0,16
			^{171}Er	0,31	296	0,55	0,38
			^{160}Tb	72,3	299	5,2	3,5
			^{233}Pa	27,0	300	0,8	0,8
			^{143}Ce	1,39	293		
Празеодим ^{142}Pr 19,2 ч 1576 (3,7)	1576 1) 26,0 2) 13,6	Кадмий	^{117}Cd	2,6 ч	1577	18,4	$1,2 \cdot 10^3$
Самарий ^{153}Sm 47,1 ч 69,7 (4,04) 103 (28,2)	103 1) 6149 2) 4710	Гадолиний Тантал Торий Уран	^{153}Gd	242	103	$2,5 \cdot 10^3$	$1,9 \cdot 10^3$
			^{161}Gd (^{161}Tb)	3,7 мин (7,2)	106	$7,4 \cdot 10^2$	$5,7 \cdot 10^2$
			^{182}Ta	115,1	100	$4,9 \cdot 10^2$	$3,8 \cdot 10^2$
			^{233}Pa ^{239}Np	27,0 2,3	98,4; 104 99,5; 103,6; 106	25,2	24,3
Европий ^{152m}Eu 9,3 ч 122 (8) 344 (2,7) 842 (13) 963 (12)	122 1) $1,38 \cdot 10^5$ 2) $4,27 \cdot 10^4$	Эрбий	^{171}Er	7,5 ч	117; 124	$3,6 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$
			Торий Гафний	^{233}Pa ^{175}Hf ^{181}Hf	27,0 70,0 42,45	341 343 346	$1,3 \cdot 10^4$ $4,3 \cdot 10^3$
	842 1) $3,82 \cdot 10^4$ 2) $1,19 \cdot 10^4$	Галлий Марганец	^{72}Ga ^{56}Mn	14,1 ч 2,58 ч	834 847	69,4 5,5	51,3 $2,2 \cdot 10^2$
			Тербий	^{180}Tb	72,3	962; 966	$4,3 \cdot 10^3$

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ; (выход, %)	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при: 1) $t_{\text{ост}}=6$ ч 2) $t_{\text{ост}}=24$ ч	Мешающие элементы																					
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента																	
						$t_{\text{ост}}=6$ ч	$t_{\text{ост}}=24$ ч																
Гадолиний ^{159}Gd 18,0 ч 58,0 (1,8) 364 (10)	364 1) 18,9 2) 9,5	Диспрозий	^{165}Dy	2,4 ч	362	$6,6 \cdot 10^{-3}$	0,56																
		Осмий	^{193}Os	1,29	362			6,8	$1,9 \cdot 10^3$														
		Никель	^{65}Ni	2,5 ч	366			24		6,3													
		Теллур	^{131}I	8,067	364			12			6,55												
		Европий	^{152}Eu	12,7 года	368			13,0				3,6											
Уран	^{99}Mo	2,78	366	5,6	3,6																		
	^{131}I	8,067	364																				
Диспрозий ^{159}Dy 142,4 мин 94,7 (4) 280 (0,6) 362 (1,1) 633 (0,7) 715 (0,7)	94,7 1) $2,86 \cdot 10^4$ 2) $1,42 \cdot 10^2$	Неодим	^{147}Nd	11,02		91,1	$6 \cdot 10^3$	35															
			^{149}Nd	0,072		97,0			$1,6 \cdot 10^4$	$1,4 \cdot 10^2$													
		Иттербий	^{169}Yb	30,6		93,6					$2,8 \cdot 10^4$	18											
		Гадолиний	^{153}Gd	242	97,5	$3,6 \cdot 10^3$							12										
		Тантал	^{182}Ta	115,1	110									$2,4 \cdot 10^3$	12								
	Торий	^{233}Pa	27,0	98,4																			
	362 1) 2868 2) 16,9	Осмий	^{193}Os	1,29	362		36,0	0,4															
		Гадолиний	^{159}Gd	0,75	364				$1,5 \cdot 10^2$	1,8													
		Никель	^{65}Ni	2,5 ч	366	$4,1 \cdot 10^3$					$3,4 \cdot 10^3$												
		Молибден	^{99}Mo	2,79	366							$4,4 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^2$										
Европий		^{152}Eu	12,7 года	368	$2,0 \cdot 10^3$									11,6									
Уран	^{99}Mo	2,79	366	$2,5 \cdot 10^2$			1,5																
	^{127}Te	0,39	360					$1,7 \cdot 10^3$	10,0														
	^{131}I	8,067	364																				
	^{131}I	8,067	364																				
	Теллур	^{131}I	8,067		364																		
Гольмий ^{166}Ho 26,79 ч 80,6 (6,2) 1375 (0,93)	80,6 1) 2225 2) 1712	Ртуть	^{197}Hg	2,67	77,4	50,0	41,0																
		Тулий	^{170}Tm	128,4	84,7			$1,6 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^2$														
		Тантал	^{182}Ta	115,1	84,7					$2,1 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$												
		Торий	^{233}Pa	27,0	75,3; 86,5							$9,6 \cdot 10^2$	$7,4 \cdot 10^2$										
		Уран	^{131}I	8,067	80,2									$1,5 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^2$								
			^{131}Te	1,2	80,9																		
			^{133}Xe	5,31	81,0																		
Эрбий ^{171}Er 7,52 ч 112 (32) 124 (14) 296 (45) 308 (100)	112 1) 416 2) 75,5	Иттербий	^{169}Yb	32,0	110	5,5	1,0																
			^{175}Yb	4,2	113,5			0,71	0,14														
		Лютеций	^{177}Lu	6,7	113					$3,8 \cdot 10^2$	69												
		Тантал	^{182}Ta	115,1	114; 116																		
	296 1) 260 2) 50,3	Иридий	^{192}Ir	74,17	296	0,6	0,16																
			^{194}Ir	0,81	294; 301			22,8	6,5														
		Церий	^{143}Ce	1,39	293					12,3	2,4												
		Тербий	^{160}Tb	72,3	299							$1,2 \cdot 10^2$	24										
		Торий	^{233}Pa	27,0	300									29	8,1								
Уран	^{143}Ce	1,39	293																				
308 1) 520 2) 104	Торий	^{233}Pa	27,0	312	41,6	8,0																	
	Иттербий	^{169}Yb	30,6	308			87,5	33,7															
	Иридий	^{192}Ir	74,17	308					2,8	1,1													
Лютеций ^{176}Lu 3,7 ч 88,4 (10)	88,4 1) 1931 2) 66	Тулий	^{170}Tm	128,4	84,3	$1,4 \cdot 10^2$					4,6												
		Тантал	^{182}Ta	115,1	84,7		$1,8 \cdot 10^3$	61															
		Тербий	^{160}Tb	72,3	86,8				92	3,2													
		Палладий	^{103}Pd	0,56	88,0							1,3	0,2										
		Гафний	^{175}Hf	70,0	89,6									$2,3 \cdot 10^3$	77,6								
		Неодим	^{147}Nd	11,02	91,1											$8,4 \cdot 10^2$	9,0						
		Торий	^{233}Pa	27,0	86,6													$2,6 \cdot 10^3$	89				
		Уран	$^{131\text{m}}\text{Te}$	1,2	80,9															$2,5 \cdot 10^2$	22		
			$^{127\text{m}}\text{Te}$	105	88,3																		
			^{147}Nd	11,02	91,1																		

Определяемый элемент; радиоизотоп; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ; (выход, %)	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при 1) $t_{ост}=6$ ч 2) $t_{ост}=24$ ч	Мешающие элементы					
		Элемент	Радиоизотоп	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента	
						$t_{ост}=6$ ч	$t_{ост}=24$ ч
Натрий ^{24}Na 14,96 ч 1369 (100) 1732 анниг. 2754 (100)	1369 1) 238 2) 10	Гольмий	^{166}Ho	1,12	1375	8,5	5,8
	1734 1) 38,7 2) 16,7	Практически нет					
Калий ^{42}K 12,437 ч 1524 (18)	1524 1) 5,4 2) 1,9	Практически нет					
Марганец ^{56}Mn 2,582 ч 847 (99) 1811 (21)	847 1) 6955 2) 55	Европий	^{152m}Eu ^{154}Eu	0,39 16 лет	842 845	0,18	$4,6 \cdot 10^{-3}$
	1811 1) 857 2) 6,8	Практически нет					
Медь ^{64}Cu 12,8 ч 511 анниг. 1348 (0,5)	511 1) 710 2) 274	Никель	^{65}Ni	0,106	507	$1,25 \cdot 10^4$	$7,5 \cdot 10^5$
		Натрий	^{24}Na	0,62	511	13	11,2
		Вольфрам	^{187}W	1,0	512	60	39
		Цинк	^{65}Zn	243,8	511	$3,1 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^4$
		Стронций Диспрозий	^{71m}Zn	4,1 ч	512	$3,1 \cdot 10^4$	$1,2 \cdot 10^4$
			^{85}Sr	63,19	514	$3,1 \cdot 10^4$	$2,6 \cdot 10^3$
			^{165}Dy	2,4 ч	515	36	
Галлий ^{72}Ga 14,12 ч 630 (25,5) 834 (100) 2202 (27)	630 1) 225 2) 86	Вольфрам	^{187}W	1,0	626	21	14
		Кадмий	^{117m}Cd	3,5 ч	631	$4,6 \cdot 10^2$	$6,7 \cdot 10^3$
		Германий	^{77}Ge	11,3 ч	632	$5,1 \cdot 10^2$	$6,2 \cdot 10^2$
		Рений	^{188}Re	0,7	633	6	5
		Диспрозий	^{165}Dy	2,4 ч	633	0,6	41
	2202 1) 58 2) 25	Практически нет					
Стронций ^{87m}Sr 178 мин 389 (80)	389 1) 52 2) $6,8 \cdot 10^{-2}$	Кадмий	^{117m}Cd ^{117}Cd	3,5 ч 2,5 ч	385 393	64	30
		Индий	^{116m}In	54 мин	385	4,2	$5,9 \cdot 10^3$
		Осмий	^{193}Os	1,29	386	1,7	$3,6 \cdot 10^{-2}$
		Олово	^{113}Sn	115	392	$6,7 \cdot 10^3$	8,7
		Тербий	^{160}Tb	72,3	392	72	$9,4 \cdot 10^{-2}$
		Рутений	^{106}Ru	4,4 ч	393	8	1,7
Индий ^{116m}In 54 мин 138 (3,8) 417 (32,1) 819 (15,3)	417 1) 493 2) $4,6 \cdot 10^{-4}$	Европий	^{152}Eu	12,7 года	411	$1,8 \cdot 10^2$	
		Золото	^{198}Au	2,693	412	$3,12 \cdot 10^{-4}$	
	819 1) 104 2) $9,8 \cdot 10^{-5}$	Лантан	^{140}La	1,675	816	0,53	
		Серебро	^{110m}Ag	253	818	$3,8 \cdot 10^4$	

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада; энергия основных γ -линий, кэВ; (выход, %)	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/мин на 1 мкг элемента при 1) $t_{\text{ост}}=6$ ч 2) $t_{\text{ост}}=24$ ч	Мешающие элементы					Эквивалент определяемого элемента	
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей γ -линии, кэВ			
						$t_{\text{ост}}=6$ ч	$t_{\text{ост}}=24$ ч	
1097 (55,8) 1293 (84,1) 1508 (11,8) 2111 (15,9)	1097 1) 333 2) $3,1 \cdot 10^{-4}$	Железо Тербий	^{59}Fe ^{160}Tb	45,0 72,3	1099 1103,5	$1,4 \cdot 10^5$ $1,3 \cdot 10^4$		
	1293 1) 387 2) $3,6 \cdot 10^{-4}$	Тантал Железо Кальций	^{182}Ta ^{59}Fe ^{47}Ca	115,1 45,0 4,53	1289 1292 1297	$4,6 \cdot 10^3$ $2,3 \cdot 10^5$ $5,3 \cdot 10^5$		
	1508 1) 38,3 2) $3,6 \cdot 10^{-5}$	Серебро	$^{110\text{m}}\text{Ag}$	253	1505	$1,7 \cdot 10^3$		
Вольфрам ^{187}W 24,04 ч 72 (11) 134 (10) 479 (26) 686 (32)	686 1) 264 2) 153	Европий Тербий Сурьма Серебро	^{152}Eu ^{160}Tb ^{122}Sb $^{110\text{m}}\text{Ag}$	12,7 года 72,3 2,74 253	689 682 692 678; 687	$3,6 \cdot 10^2$ $2,2 \cdot 10^4$ $2,1 \cdot 10^2$ $3,0 \cdot 10^4$	$2,1 \cdot 10^2$ $1,3 \cdot 10^4$ $1,3 \cdot 10^2$ $1,7 \cdot 10^4$	

тельности остывания 6 и 24 ч. Рассмотрены практически все изотопы, выявляемые при коротком облучении. Табл. 7 построена аналогично табл. 4. Приведенная в столбце 2 чувствительность измерений получена экспериментально при облучении препаратов чистых элементов в течение 5 мин. Измерения проведены на детекторе с чувствительным объемом 50 см³ при расстоянии проба — детектор, равном 2 см.

Рассмотрим особенности измерения некоторых изотопов.

Лантан. В этом варианте анализа значительно меньше влияние урана; влияние гафния при измерениях линии 487 кэВ также становится в несколько раз меньше.

Прозодим. Определяется практически без помех, хотя чувствительность невелика.

Самарий. Преимущество этого варианта анализа — значительно более высокая селективность по отношению к танталу и торью.

Европий. Высокая чувствительность и селективность анализа достигается при использовании практически любой интенсивной линии изотопа ^{152m}Eu.

Диспрозий. Измерение линии 94,7 кэВ обеспечивает высокую чувствительность и селективность определений. Анализ возможен и по линии 362 кэВ.

Гольмий. Обычно определяется с высокой селективностью.

При измерениях в области энергий 70—90 кэВ необходимо принимать меры, исключающие регистрацию К-серии характеристического излучения свинца, из которого обычно изготовлен защитный экран, возбуждаемого излучением измеряемой пробы. С этой целью внутреннюю поверхность свинцового экрана (обращенную к детектору) покрывают специальным фильтром, состоящим, например, из листов кадмия, меди и алюминия (по 1—2 мм каждый).

Эрбий. Наибольшую селективность анализа обеспечивают измерения линии 308 кэВ. С увеличением длительности остывания быстро возрастает влияние тория.

Лютеций. При времени остывания 6—10 ч селективность анализа обычно достаточна.

Натрий, калий. Определения не вызывают затруднений.

Стронций. Анализ по изотопу ^{87m}Sr имеет достаточную селективность, но низкую чувствительность.

Марганец. При анализе по линии 847 кэВ возможны помехи от европия (если Mn/Eu < 100); измерения линии 1811 кэВ обеспечивают высокую селективность анализа.

Медь. Основной мешающий элемент — натрий. Его влияние необходимо учитывать, например, по линии 1369 кэВ.

Галлий. При длительности остывания 20—30 ч обычно может быть использована любая из приведенных линий.

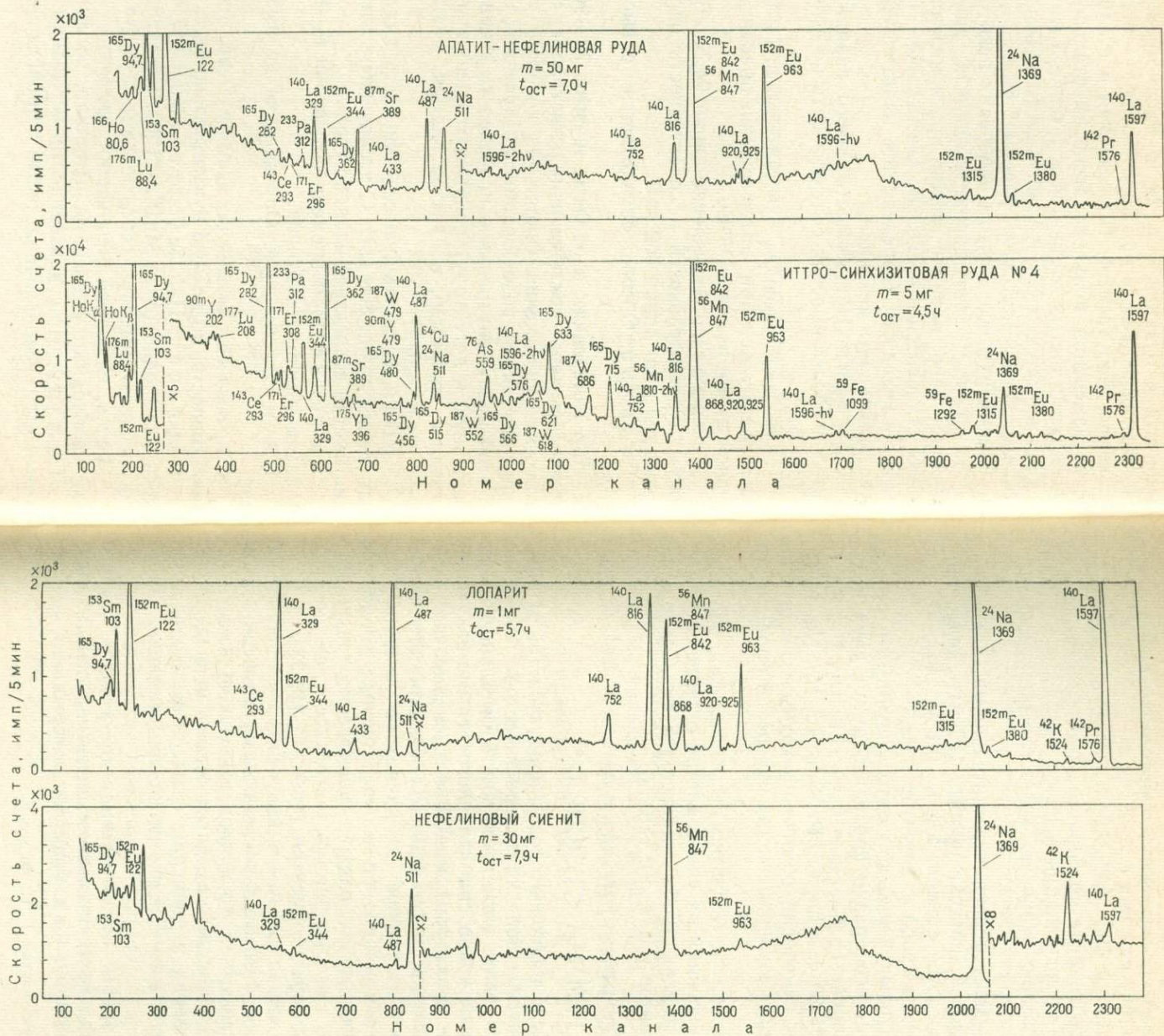


Рис. 6. Спектрограммы некоторых образцов, полученные на Ge(Li)-детекторе при анализе по короткоживущим радиоизотопам

Индий. Высокая селективность определений возможна по линиям 1293 кэВ и 1097 кэВ при $t_{\text{ост}}=5-6$ ч.

Вольфрам. Линия 686 кэВ обычно достаточно селективна.

Чувствительность анализа по короткоживущим изотопам существенно зависит от содержания в пробе натрия и марганца, которые создают обычно основную долю гамма-активности, и от длительности остывания.

В табл. 5 приведены пороги чувствительности, полученные для следующих условий: навеска пробы 100 мг; содержание натрия и марганца соответственно 1% и 0,1%; $t_{\text{обл}}=5$ мин; $t_{\text{изм}}=5$ мин; расстояние проба — детектор 2 см.

Как и в случае определений по долгоживущим изотопам, групповой анализ целесообразно проводить путем двух последовательных измерений: 1) $t_{\text{ост}}=5-10$ ч — Lu, Dy, Er, Sr, In, Eu, Mn; 2) $t_{\text{ост}}=20-30$ ч — La, Ce, Pr, Sm, Gd, Ho, Na, K, Cu, Ga, W. При первом измерении обычно приходится вводить поправки, учитывающие разновременность измерений пробы и эталона.

На рис. 6 приведены спектрограммы нескольких образцов, полученные при измерениях на спектрометре с детектором объемом 50 см³ и расстоянии проба — детектор 5 см. Содержание определяемых элементов указано в табл. 6.

6. АНАЛИЗ ПО РЕНТГЕНОВСКОМУ И МЯГКОМУ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЮ *

Значительное число радионуклидов — продуктов (n, γ)-активации испускают интенсивное характеристическое излучение, обусловленное процессами захвата ядром орбитального электрона или внутренней конверсии ядерного гамма-излучения. Некоторые изотопы, кроме того, имеют интенсивные гамма-линии в рентгеновской области (до 120 кэВ). Спектрометрические измерения фотонного излучения в диапазоне энергий 5—120 кэВ, особенно с помощью полупроводниковых детекторов рентгеновского излучения, позволяют существенно расширить возможности ИНАА в отношении чувствительности, селективности и круга определяемых элементов (табл. 8) [9, 23].

Особенности регистрации гамма-излучения с небольшой энергией обусловлены относительно высоким коэффициентом поглощения его в веществе, что приводит к необходимости использовать детектор с тонким входным окном и предъявляет определенные требования к размерам и массе активированной пробы, в связи с возможным самопоглощением анализируемого излучения.

При измерении пробы, имеющей вид достаточно тонкого слоя, самопоглощение незначительно и интенсивность аналитической линии пропорциональна весовому содержанию опреде-

* Раздел написан при участии Г. И. Фадеева.

Таблица 8

Чувствительность ИНАА по короткоживущим изотопам

Элемент	Энергия аналитической линии, кэВ	Порог чувствительности, $\times 10^{-4}\%$		Элемент	Энергия аналитической линии, кэВ	Порог чувствительности, $\times 10^{-4}\%$	
		$t_{\text{ост}}^{-6 \text{ ч}}$	$t_{\text{ост}}^{* -24 \text{ ч}}$			$t_{\text{ост}}^{-6 \text{ ч}}$	$t_{\text{ост}}^{* -24 \text{ ч}}$
La	329	80	22	Er	296	150	150
	1596	45	12		308	50	75
Ce	293	800	200		88,4	25	200
Pr	1576	600	245	Lu	208	65	14
Sm	103	8,0	2,0	Na	1369	70	40
Eu	122	0,35	0,22	K	1524	3000	1750
Gd	364	500	200	Sr	389	600	9,5%
	94,7	1,0	70	Mn	847	3,0	100
Dy	362	11	400	Cu	511	40	16
Ho	80,6	21	5	Ga	630	60	27
				In	417	58	—
				W	686	100	35

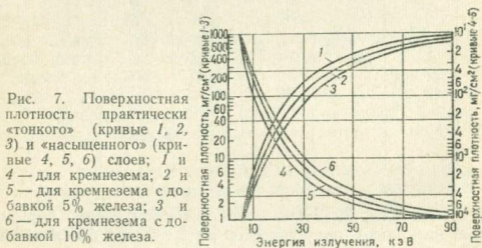
* Для $t_{\text{изм}} = 20$ мин.

ляемого элемента. Величина «тонкого» слоя горной породы составляет несколько миллиграммов на 1 см^2 для фотонов с энергией 10 кэВ и быстро возрастает с увеличением энергии излучения.

Если за практически тонкий слой принять слой с самопоглощением 15%, то в случае силикатной породы он равен примерно 7 мг/см^2 для фотонов с энергией 10 кэВ и уже 450 мг/см^2 для излучения с энергией 50 кэВ. Как видно из рис. 7, наличие в кремнеземе тяжелых элементов (например, железа) приводит к уменьшению допустимой поверхностной плотности за счет увеличения массового коэффициента поглощения. При анализе горных пород можно считать приемлемой толщину слоя, показанную на кривой 2 рис. 7, ибо в этом случае погрешность за счет вариаций эффекта самопоглощения не будет превышать $\pm 5\%$.

В некоторых случаях, например, при работе в диапазоне энергий 10—30 кэВ, когда чувствительности измерений из-за малого количества активированной пробы может оказаться недостаточно, возможно измерение в «насыщенном» слое, при этом интенсивность аналитической линии не зависит от толщины и массы пробы, а пропорциональна лишь массовой концентрации анализируемого элемента. В этом случае отпадает необходимость точного взвешивания пробы, подготовляемой к облучению, например, в виде прессованной таблетки. На рис. 7 показана толщина практически «насыщенного» слоя (85% насыщения) для кремнезема (кривая 4) и кремнезема с различным содержанием железа.

Поскольку с увеличением толщины пробы интенсивность комптоновского распределения растет практически линейно, а интенсивность регистрируемого аналитического излучения — по экспоненте (в связи с самопоглощением), оптимальным, с точки зрения чувствительности анализа, является измерение в промежуточном слое. В этом случае при больших вариациях вещественного состава проб, необходимо учитывать их абсорбционные свойства, например, измерением реперной гамма-линии от препарата, помещаемого при измерении активированной пробы таким образом, чтобы его излучение проходило че-



рез анализируемую пробу и регистрировалось детектором одновременно с собственным излучением пробы.

Для облегчения выбора аналитических линий и идентификации пиков на спектрограммах при проведении анализа с использованием мягкого фотонного излучения нами изучены и приводятся в конце книги аппаратурные спектры 32 природных элементов, продукты активации которых обладают интенсивными линиями в области энергий 5—120 кэВ.

Препараты для активации готовили из химических соединений элементов (обычно окислов) с классификацией не ниже «особо чистые». Для изготовления препаратов с малой массой, соответствующие соединения элемента переводили в раствор, aliquоту которого микропипеткой наносили на диск из фильтровальной бумаги диаметром 6 мм. После высушивания образцы запечатывали в полиэтиленовую пленку. Все измеренные препараты имели стандартные размеры и являлись тонким слоем для анализируемого излучения.

Препараты облучали в течение 4 ч в потоке $1,2 \times 10^{13}$ нейтр/с·см²; интегральный поток нейтронов контролировали мониторами из кобальта и тантала. Навеску и длительность остывания выбирали таким образом, чтобы интегральная скорость счета при измерениях не превышала допустимой частотной загрузки спектрометра ($5 \cdot 10^3$ имп/с). Измерения проведены

с помощью германиевого детектора типа БДР, характеристики которого приведены в разделе с описанием аппаратуры. Расстояние проба — детектор составляло 20 мм.

Рекомендуемые аналитические линии и влияние мешающих элементов, выраженное в эквивалентах (аналогично табл. 4), указаны в табл. 9.

Рассмотрим особенности измерений некоторых изотопов при энергетическом разрешении спектрометра, равном 400—600 эВ.

Церий. Интенсивная линия PgK_{α} изотопа ^{141}Ce позволяет определять церий в большинстве случаев без помех. Наличие мешающих элементов — урана и бария — можно контролировать по линиям соответственно 106 кэВ и 31 кэВ.

Неодим. Возможно использовать любую из двух приведенных линий. При анализе горных пород влияние урана незначительно.

Самарий. Наиболее селективны и чувствительны определения по линии 103,2 кэВ.

Гадолиний. Более удобны линии 25,6 кэВ и 103,2 кэВ. При длительности остывания более 30—35 дней для линии 103,2 кэВ помехи возникают только при содержании урана, на два порядка превышающем содержание гадолиния.

Европий. Измерение линий $SmK_{\alpha_{1,2}}$ (39,5+40,1 кэВ) изотопа ^{152}Eu при $t_{ост} > 20$ —30 дней позволяет определять европий с высокой чувствительностью и без помех.

Тербий. Более селективны определения по линии 86,8 кэВ. Возможное влияние мешающего элемента — тория — можно учесть по линиям $UK_{\alpha_{1,2}}$ (98,4 и 94,6 кэВ) изотопа ^{233}Pa .

Гольмий. Наиболее удобна линия 80,6 кэВ, практически не имеющая помех.

Эрбий. При использовании линии 116,6 кэВ единственным мешающим элементом является уран, влияние которого удобно контролировать и учитывать по линии 106 кэВ.

Туллий. Анализ целесообразно проводить по линии 84,3 кэВ; единственный мешающий элемент — тантал; контроль и при необходимости учет его влияния целесообразно осуществлять по линии 67,8 кэВ.

Иттербий. Предпочтительней измерения линии 63,1 кэВ изотопа ^{169}Yb . При длительности остывания 30—40 дней помехи обычно несущественны, поскольку содержание в породах рения ничтожно, а лутеция — в 5—6 раз ниже, чем иттербия.

Лутеций. Измерениям по линиям NiK_{α} мешают иттербий и гафний; их влияние необходимо учитывать при содержаниях, на порядок превышающих содержание лутеция. При анализе по линии 113 кэВ мешающими элементами являются иттербий и торий; для $t_{ост} = 5$ дней в большинстве случаев их влияние несущественно.

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада, дни	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/1000 с на 1 мкг элемента 1) $t_{ост}=24$ ч; 2) $t_{ост}=5$ дней; 3) $t_{ост}=30$ дней	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=24$ ч	$t_{ост}=5$ дней	$t_{ост}=30$ дней
Церий ^{141}Ce (32,5) ^{143}Ce (1,39)	$\text{PrK}_{\alpha_{1,2}}$ (36,0+35,6) 1) 720 2) 94 3) 22	Уран	$^{141}; ^{143}\text{Ce}$	32,5; 1,39	36,0; 35,6	0,64	1,1	2,9
		Барий	^{131}Ba	12,0	35,8; 35,0	$9,7 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^2$
Неодим ^{147}Nd (11,0)	$\text{PmK}_{\alpha_{1,2}}$ (38,7+38,2) 1) 150; 2) 120; 3) 25 91,1 1) 57; 2) 42; 3) 8,7	Уран	^{147}Nd	11,2	38,7; 38,2	5,6	5,6	5,6
		Уран	^{147}Nd	11,2	91,1	5,6	5,6	5,6
Самарий ^{153}Sm (1,96)	$\text{EuK}_{\alpha_{1,2}}$ (41,5+40,9) 1) $3,5 \cdot 10^5$ 2) $5,9 \cdot 10^4$ 3) 8,8 69,7 1) $2,6 \cdot 10^4$ 2) $4,3 \cdot 10^3$ 3) 0,6	Торий	^{233}Pa	27,0	40,4; 41,6	$4,5 \cdot 10^4$	$8,7 \cdot 10^3$	2,5
		Церий	$^{141}; ^{143}\text{Ce}$	32,5; 1,39	41,8; 40,8	$1,7 \cdot 10^3$	$2,2 \cdot 10^3$	1,4
		Европий	^{152}Eu	12,7 года	40,1; 39,9	29	4,9	$8 \cdot 10^{-4}$
		Гадолиний	^{153}Gd	242	41,5; 40,9	$2,9 \cdot 10^3$	$4,9 \cdot 10^2$	$8 \cdot 10^{-2}$
		Золото	^{197}Au	2,70	70,8; 68,9	2,2	1,3	0,1
		Неодим	^{151}Pm	1,17	69,0	$1,4 \cdot 10^2$	$4,3 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^3$
		Тантал	^{182}Ta	115,1	69,1	$9,3 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^2$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
		Вольфрам	^{187}W	1,0	69,3	3,6	19,5	$1,3 \cdot 10^5$
		Ртуть	^{197}Hg	2,67	68,8; 67,0			
			$^{197\text{m}}\text{Hg}$	1,0	70,2; 88,9	$2,1 \cdot 10^2$	$1,5 \cdot 10^2$	1,8
			^{203}Hg	46,59	72,4; 70,8			
		Гадолиний	^{153}Gd	242	103,2	$8,5 \cdot 10^3$	$1,4 \cdot 10^3$	0,24
	103,2 1) $1 \cdot 10^5$ 2) $1,7 \cdot 10^4$ 3) 2,6	Уран	^{239}Np	2,35	103,6	$1,8 \cdot 10^2$	$1,1 \cdot 10^2$	27
		Торий	^{233}Pa	27,0	103,9	$1,7 \cdot 10^4$	$2,8 \cdot 10^3$	1,0
Гадолиний ^{161}Gd (^{161}Tb) (7,2)	25,6 1) 210; 2) 130; 3) 12	Олово	$^{117\text{m}}\text{Sn}$	14,0	25,3; 25,0	$2,2 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^2$	57
		Палладий	^{109}Pd	13,5 ч	25,5; 24,9	$1,2 \cdot 10^{-3}$	$3,3 \cdot 10^{-2}$	
^{153}Gd (242)	74,6 1) 81; 2) 50 3) 4,6	Рений	$^{186}; ^{188}\text{Re}$	3,75; 0,7	73,9	$1,2 \cdot 10^{-2}$	0,27	0,35
		Торий	^{233}Pa	27,0	75,3	0,95	0,67	0,12
	$\text{EuK}_{\alpha_{1,2}}$ (41,6+40,9) 1) 120 2) 120 3) 110	Самарий	^{153}Sm	1,96	41,5; 40,9	$3 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-3}$	12,5
		Европий	^{152}Eu	12,7 года	40,1; 39,5	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$	$1 \cdot 10^{-2}$
		Церий	$^{141}; ^{143}\text{Ce}$	32,5; 1,39	41,8; 40,8	0,6	4,5	17,5
		Торий	^{233}Pa	27,0	40,4; 41,6	15,4	17,6	30,6
	103,2 1) 12; 2) 12; 3) 11	Самарий	^{153}Sm	1,96	103,2	$1,2 \cdot 10^{-5}$	$7 \cdot 10^{-4}$	4,2
		Уран	^{239}Np	2,35	103,7	$2 \cdot 10^{-2}$	$7,8 \cdot 10^{-2}$	$1,1 \cdot 10^2$
Европий ^{152}Eu (12,7 года)	$\text{SmK}_{\alpha_{1,2}}$ (40,1+39,5) 1) $1,2 \cdot 10^4$ 3) $1,2 \cdot 10^4$ 3) $1,1 \cdot 10^4$	Торий	^{233}Pa	27,0	40,4	$4 \cdot 10^3$	$4,6 \cdot 10^3$	$8,6 \cdot 10^3$
		Церий	$^{141}; ^{143}\text{Ce}$	32,5; 1,39	41,8; 40,8	60	$4,5 \cdot 10^2$	$1,7 \cdot 10^3$
		Самарий	^{153}Sm	1,96	41,5; 40,9	$3 \cdot 10^{-2}$	0,2	$1,2 \cdot 10^3$
		Гадолиний	^{153}Gd	242	41,5; 40,9	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$	$1 \cdot 10^2$
		Молибден	^{99}Mo	2,78	41,0	$3 \cdot 10^3$	$1,1 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^6$
	121,8 1) $1,9 \cdot 10^3$; 2) $1,9 \cdot 10^3$ 3) $1,8 \cdot 10^3$	Селен	^{75}Se	120,4	121,1	$1,9 \cdot 10^2$	$1,9 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^2$
		Барий	^{131}Ba	11,52	123,7	$3,1 \cdot 10^3$	$4,4 \cdot 10^3$	$7,8 \cdot 10^3$
		Эрбий	^{171}Er	7,5 ч	124,0	0,31	$2,3 \cdot 10^4$	∞

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада, дни	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/1000 с на 1 мкг элемента 1) $t_{\text{ост}}=24$ ч; 2) $t_{\text{ост}}=5$ дней; 3) $t_{\text{ост}}=30$ дней	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{\text{ост}}=24$ ч	$t_{\text{ост}}=5$ дней	$t_{\text{ост}}=30$ дней
Тербий ^{160}Tb (72,3)	DyK $_{\alpha 1,2}$ (46,0+45,2) 1) $1,4 \cdot 10^3$ 2) $1,3 \cdot 10^3$ 3) $1,0 \cdot 10^3$	Гадолиний Диспрозий Неодим Европий	^{159}Gd	18 ч	44,5; 43,7	$7,4 \cdot 10^{-2}$	6,5	34
			^{153}Gd	242	47,0			
			^{159}Dy	144,4	44,5; 43,7	$2,6 \cdot 10^2$	$2,4 \cdot 10^2$	$2,1 \cdot 10^2$
			^{147}Nd	11,02	45,0; 44,0	43,8	54,2	$2 \cdot 10^2$
			^{152}Eu	12,7 года	46,6; 45,4	0,5	0,46	0,37
	86,8 1) 240; 2) 230; 3) 180	Торий Палладий	^{233}Pa ^{109}Pd	27,0 13,5 ч	86,5 88,0	2,9 $3,8 \cdot 10^{-3}$	3,1 0,2	4,6 ∞
Гольмий ^{160}Ho (1,11)	ErK $_{\alpha 1,2}$ (49,1+48,2) 1) $1,9 \cdot 10^5$ 2) $8,5 \cdot 10^5$	Эрбий Самарий Европий Иттербий	^{165}Er	10 ч	47,5; 46,7	2,3	$1,3 \cdot 10^3$	—
			^{171}Er	7,5 ч	50,7; 49,8			
			^{153}Sm	1,96	48,2; 47,0	4,0	1,0	—
			$^{152}; ^{154}\text{Eu}$	12,7 года; 16 лет	50,0; 48,7	$1,9 \cdot 10^3$	85	—
			^{169}Yb	30,6	50,7; 49,8	43	2,2	—
	80,6 1) $9,6 \cdot 10^4$; 2) $4,3 \cdot 10^3$	Ртуть	^{197}Hg ; $^{197\text{m}}\text{Hg}$ ^{203}Hg	2,67; 1,0 46,6	80,2; 82,6 86,5; 80,3	$1,3 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^3$	—
Эрбий ^{171}Er (7,5 ч)	111,6 1) $1,7 \cdot 10^4$; 2) 0,24	Иттербий Лютеций Торий	^{169}Yb	30,6	110,0	$1,1 \cdot 10^2$	$1,6 \cdot 10^{-3}$	—
			^{177}Lu	6,74	113,0			
			^{233}Pa	27,0	111,3	$1,5 \cdot 10^2$	$2,5 \cdot 10^{-3}$	—
	116,6 1) $1,4 \cdot 10^3$ 2) $1,8 \cdot 10^2$	Уран	^{239}Np	2,35	117,1	5,4	$3 \cdot 10^{-4}$	—
Тулий ^{170}Tm (128)	YbK $_{\alpha 1,2}$ (52,4+51,3) 1) 560; 2) 550; 3) 490	Гадолиний Эрбий Иттербий Тербий	^{159}Gd	18 ч	51,7; 50,4	0,11	10	∞
			^{171}Er	7,5 ч	50,7; 49,8			
			^{169}Yb	30,6	50,7; 49,8	$9,2 \cdot 10^{-3}$	$6,9 \cdot 10^2$	∞
			^{175}Yb	4,2	54,1; 53,0	$7,2 \cdot 10^{-2}$	0,1	0,22
			^{160}Tb	72,3	53,5; 52,2	1,5	1,6	1,75
	84,3 1) 370 2) 370 3) 330	Тантал	^{182}Ta	115,1	84,7	6,0	6,0	6,4
Иттербий ^{169}Yb (30,6)	TmK $_{\alpha 1,2}$ (50,7+49,8) 1) $4,4 \cdot 10^3$ 2) $3,3 \cdot 10^3$ 3) $2,2 \cdot 10^3$	Гольмий Европий Эрбий Гадолиний	^{166}Ho	1,11	49,1; 48,2	$2,3 \cdot 10^{-2}$	0,46	∞
			$^{152}; ^{154}\text{Eu}$	12,7 года	50,0; 48,7			
			^{171}Er	16 лет	50,0; 48,7	44	39	22
			^{171}Er	7,5 ч	50,7; 49,8	$7,2 \cdot 10^{-2}$	$4,9 \cdot 10^3$	∞
			^{159}Gd	18 ч	51,7; 50,4	0,26	20	$3,5 \cdot 10^2$
			$^{161}\text{Tb}; ^{153}\text{Gd}$	7,2; 242	48,8; 48,2			
	63,1 1) $1,1 \cdot 10^3$ 2) 960 3) 550	Рений Лютеций	$^{186}; ^{188}\text{Re}$ ^{177}Lu	3,75; 0,70 6,74	63,0; 61,5 64,9; 63,2	$6,9 \cdot 10^{-3}$ 0,28	0,22 0,40	17,0 3,1

Определяемый элемент; радионуклид; период полураспада, дни	Энергия аналитической линии, кэВ; чувствительность измерений, имп/1000 с на 1 мкг элемента 1) $t_{ост}=24$ ч; 2) $t_{ост}=5$ дней 3) $t_{ост}=30$ дней	Мешающие элементы						
		Элемент	Радионуклид	Период полураспада, дни	Энергия мешающей линии, кэВ	Эквивалент определяемого элемента		
						$t_{ост}=24$ ч	$t_{ост}=5$ дней	$t_{ост}=30$ дней
Лютеций ^{177}Lu (6,74)	$\text{HfK}_{\alpha_{1,2}}$ (55,8+54,6) 1) $1,7 \cdot 10^4$ 2) $1,0 \cdot 10^4$ 3) 760	Эрбий	^{165}Er	10 ч	54,0	3,4	$6,7 \cdot 10^3$	∞
		Иттербий	^{175}Yb	4,2	54,1; 53,0	5,0	6,7	31
		Гафний	^{175}Hf	70	54,1; 53,0	14,6	9,4	1,0
		Гольмий	^{181}Hf	42,45	57,8; 56,3	0,47	6,2	∞
			^{166}Ho	1,11	57,1; 56,0			
	113,0 1) $9,4 \cdot 10^3$ 2) $5,6 \cdot 10^3$ 3) 430	Эрбий	^{171}Er	7,5 ч	111,6	6,7	$3,1 \cdot 10^5$	∞
		Иттербий	^{175}Yb	4,2	113,5	11,3	15,6	70
		Торий	^{233}Pa	27	114,5	$3 \cdot 10^2$	$2 \cdot 10^2$	30
Германий ^{77}Ge (11,3 ч)	$\text{GaK}_{\alpha_{1,2}}$ (10,4+10,3) 1) $4,5 \cdot 10^5$ 2) 250	Цинк	^{65}Zn	245	9,0; 8,9	$3,9 \cdot 10^4$	22	—
		Селен	^{75}Se	120,4	11,9; 11,7 10,5; 10,5	$4,2 \cdot 10^3$	2,4	—
Гафний ^{181}Hf (42,5)	$\text{TaK}_{\alpha_{1,2}}$ (57,5+56,3) 1) 860 2) 800 3) 530	Гольмий	^{166}Ho	1,11	57,1; 56,0	$2,4 \cdot 10^{-2}$	0,5	∞
		Лютеций	^{177}Lu	6,74	55,8; 54,6	$5 \cdot 10^{-2}$	$2 \cdot 10^{-2}$	2,9
		Иттербий	^{169}Yb	30,6	59,0; 57,6	0,8	0,9	1,1
		Тантал	^{182}Ta	115,1	59,3; 58,0	0,8	0,8	0,6
Тантал ^{182}Ta (115)	67,8; 67,2 1) $1,5 \cdot 10^3$ 2) $1,5 \cdot 10^3$ 3) $1,3 \cdot 10^3$	Ртуть	^{197}Hg	2,67	68,8; 67,0	12,3	52,8	∞
		Платина	$^{197\text{m}}\text{Hg}$	1,0	70,2; 68,9			
		Неодим	^{197}Pt	18,3 ч	68,8; 67,0	$5 \cdot 10^{-2}$	5,0	∞
		Рений	^{151}Pm	1,17	66,5	15,3	$2,9 \cdot 10^2$	∞
			^{186}Re	3,75	69,1; 67,2	0,5	1,3	$1,2 \cdot 10^2$
Рений ^{186}Re (3,7)	WK_{α_1} (59,3) 1) $1,4 \cdot 10^4$ 2) $5,6 \cdot 10^3$ 3) 56	Церий	^{143}Ce	1,39	57,3	$2,4 \cdot 10^2$	$4,9 \cdot 10^2$	∞
		Гафний	^{181}Hf	42,45	57,5; 56,3	16,3	7,0	0,1
		Тантал	^{182}Ta	115,1	59,3; 58,0	13,3	5,5	$6 \cdot 10^{-2}$
		Тулий	^{170}Tm	178,4	61,0; 59,4	$1,1 \cdot 10^2$	43	0,5
		Иттербий	^{169}Yb	30,6	59,0; 57,6	14,3	6,4	0,11
	OsK_{α_1} (63,0) 1) $1,6 \cdot 10^5$ 2) $4,4 \cdot 10^3$ 3) 32	Вольфрам	^{187}W	1,0	61,1; 59,7	0,36	4,7	∞
		Иттербий	^{169}Yb	30,6	63,1	90	3,5	$6 \cdot 10^{-2}$
		Лютеций	^{177}Lu	6,74	64,9; 63,2	41	1,8	0,18
		Гафний	^{175}Hf	70	63,0; 61,3	$1,9 \cdot 10^3$	55,7	0,52
Вольфрам ^{190}W (24 ч)	72,0; 71,2 1) $2,1 \cdot 10^4$ 8) 640	Ртуть	$^{197\text{m}}\text{Hg}$	1,0	70,8; 68,9	$2,1 \cdot 10^3$	32	—
		Рений	^{203}Hg	46,6	72,9; 70,8	0,6	0,7	—
		Лютеций	$^{186}; ^{188}\text{Re}$	3,75; 0,70	73,9; 71,4	31,3	1,6	∞
			^{177}Lu	6,74	71,6			
Торий ^{233}Pa (27,0)	UK_{α_2} (94,7) 1) 250; 2) 220; 3) 120	Диспрозий	^{165}Dy	2,4 ч	94,7	0,1	11,6	10,0
		Иттербий	^{169}Yb	30,6	93,6	12,5		
	UK_{α_1} (98,4) 1) 400 2) 350 3) 180	Самарий	^{153}Sm	1,96	97,5	0,3	1,5	$5 \cdot 10^3$
		Гадолиний	^{153}Gd	242	97,5	18,5	16,4	9,0
		Уран	^{230}Np	2,35	99,5	0,44	1,7	$1,4 \cdot 10^3$
		Тантал	^{182}Ta	115,1	100,1	1,8	1,6	0,95
Уран ^{238}U (2,35)	106,0 1) $1,3 \cdot 10^3$; 2) 300 3) 0,2	Практически нет						

Чувствительность анализа по рентгеновскому и мягкому γ -излучению

Элемент	Радиоизотоп	Энергия аналитической линии, кэВ	Длительность остывания, дни	Порог чувствительности, %
Ce	$^{141}, ^{143}\text{Ce}$	$\text{PrK}\alpha$ (36,0+35,6)	5—7	$1 \cdot 10^{-3}$
Nd	^{147}Nd	$\text{PmK}\alpha$ (38,7+38,2) 91,1	≥ 20	$1 \cdot 10^{-3}$ $2 \cdot 10^{-3}$
Sm	^{153}Sm	103	5—7	$3,5 \cdot 10^{-5}$
Gd	^{161}Tb ^{159}Gd	25,6 103,2	5—7 ≥ 20	$7 \cdot 10^{-4}$ $3 \cdot 10^{-3}$
Eu	^{152}Eu	$\text{SmK}\alpha$ (40,1+39,5) 121,8	≥ 20	$4 \cdot 10^{-6}$ $5 \cdot 10^{-6}$
Tb	^{160}Tb	86,8	≥ 20	$2 \cdot 10^{-4}$
Ho	^{169}Ho	80,5	1	$5 \cdot 10^{-5}$
Dy	^{165}Dy	94,7	1	$5 \cdot 10^{-5}$
Er	^{171}Er	116,6	1	$5 \cdot 10^{-3}$
Tm	^{170}Tm	84,3	≥ 20	$1 \cdot 10^{-4}$
Yb	$^{169}\text{Yb}; ^{175}\text{Yb}$	(63,1+63,0)	> 20	$7 \cdot 10^{-5}$
Lu	^{177}Lu	$\text{HfK}\alpha$ (55,8+54,6) 113,0	5—7	$1 \cdot 10^{-4}$ $2 \cdot 10^{-4}$
Hf	^{181}Hf	$\text{TaK}\alpha$ (57,5+56,3)	≥ 20	$2 \cdot 10^{-4}$
Ta	^{182}Ta	67,8+67,2	> 20	$6 \cdot 10^{-5}$
W	^{187}W	72,0+71,2	1	$7 \cdot 10^{-5}$
Th	^{233}Th	$\text{UK}\alpha_2$ (94,7) $\text{UK}\alpha_1$ (98,5)	> 20	$3 \cdot 10^{-1}$ $2 \cdot 10^{-1}$
Np	^{239}Np	106	5—7	$1 \cdot 10^{-4}$

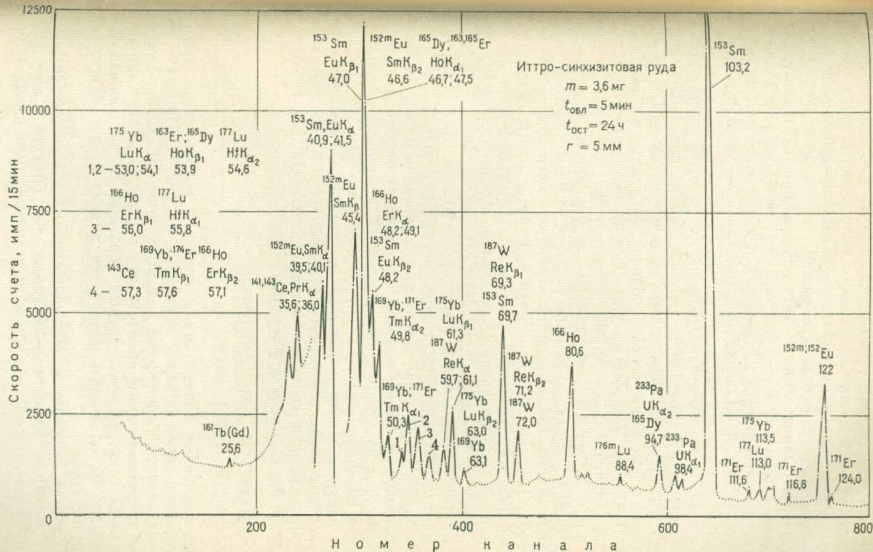


Рис. 8. Спектрограмма иттро-синхизитовой руды, измеренная на детекторе рентгеновского излучения при анализе по короткоживущим радионуклидам.

Германий. Интенсивная линия GeK^{α} практически не имеет помех при длительности остывания 15—30 ч. В связи с низкой энергией этой линии необходимо использовать очень тонкие слои пробы или применять специальные приемы учета абсорбционных свойств пробы (см. выше).

Гафний. Определение низких содержаний затруднительно в связи с большим влиянием тантала, иттербия, лютеция.

Тантал. Интенсивная гамма-линия 67,8 кэВ позволяет определять тантал практически без помех и с высокой чувствительностью.

Рений. Более селективна линия OsK_{α} ; в этом случае возможны помехи от иттербия и лютеция при их содержании, в десятки раз превышающем содержание рения. $t_{\text{ост}} = 20 \div 30$ ч.

Вольфрам. Анализ целесообразно проводить по линиям 72 кэВ + 71,2 кэВ, что обычно обеспечивает достаточную селективность измерений. $t_{\text{ост}} = 20 \div 30$ ч.

Торий. Линия $\text{U}_{\text{K}}^{\alpha}$ (98,4 кэВ) регистрируется практически без помех, если $t_{\text{ост}} \geq 30$ дней.

Уран. Линия 106 кэВ практически не имеет помех.

В табл. 10 приведена пороговая чувствительность анализа горных пород по линиям в диапазоне 20—120 кэВ. Расчет произведен на основании средних экспериментальных данных для пород разного типа для следующих условий: навеска 300 мг; поток $1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/с·см²; $t_{\text{обл}} = 6$ ч; $t_{\text{изм}} = 20$ мин. Для Ho, Dy, Er, W длительность облучения проб составляет 5 мин.

Для примера в прилож. 2 и на рис. 8 показаны спектрограммы некоторых образцов, полученные на спектрометре с ППД рентгеновского излучения, при различной длительности облучения и остывания.

Как показал опыт, использование подобной аппаратуры позволяет значительно повысить селективность и чувствительность определений в геологических пробах Ge, Gd, Ho, Er, Tm, Nd, Ta, W, Re, U и ряда других элементов.

7. ОБРАБОТКА РЕЗУЛЬТАТОВ ИЗМЕРЕНИЙ НА ЭВМ¹

Для обработки аппаратурных спектров использована программа, блок-схема которой приведена на рис. 9. Программа написана на языке «Фортран» для ЭВМ типа ЕС 1020. Программа построена таким образом, что в первую очередь обрабатываются спектры стандартных образцов и на основании результатов их обработки проводится анализ спектров исследуемых образцов.

Обработка включает в себя качественный и количественный анализ спектров. Качественный анализ заключается в идентификации элементов по найденным значениям энергий пиков пол-

¹ Раздел написан при участии В. С. Воронова.

ного поглощения; количественный анализ — в подсчете содержаний элементов, а также погрешностей, с которыми эти величины определены.

Ввод информации с анализатора в ЭВМ осуществляется с помощью перфоленты. При использовании анализатора типа

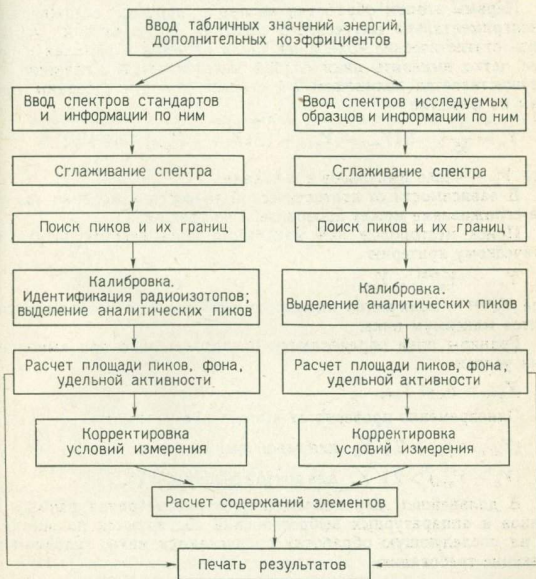


Рис. 9. Блок-схема обработки результатов измерений на ЭВМ.

LP 4840, дающего вывод на перфоленту в коде ASC-11, в программу вводится подпрограмма перекодировки.

Наряду с исследуемыми спектрами в ЭВМ вводится информация по энергиям и интенсивностям гамма-линий радиоизотопов, их периодам полураспада, энергии аналитических линий, содержанию элементов в стандартных образцах, массе и длительности измерения образцов, местоположению реперных пиков для энергетической калибровки. При работе с мониторами дополнительно вводятся данные по монитору, коэффициенты,

учитывающие время остывания образцов, геометрию измерения, длительность облучения, эффективность регистрации излучения детектором (при его замене), а также коэффициенты, связывающие интенсивность пиков монитора с интенсивностями аналитических линий радиоизотопов. Ввод дополнительной информации осуществляется с помощью перфокарт.

Первым этапом обработки является процесс сглаживания экспериментально полученного спектра, позволяющий усреднить статистические колебания числа отсчетов в каналах и более четко выделить пики слабой интенсивности. Сглаживание осуществляется полиномом 2-й степени по пяти соседним точкам по формуле

$$Y_n = \frac{1}{35} [-3(Y_{n-2} + Y_{n+2}) + 12(Y_{n-1} + Y_{n+1}) + 17 Y_n],$$

где Y_n — число импульсов в n -канале.

В зависимости от статистической точности измерения спектра сглаживание может проводиться до трех раз.

Поиск местоположения максимума пика ведется по статистическому критерию

$$Y_{n-1} < Y_n^{\max} > Y_{n+1},$$

где Y_n^{\max} — количество импульсов в n -канале, в котором находится максимум пика.

Границы пика определяются последовательно при выполнении условия

$$Y_{n-1} > Y_n < Y_{n+1}.$$

Одновременно проверяется выполнение условий

$$(Y_{n+1} - Y_n) > 2\sqrt{Y_n} \text{ для левой границы пика}$$

$$(Y_n - Y_{n+1}) > 2\sqrt{Y_n} \text{ для правой границы пика.}$$

В дальнейшем для исключения из рассмотрения размытых пиков и аппаратных выбросов пики сортируются по ширине и на последующую обработку пропускаются пики, удовлетворяющие требованию

$$3 < n_p - n_n < 20,$$

где n_p и n_n — номера каналов спектра, соответствующие правой и левой границе пика.

В результате образуется массив, в котором записаны номера каналов, соответствующие найденным границам и максимумам пиков, выявленных в спектре слева направо.

По данным калибровки спектрометра, проведенной при помощи ОСГИ, определяются энергии найденных пиков и сравнением с предварительно введенными в ЭВМ данными энергий гамма-линий радиоизотопов проводится их идентификация.

Подпрограмма «идентификации пиков» выделяет пики, принадлежащие аналитическим линиям, одновременно проверяется калибровка спектрометра. Использование в дальнейших расчетах лишь аналитических пиков дает возможность упростить программу за счет уменьшения количества обрабатываемых пиков. Кроме того, при отсутствии в исследуемом спектре образца какого-либо аналитического пика данная подпрограмма отмечает участок, где он должен находиться для последующего определения предела обнаружения элемента в образце.

Далее проводится подсчет площадей выделенных пиков ($S_{\text{пика}}$), фона под пиком ($S_{\text{ф}}$), погрешностей определения площади пика (ε), тройной дисперсии фона под пиком (η) и удельной интенсивности пика ($A_{\text{уд}}$).

$$S_{\text{пика}} = S_{\Sigma} - S_{\text{ф}},$$

где

$$S_{\Sigma} = \sum_{n_l}^{n_n} Y_{n_l}; \quad S_{\text{ф}} = \frac{n_n - n_l + 1}{2} (Y_{n_l} + Y_{n_n});$$

$$\varepsilon = \frac{\sqrt{2S_{\text{ф}} + S_{\text{п}}}}{S_{\text{пик}}} \cdot 100\%;$$

$$\eta = 3\sqrt{S_{\text{ф}}}; \quad A_{\text{уд}} = \frac{S_{\text{пик}}}{m \cdot t},$$

где m — масса образца или стандарта, мг;

t — время измерения пробы, мин.

По окончании обработки спектров стандартных образцов вводится информация по спектрам исследуемых проб и повторяется та же процедура: перекодировка вводимых данных сглаживание (при необходимости), поиск пиков и их границ, калибровка, идентификация аналитических пиков, расчет площадей пиков.

Содержание элементов определяется сравнением удельных интенсивностей соответствующих пиков пробы и стандарта. В случае отсутствия в спектре пробы аналитического пика или невыполнении условия $S_{\text{пика}} > 3\sqrt{S_{\text{ф}}}$ рассчитывается предел обнаружения элемента, перед значением которого ставится знак < (меньше).

Длительность обработки одного спектра на ЭВМ примерно 3 мин.

Результаты обработки выдаются в виде таблицы и включают наименование элементов, их содержание в пробе и погрешность определения площади пика. Предусмотрен также вывод промежуточных результатов обработки. Форма выдачи информации после обработки на ЭВМ показана в табл. 11.

Результаты нейтронно-активационного анализа

Номер измерения	Номер образца	Sm	Ca	Lu	La	Yb	Au
1929	57	0,75—03* 0,58+00**	0,25+01 0,85+01	0,71—04 0,60+01	0,26—02 0,23+01	0,24—03 0,61+01	0,12—04 0,0
1930	58	0,10—02* 0,48+00**	0,96+00 0,20+02	0,80—04 0,48+01	0,58—02 0,11+01	0,29—03 0,52+01	0,10—04 0,0

* Первая строка — содержание элемента, %.

** Вторая строка — относительная статистическая погрешность, %.

Например, содержание Sm в пробе № 57 определено как $0,75 \cdot 10^{-3}\%$ со статистической погрешностью 0,58%.

Сопоставление результатов обработки спектров, выполненных с помощью ЭВМ и вручную, показывает хорошую сходимость (табл. 12).

Таблица 12

Сопоставление результатов обработки спектров

№ п/п	Способ обработки	Содержание элемента, г/т						
		Sm	Ca*	Lu	La	Yb	Au	As
1	ЭВМ	9,7	0,30	0,58	49	1,6	0,14	32
	Вручную	9,3	0,28	0,56	48	2,4	0,16	35
2	ЭВМ	8,6	0,40	0,55	36	3,1	0,15	30
	Вручную	8,3	0,31	0,57	40	3,8	0,15	23
3	ЭВМ	15	1,7	1,6	27	4,6	0,50	24
	Вручную	14	2,0	1,1	31	4,4	0,60	20
4	ЭВМ	7,4	4,5	0,75	17	2,3	0,18	44
	Вручную	7,0	5,0	0,80	19	2,6	0,20	40
5	ЭВМ	7,8	3,1	0,15	46	1,8	0,28	32
	Вручную	7,9	3,5	0,20	44	2,2	0,20	36
6	ЭВМ	7,5	0,2	0,21	18	1,2	0,25	43
	Вручную	8,2	0,2	0,20	24	1,6	0,20	43
7	ЭВМ	5,6	4,7	0,47	26	3,0	32	220
	Вручную	5,3	4,5	0,50	24	2,8	32	215
8	ЭВМ	8,5	0,4	0,53	32	2,7	0,14	30
	Вручную	8,4	0,2	0,60	36	3,2	0,12	35

* Содержания Ca указаны в %.

8. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ПРИМЕНЕНИЯ ИНАА

В течение нескольких лет инструментальный анализ горных пород, руд и минералов широко используется нами при геохимических исследованиях, связанных с поисками и разведкой месторождений редкометального сырья.

Проводится изучение распределения редких элементов в породах кислого, основного и ультраосновного состава, в монофракциях лопарита, циркона, монацита, пирохлора, флюорита и ряда других минералов, а также в редкоземельных рудах различного типа.

За это время в производственных условиях выполнены многие десятки тысяч определений тантала, цезия, скандия, гафния, индивидуальных РЗЭ, тория, стронция и других редких элементов. Накопленный опыт подтвердил эффективность метода, его высокую чувствительность, точность и правильность. Для примера рассмотрим более подробно результаты применения ИНАА для изучения распределения редких элементов в апатитсодержащих породах и рудах, а также слагающих их минералах — нефелине, апатите, сфене и др.

Исследовали поведение индивидуальных редкоземельных элементов, стронция, тория, скандия, тантала, гафния, кобальта, цезия, рубидия и некоторых других элементов. Было проанализировано несколько тысяч проб, что позволило подсчитать запасы редких элементов одного из крупных месторождений.

Для мобилизации методических возможностей измерения проводили и по долгоживущим и по короткоживущим изотопам с использованием как рентгеновского, так и высокоэнергетического диапазонов спектра. Принятые условия измерений показаны в табл. 13.

Пробы с $t_{обл}=6$ ч измеряли трижды:

а) $t_{ост}=7-10$ дней — коаксиальный детектор (La, Sm, Nd, Yb, Lu, Ba, Rb); б) $t_{ост}=25-30$ дней — коаксиальный детектор (Ce, Eu, Tb, Sc, Fe, Co, Sr, Cs, Hf, Ta, Th); в) $t_{ост}=25-30$ дней — планарный детектор (Gd, Tm, проверялись Eu, Tb, Yb, Ta, Th).

Пробы с $t_{обл}=5$ мин измеряли дважды:

а) $t_{ост}=5-10$ ч — планарный детектор (Dy, Er, Ho, Sm); б) $t_{ост}=1-2$ дня — коаксиальный детектор (Pr, Na, K).

При необходимости определения марганца проводили дополнительное измерение на коаксиальном детекторе с $t_{ост}=5-10$ ч (короткое облучение). В этом случае целесообразно определять и стронций по изотопу ^{87m}Sr .

Спектрограммы образцов приведены в прилож. 1 и на рис. 6. Точность определений для разных классов содержаний (относительная среднеквадратичная погрешность) представлена в табл. 14. В скобках указано число пар определений (параллель-

Условия анализа апатитсодержащих пород и руд

Элемент	Радиоизотоп	Аналитическая линия, кэВ	Режим облучения	Время остывания, $t_{\text{ост}}$, дни	Тип детектора
La	^{140}La	329 или 1596	1	7—10	К
Ce	^{141}Ce	145	1	25—30	К
Pr	^{142}Pr	1576	2	1—2	К
Nd	^{147}Nd	531	1	7—10	К
Sm	^{153}Sm	103	1 или 2	7—10 или 1—2	К или П
Eu	^{152}Eu	122 или 1408	1	25—30	К или П
Gd	^{153}Gd	103	1	25—30	П
Tb	^{160}Tb	879 или 86,8	1	25—30	К или П
Dy	^{165}Dy	94,7	2	5—10 ч	П
Ho	^{166}Ho	80,6	2	5—10 ч	П
Er	^{171}Er	116,6	2	5—10 ч	П
Tm	^{170}Tm	84,3	1	25—30	П
Yb	$^{169}\text{Yb}; ^{175}\text{Yb}$	63,1 или 396	1	25—30 или 7—10	П или К
Lu	^{177}Lu	208	1	7—10	К
Na	^{24}Na	1369	2	1—2	К
K	^{42}K	1524	2	1—2	К
Sc	^{46}Sc	889	1	25—30	К
Mn	^{56}Mn	847 или 1811	2	5—10 ч	К
Fe	^{59}Fe	1292	1	25—30	К
Co	^{60}Co	1332	1	25—30	К
Rb	^{81}Rb	1077	1	7—10	К
Sr	$^{85}\text{Sr}; ^{87\text{m}}\text{Sr}$	514 или 389	1 или 2	25—30 или 5—10 ч	К
Cs	^{134}Cs	605 или 796	1	25—30	К
Ba	^{131}Ba	496	1	7—10	К
Hf	^{181}Hf	482	1	25—30	К
Ta	^{182}Ta	1221—1231 или 67,8	1	25—30	К или П
Th	^{233}Th	312 или 98,4	1	25—30	К или П

Примечания. 1. $f=1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/(с·см²); $t_{\text{обл}}=6$ ч.

2. $f=1,2 \cdot 10^{13}$ нейтр/(с·см²); $t_{\text{обл}}=5-10$ мин.

К — коаксиальный Ge (Li) - детектор с чувствительным объемом 50 см³.

П — детектор рентгеновского излучения на основе германия.

ные навески), использованных для расчета. Полученная точность удовлетворяет требованиям, предъявляемым к анализам при подсчете запасов минерального сырья.

Не менее важной характеристикой является правильность результатов анализа. Сопоставление данных ИНАА с результатами внешнего контроля (табл. 15) показало отсутствие значимых расхождений (оценка производилась по t -критерию Стьюдента).

Подтверждением правильности результатов ИНАА могут служить также данные табл. 16, где приведены результаты определения некоторых редкоземельных элементов нейтронно-активационным методом (среднеарифметическое по 362 пробам)

Точность определений элементов в апатитсодержащих породах и слагающих их минералах

Элемент	Диапазон содержаний, $\times 10^{-4}\%$								
	0,5—1,9	2—9,9	10—49	50—99	100—499	500—999	0,1—0,49%	0,5—0,99%	1,0—5,0%
<i>Анализ по долгоживущим изотопам</i>									
La			21,1 (18)	14,5 (21)	9,2 (36)	5,8 (38)	5,5 (43)		
Ce				18,9 (25)	12,7 (30)	6,5 (45)	6,8 (43)	4,9 (11)	
Nd				21,1 (39)	16,5 (31)	12,0 (38)	9,8 (21)		
Sm		18,0 (11)	11,8 (63)	7,6 (42)	7,6 (30)				
Eu	18,9 (8)	11,8 (25)	6,9 (27)	3,6 (18)					
Gd			24,0 (18)	13,3 (25)	11,5 (28)				
Tb	28,0 (28)	13,2 (31)	11,5 (42)						
Tm	28,2 (14)	16,8 (25)	9,1 (11)						
Yb	26,4 (31)	16,4 (31)	12,0 (28)						
Lu	18,8 (35)	15,2 (36)							
Sr						19,2 (30)	14,3 (34)	10,1 (31)	4,3 (47)
Th		16,4 (35)	8,9 (31)	5,8 (26)	3,1 (10)				
Sc	12,5 (30)	7,6 (21)	5,8 (17)						
Fe							15,6 (11)	10,2 (17)	6,8 (23)
Co		16,6 (30)	3,3 (9)	2,1 (5)					
Rb				23,9 (6)	15,5 (12)	9,1 (7)			
Cs	13,5 (31)	9,8 (19)	7,5 (20)						
Ba						19,3 (18)	12,1 (13)		
Hf	18,0 (30)	12,3 (21)	8,4 (17)						
Ta	9,5 (31)	8,2 (19)	7,1 (20)						
<i>Анализ по короткоживущим изотопам</i>									
Pr					21,6 (37)	15,0 (32)			
Dy		12,9 (13)	6,8 (20)	4,1 (26)					
Ho		18,8 (26)	9,4 (33)						
Er			28,3 (32)	17,7 (27)					
Na							3,5 (16)	2,3 (15)	
K							9,5 (16)	5,4 (15)	
Mn					7,8 (12)	4,5 (12)	15,0 (6)		
							2,8 (15)		

Результаты внешнего контроля

Элемент	Диапазон содержаний, %	Число сопоставлений	Относительное расхождение, %
Sr	0,1—0,49	41	+3,5
	0,5—1,99	63	+2,1
La	0,02—0,099	72	+8,9
	0,10—0,49	45	-3,5
Ce	0,02—0,099	71	-1,3
	0,10—0,49	46	+2,5
Pr	0,01—0,099	28	+3,1
Nd	0,02—0,099	41	-2,1
	0,10—0,49	58	+1,3
Sm	0,001—0,0049	68	+0,4
	0,005—0,019	51	+5,0
Eu	$2 \cdot 10^{-4}$ — $9,9 \cdot 10^{-4}$	71	-2,8
	$1 \cdot 10^{-3}$ — $4,9 \cdot 10^{-3}$	46	+6,1
Gd	$2,0 \cdot 10^{-3}$ — $9,9 \cdot 10^{-3}$	32	-6,8
	0,01—0,049	28	+5,5
Tb	$2 \cdot 10^{-4}$ — $9,9 \cdot 10^{-4}$	44	+4,2
	$1 \cdot 10^{-3}$ — $4,9 \cdot 10^{-3}$	52	+5,8
Dy	$2 \cdot 10^{-4}$ — $9,9 \cdot 10^{-4}$	32	-0,9
	$1 \cdot 10^{-4}$ — $9,9 \cdot 10^{-3}$	28	-1,8
Ho	$2 \cdot 10^{-4}$ — $9,9 \cdot 10^{-4}$	31	+6,3
	$1 \cdot 10^{-3}$ — $4,9 \cdot 10^{-3}$	29	-0,8
Er	$2 \cdot 10^{-3}$ — $9,9 \cdot 10^{-3}$	45	+7,2
Tm	$2 \cdot 10^{-4}$ — $9,9 \cdot 10^{-4}$	30	-6,9
	$1,0 \cdot 10^{-3}$ — $4,9 \cdot 10^{-3}$	30	-2,5
Yb	$2 \cdot 10^{-4}$ — $9,9 \cdot 10^{-4}$	42	-5,9
	$1 \cdot 10^{-3}$ — $4,9 \cdot 10^{-3}$	28	+4,1
Lu	$0,5 \cdot 10^{-4}$ — $1,9 \cdot 10^{-4}$	58	+9,4

Оценка правильности анализа

Метод	Количество проб	Среднее содержание, $\times 10^{-4}\%$								ΣTR, %
		La	Ce	Nd	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu	
ИНАА	362	846	1360	440	66	21	8,4	10,5	2,7	0,30
Хроматография	10	852	1390	440	54	18	9,0	12	2,7	0,30

и химическим-хроматографическим методом (среднеарифметическое по 10 обобщенным пробам, составленным из тех же 362 проб).

В табл. 17 для примера показаны некоторые результаты анализа стандартных образцов с аттестованными содержаниями ряда редкоземельных элементов, также подтверждающие надежность результатов ИНАА.

В заключение отметим, что наряду с высокой чувствительностью и точностью инструментальный вариант метода обладает и весьма высокой производительностью. Так, при длительности одного измерения 10—15 мин оператор за рабочий день измеряет на спектрометре примерно 20 проб. В случае группового анализа, принимая, что в среднем за одно измерение определяют 5 элементов, производительность составит 100 элементоопределений в смену на один спектрометр. При этом стоимость одного элементоопределения с обработкой результатов измерений на ЭВМ составляет 1—2 руб., что существенно ниже, чем стоимость химического анализа.

9. КОМПЛЕКСИРОВАНИЕ НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОГО И РЕНТГЕНРАДИОМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДОВ

Как известно, рентгенорадиометрический анализ (РРА) состава вещества основан на возбуждении характеристического рентгеновского излучения элементов радиоизотопным источником и измерении его с помощью радиометрической аппаратуры. Применение современных радиоизотопных источников фотонного излучения в сочетании с полупроводниковыми детекторами рентгеновского излучения позволяет проводить групповое определение элементов с чувствительностью до $n \cdot 10^{-3}$ — $n \cdot 10^{-4}\%$.

Комплексирование ИНАА и РРА целесообразно по следующим причинам.

1. Имеется ряд редких элементов — важных геохимических индикаторов, чувствительность определений которых с помощью

Результаты анализа стандартных образцов

Образец		Содержание элементов, г/т						
		La	Ce	Sm	Eu	Tb	Yb	Lu
Габбро-диоритовая порода СГД-I	Паспорт	78 ± 18	150 ± 10	17 ± 1	$6,0 \pm 1$	3,0	$2,9 \pm 0,5$	0,5
	НАА	79 ± 7	170 ± 15	17 ± 3	$6,0 \pm 1$	—	$2,6 \pm 1$	$0,3 \pm 0,15$
Альбитизированный гранит СГ-I	Паспорт	41 ± 11	67	7 ± 2	0,5	—	6 ± 1	1,0
	НАА	30 ± 10	75 ± 13	$6,2 \pm 2$	$0,2 \pm 0,1$	—	10 ± 3	$2,2 \pm 0,2$
Апатитовый концентрат Ап-I (внутренний стандарт ИМГРЭ)	Паспорт	2600 ± 160	4080 ± 200	199 ± 15	64 ± 7	9 ± 5	9 ± 3	—
	НАА	2610 ± 78	3920 ± 105	194 ± 20	68 ± 5	12 ± 4	9 ± 3	$1,9 \pm 0,2$

ИНАА недостаточна. К таким элементам следует отнести Sr, Y, Zr, Nb, Ba и некоторые другие. Вместе с тем чувствительность РРА достаточна для определений кларковых содержаний указанных элементов в большинстве типов горных пород [25].

2. Рентгенорадиометрический метод является экспрессным, результаты анализа могут быть получены в течение нескольких минут. Это дает возможность: а) проводить предварительную разбраковку проб, например, с целью выявления проб с низким содержанием анализируемых элементов — для активационного анализа, и с повышенным содержанием — для РРА; б) контролировать уровень содержания элементов, сильно поглощающих нейтроны, в первую очередь гадолиния, с целью правильного выбора величины навески пробы для ИНАА; в) выявлять «аномальные» пробы, представляющие интерес для дальнейшего исследования.

3. Для реализации РРА может быть использована та же спектрометрическая аппаратура, что и при ИНАА.

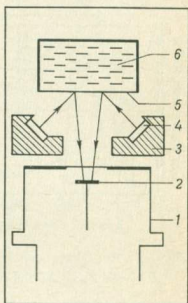


Рис. 10. Схема измерительного датчика:

1 — криостат ППД; 2 — чувствительный элемент детектора; 3 — защитный экран; 4 — радиоизотопный источник; 5 — лавсановая пленка; 6 — исследуемая проба

При рентгенорадиометрическом анализе мы использовали полупроводниковые детекторы рентгеновского излучения отечественного производства Si (Li)-детектор типа БДРК с энергетическим разрешением порядка 400 эВ в области энергий 15—20 кэВ и германиевый радиационный детектор типа ДГР с энергетическим разрешением примерно 520 эВ по линии 59,6 кэВ ^{241}Am , в сочетании с регистрирующей аппаратурой, описанной выше. В некоторых случаях использовали также анализатор типа АИ-256.

Для возбуждения характеристического излучения элементов применяли радиоизотопные источники ^{109}Cd (или $^{119\text{m}}\text{Sn}$), ^{241}Am и ^{57}Co . Устройство измерительного датчика схематически изображено на рис. 10.

С целью обеспечения высокой чувствительности и производительности анализа, пробы горных пород и породообразующих минералов измеряли в насыщенном слое в кюветах диаметром 30 мм. Необходимая навеска пробы — 10—30 г. Анализ богатых руд и рудных минералов проводили в тонких слоях [10]. На рис. 11 приведены результаты экспериментальной оценки чувствительности анализа в насыщенном слое (порог определе-

ния), рассчитанные по критерию 3σ , для Si (Li)- и Ge-детекторов. Были использованы различные радиоизотопные источники, и измерения проводили по $K\alpha$ -линиям характеристического излучения. Как следует из рис. 11, для элементов с энергией K -излучения, ниже 30—35 кэВ, т. е. от La—Ce в сторону легких элементов, большая чувствительность достигается с Si (Li)-детектором. Для тяжелых элементов (с энергией K -излучения выше 40 кэВ) — Ta, W и других, — необходимо применение Ge-детектора, обладающего значительно более высокой эффективностью регистрации фотонов в этой энергетической области.

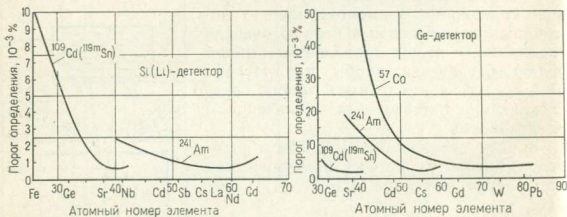


Рис. 11. Чувствительность анализа проб в насыщенном слое при длительности измерения 10 мин и интегральной загрузке спектрометра 3 кГц

Обычно мы применяли источник ¹⁰⁹Cd — при определении элементов группы Rb—Nb; ²⁴¹Am — для группы элементов от Ag до Nd и ⁵⁷Co — для редкоземельных элементов и группы Hf—Bi. В тех случаях, когда позволяла чувствительность, с одним источником определяли и более широкие группы элементов, например, от Rb до Ce — с источником ²⁴¹Am.

Для примера на рис. 12 и 13 приведены спектрограммы одной и той же пробы, полученные с источниками ¹⁰⁹Cd и ²⁴¹Am, соответственно. На рис. 15 дана диаграмма взаимного расположения $K\alpha$ и $K\beta$ -линий характеристического излучения элементов от брома до самария. Элементы с атомным номером ниже, чем у брома, не рассматриваются, в связи с недостаточным энергетическим разрешением используемых детекторов для селективного выделения аналитических линий соседних элементов в этой области энергий. Каждая линия изображена в виде треугольника с полушириной, соответствующей энергетическому разрешению спектрометра; β -линии примерно в 5 раз менее интенсивны, чем α -линии. Из диаграммы видно, что α -линии соседних по атомному номеру элементов, начиная с рубидия, практически полностью разрешаются. Для элементов группы Rb — Mo β -линии мешающих элементов практически совпадают с аналитическими α -линиями. Это позволяет достаточно точно

учитывать влияние мешающего элемента по интенсивности его α -линии. Например, при определении циркония измеренную интенсивность его α -линии уменьшают на величину, соответствующую одной пятой интенсивности α -линии стронция. При определении элементов группы Ag—Se влияние мешающих элементов обычно незначительно в связи с их низким содержанием в геологических пробах. При необходимости поправки вводятся по результатам измерения α -линий мешающих элементов.

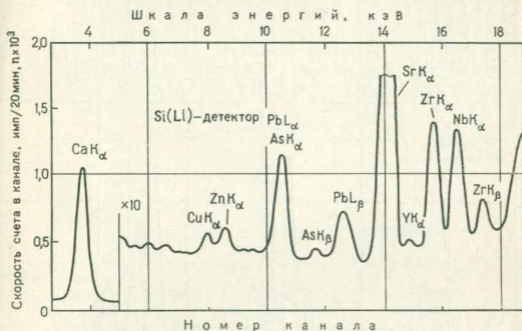


Рис. 12. Спектрограмма эталонной пробы на основе известняка, содержащего (в %) Cu — 0,03; Zn — 0,03; As — 0,03; Pb — 0,03; Sr — 0,03; Y — 0,003; Zr — 0,01; Nb — 0,01. Источник ^{109}Cd активностью 5 мКюри, интегральная загрузка спектрометра 2,5 кГц

Определения празеодима и неодима часто осложнены из-за наложения β -линий бария и лантана, содержание которых значительно выше.

Спектрограммы некоторых проб, полученные с Ge-детектором, показаны на рис. 14, 15. Зарегистрированные пики помечены соответствующими индексами рентгеновских линий; обозначение серии («К») регистрируемого излучения для краткости опущено. Заметим, что относительная интенсивность линий К-серии равна $I_{\alpha_1} : I_{\alpha_2} : I_{\beta_1} : I_{\beta_2} = 100 : 50 : 25 : 5$. Из приведенных графиков видно, что и при определении тяжелых элементов приходится в ряде случаев учитывать наложение линий. Поскольку в этой области энергий α_1 - и α_2 -линии практически полностью разрешены, каждая из них может быть использована в качестве аналитической. Например, для определений тантала целесообразно использовать линию Ta_{α_1} , — при повышенных содержаниях вольфрама и линию Ta_{α_2} , — при повышенных содержаниях гафния. Интенсивность аналитического пика находили

суммированием числа зарегистрированных импульсов в каналах пика за вычетом фона под ним, который определяли по уровню слева и справа от пика (как и при активационном анализе). В случае анализа проб в насыщенном слое для учета влияния вариаций макросостава проб на интенсивность анали-

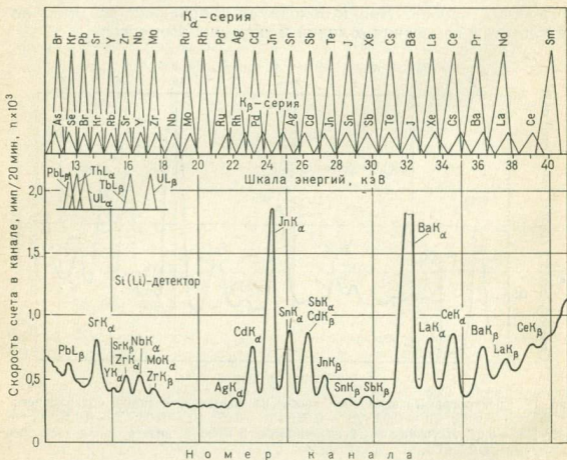


Рис. 13. Спектрограмма эталонной пробы на основе известняка, содержащего (в %) Pb — 0,03; Sr — 0,03; Y — 0,003; Zr — 0,01; Nb — 0,01; Cd — 0,01; Sn — 0,01; Sb — 0,01; Ba — 0,03; La — 0,01; Ce — 0,01. Пики AgK α и InK — от конструкционных материалов детектора. Источник ²⁴¹Am активностью 90 мКюри. Интегральная загрузка спектрометра 2,3 кГц

тической линии, в качестве аналитического параметра использовали отношение

$$\eta = I_{\text{пик}} / I_{\text{рас}},$$

где $I_{\text{пик}}$ — интенсивность аналитического пика за вычетом фона и поправки на влияние мешающих линий; $I_{\text{рас}}$ — интенсивность некогерентной составляющей пика рассеянного излучения возбуждающего источника. Содержание определяемого элемента находили из выражения

$$C_x = \frac{C_{\text{эт}} \cdot \eta_x}{\eta_{\text{эт}}}.$$

Анализ проб с высоким содержанием рудных элементов, например, монофракций лопарита, пирохлора и т. п., проводили в тонком слое с целью уменьшения влияния вариаций $Z_{эф}$ пробы. При массовом анализе обработку результатов измерений производили на ЭВМ по программе, аналогичной описанной выше.

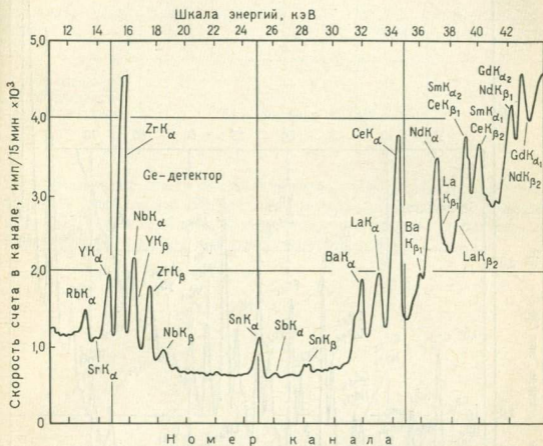


Рис. 14. Спектрограмма пробы редкометального гранита, содержащего (в %) Rb — 0,1; Y — 0,3; Zr — 1,1; Nb — 0,15; Sn — 0,04; Ba — 0,03; La — 0,023; Ce — 0,055; Nd — 0,021; Sm — 0,015; Gd — 0,023. Источник ^{241}Am активностью 90 мКюри. Интегральная загрузка спектрометра 3 кГц

Практическое использование метода для изучения поведения редких элементов при геохимических исследованиях различных типов горных пород, редкометальных руд и минералов, показало его высокую точность и эффективность, а также возможность применения в условиях полевой лаборатории [10]. Для примера в табл. 18 приведены экспериментальные результаты оценки точности определений ряда элементов в пробах нефелинового сиенита. Величина среднеквадратичной погрешности рассчитана по данным измерения 20 различных проб в двух параллельных навесках. Внешний контроль химическим и рентгено-спектральным методами показал отсутствие значимых систематических погрешностей. Производительность группового ана-

лиза на 5—7 элементов достигает 200—250 элементопределений в смену на одну установку.

В заключение отметим, что существуют реальные предпосылки дальнейшего значительного (в несколько раз) повыше-

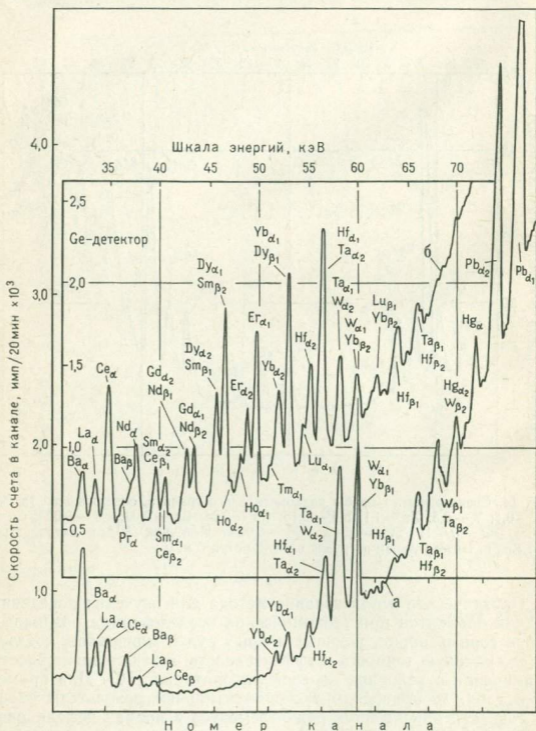


Рис. 15. Спектрограммы:

а) эталонной пробы на основе известняка, содержащего (в %) Ba—0,1; La—0,03; Ce—0,03; Yb—0,01; Hf—0,01; W—0,03; Ta—0,03; Hg—0,01; Pb—0,1; б) пробы редкометального гранита, содержащего (в %) Ba—0,03; La—0,023; Ce—0,055; Nd—0,021; Sm—0,015; Gd—0,023; Dy—0,042; Er—0,03; Yb—0,023; Hf—0,031; Ta—0,012; W—0,005. Источник ^{57}Co активностью 0,5 мКюри, интегральная загрузка спектрометра 1 кГц.

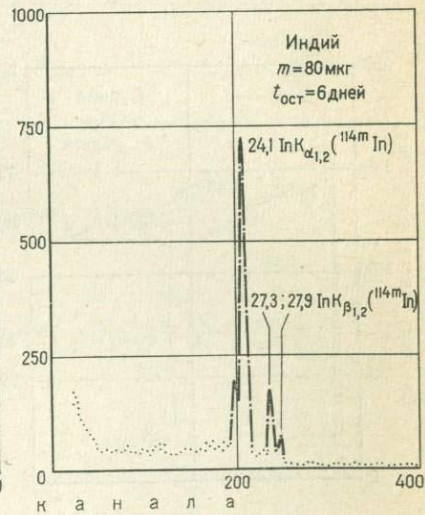
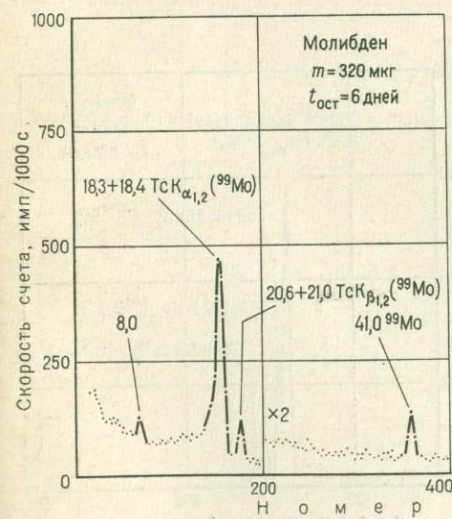
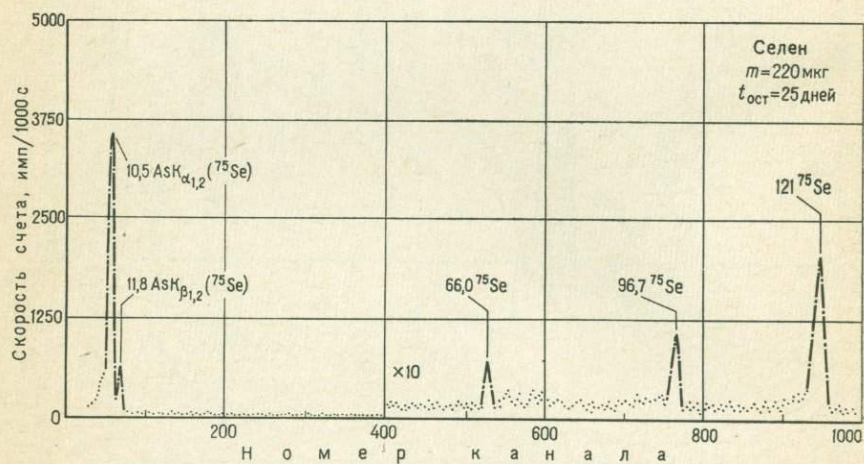
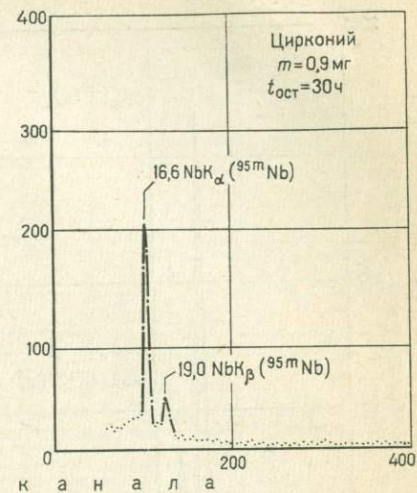
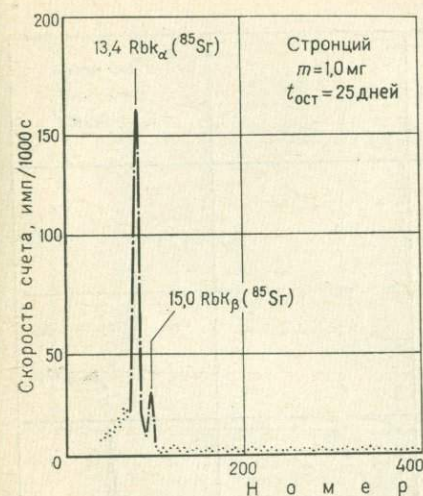
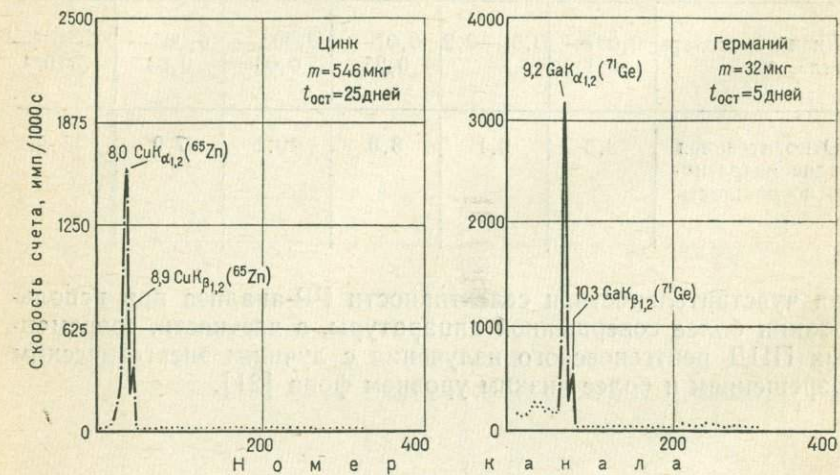
Точность группового анализа проб нефелинового сиенита РР-методом

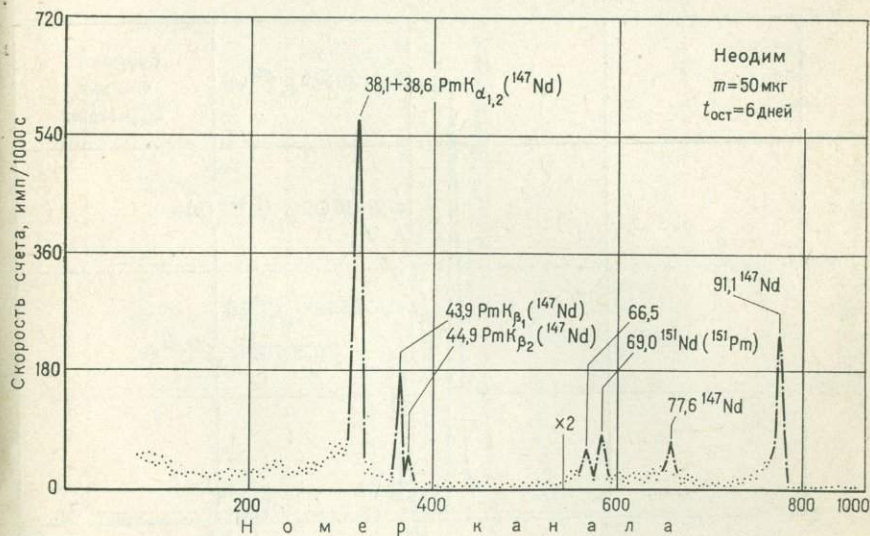
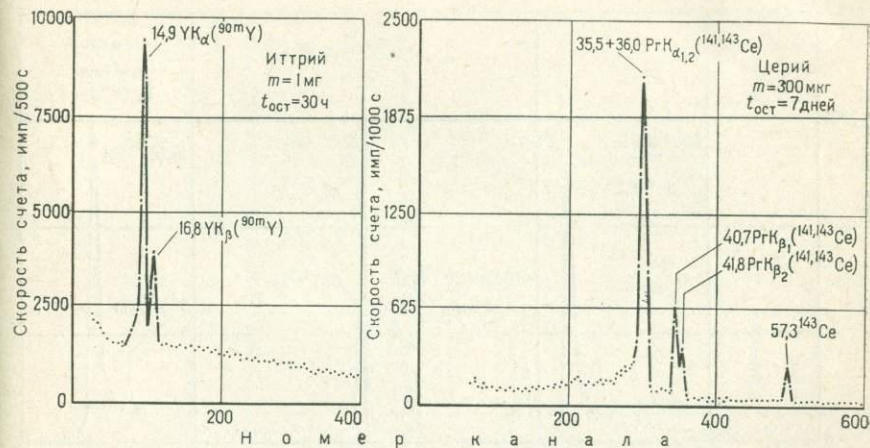
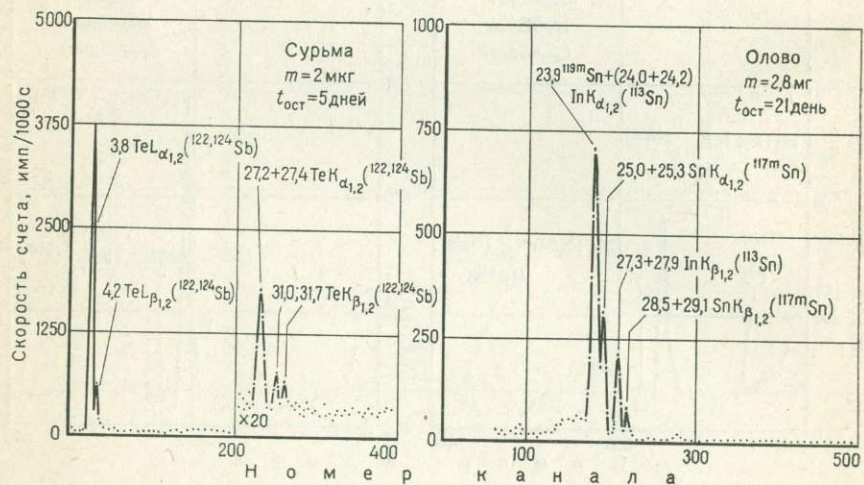
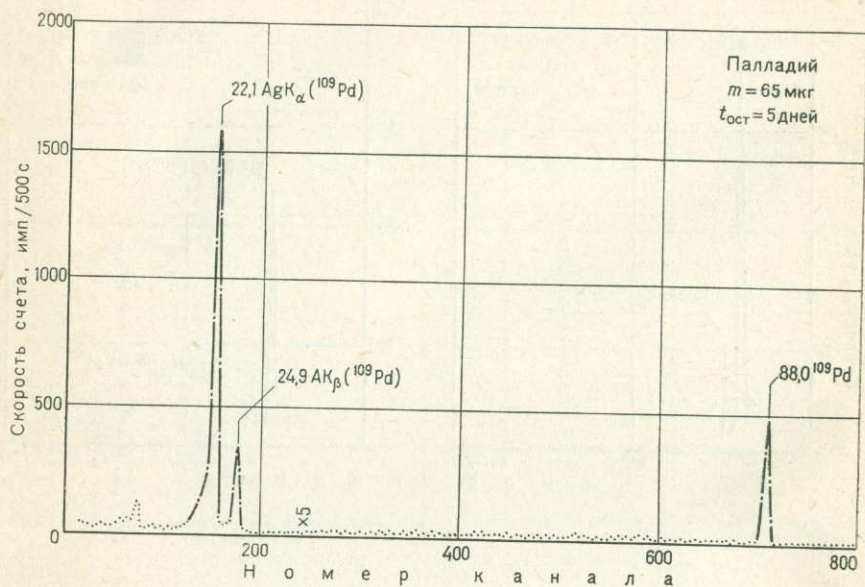
Определяемый элемент	Sr	Zr	Nb	La	Ce	Ta
Диапазон содержания, %	0,007— 0,1	0,01—0,2	0,01— 0,25	0,003— 0,03	0,005— 0,03	$5 \cdot 10^{-3}$ — $5 \cdot 10^{-2}$
Относительная среднеквадратичная погрешность, %	8,3	9,1	8,0	10,1	7,9	15,5

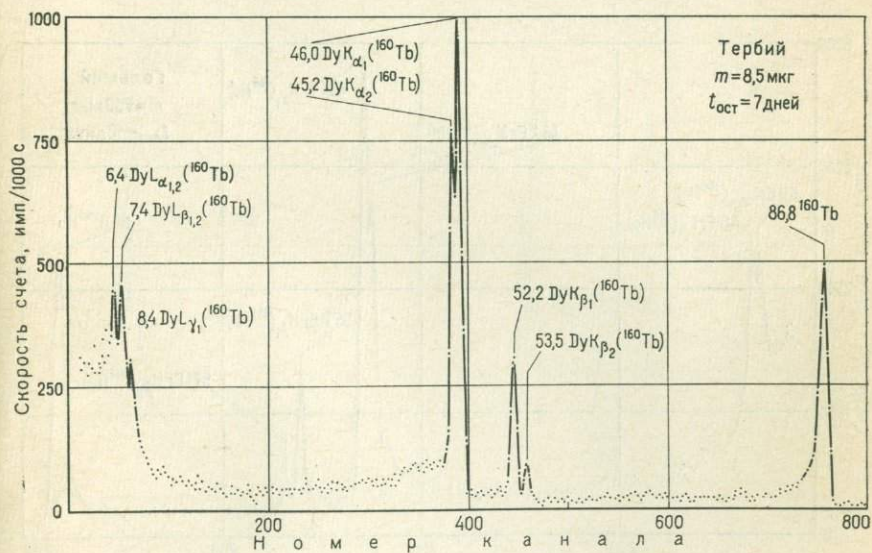
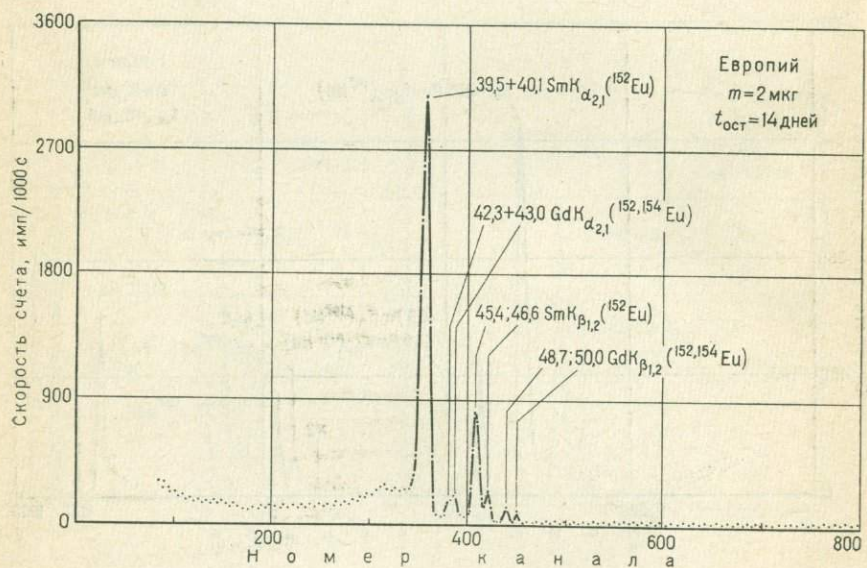
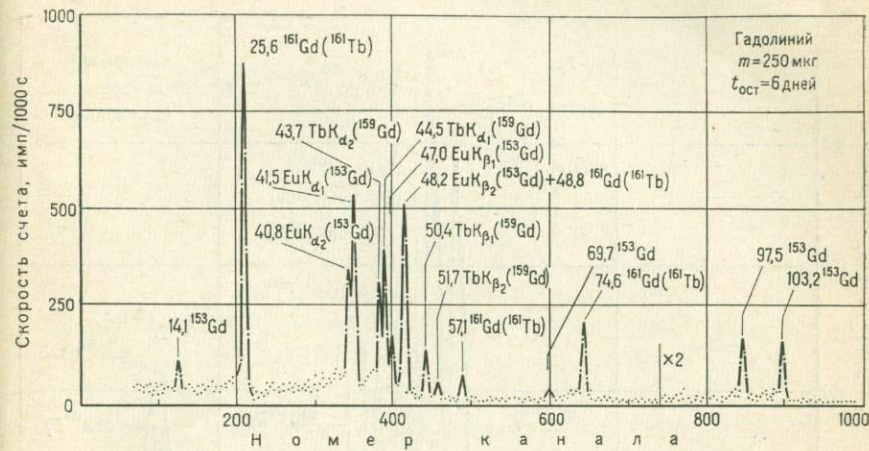
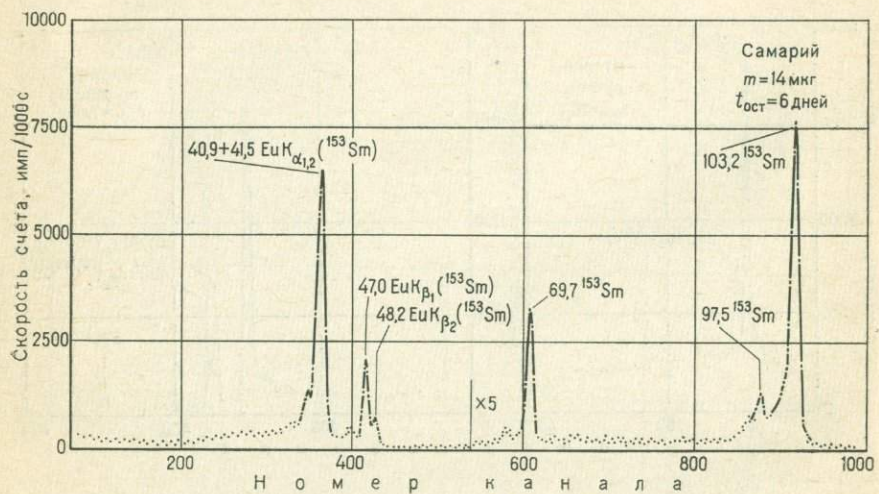
ния чувствительности и селективности РР-анализа при использовании более совершенной аппаратуры, в частности, современных ППД рентгеновского излучения с лучшим энергетическим разрешением и более низким уровнем фона [21].

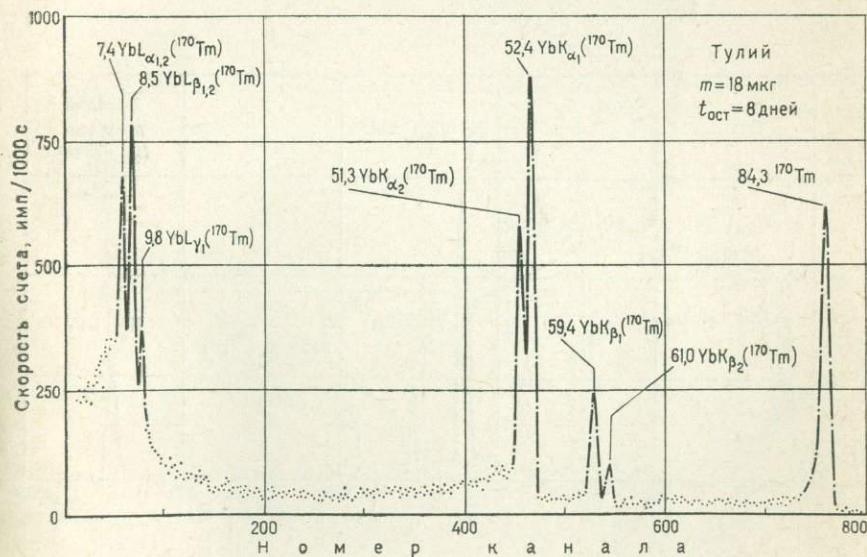
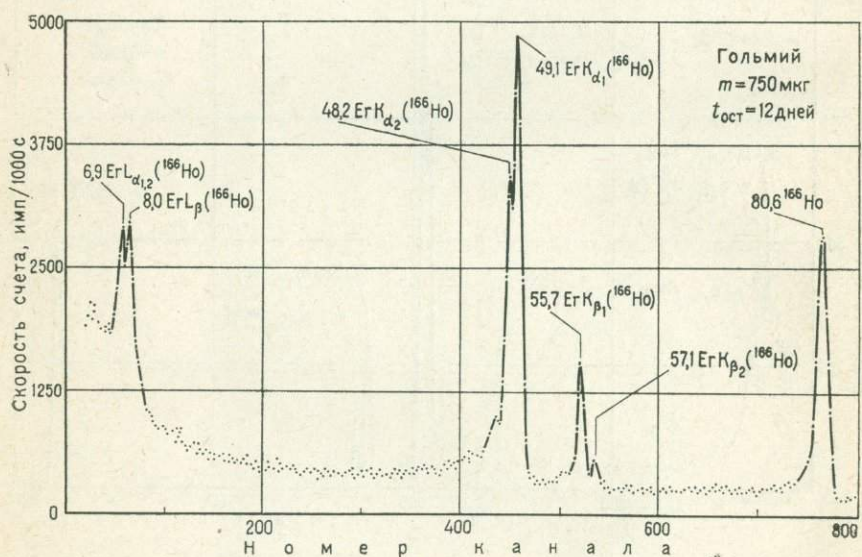
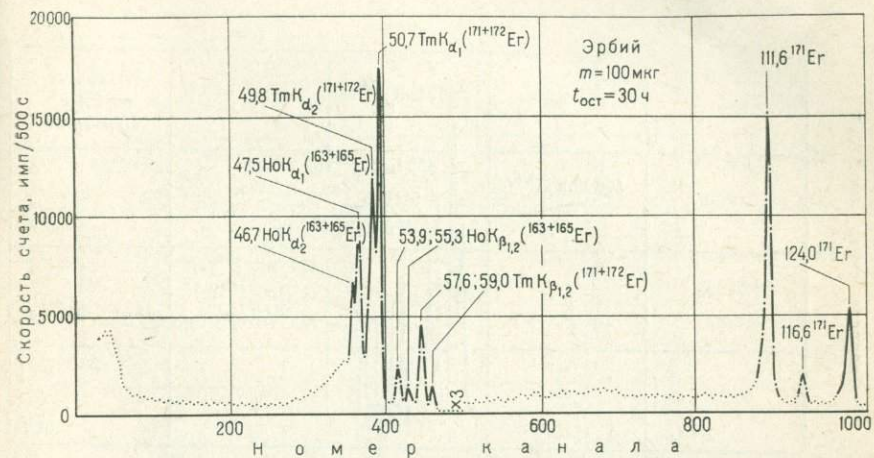
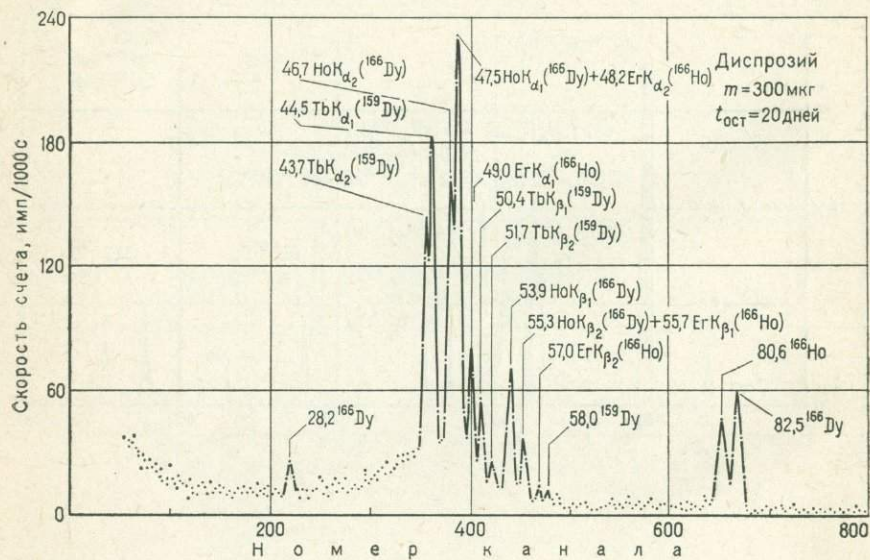
АППАРАТУРНЫЕ СПЕКТРЫ ОБЛУЧЕННЫХ ПРЕПАРАТОВ
ПРИРОДНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ В ОБЛАСТИ ЭНЕРГИЙ 5—120 кэВ

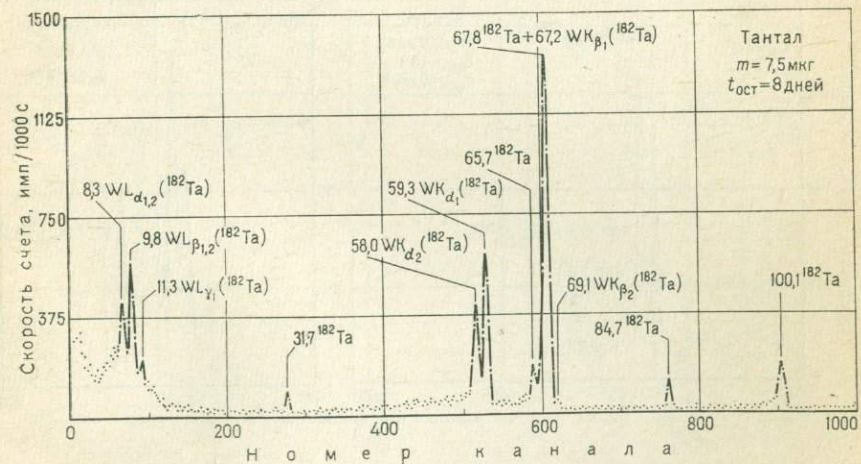
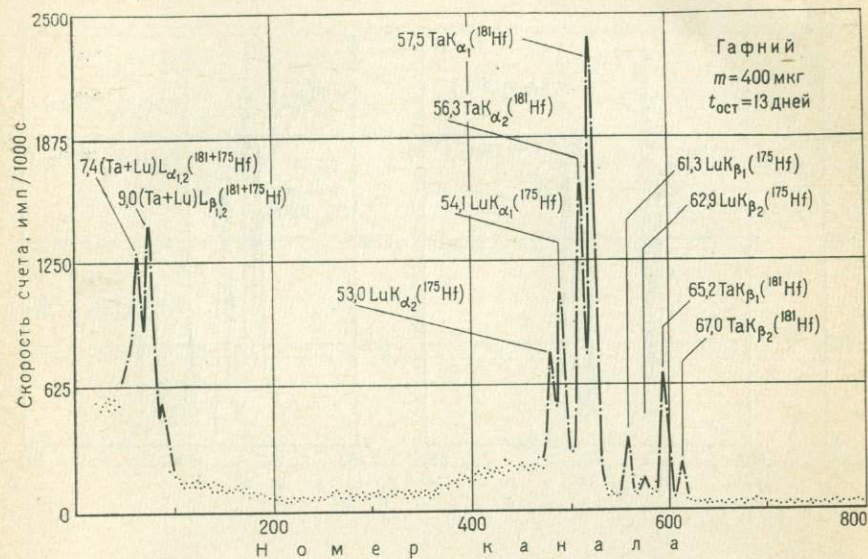
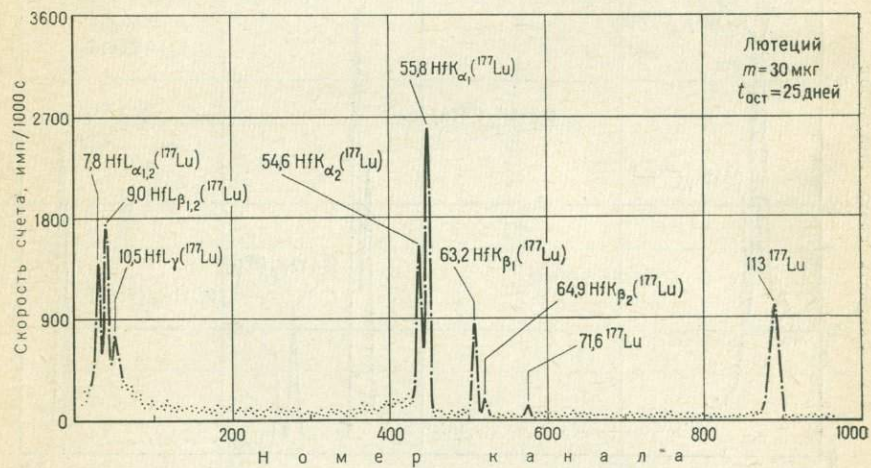
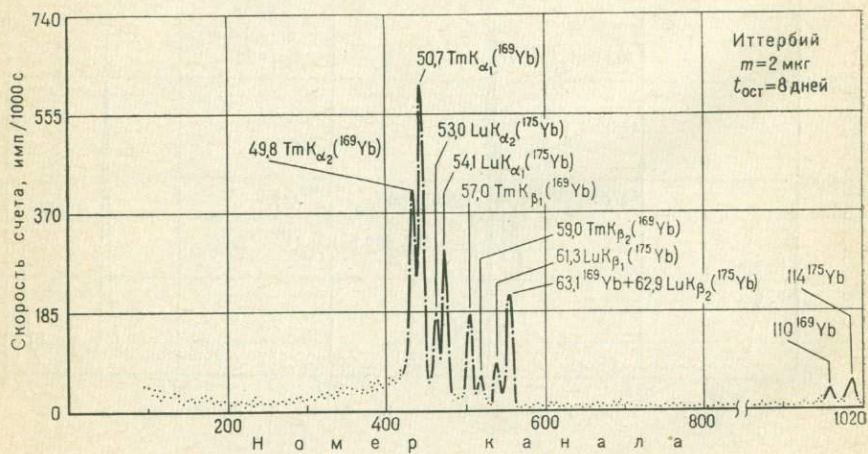
Рис. 16—40. Аппаратурные спектры облученных препаратов природных элементов в области энергий 5—120 кэВ

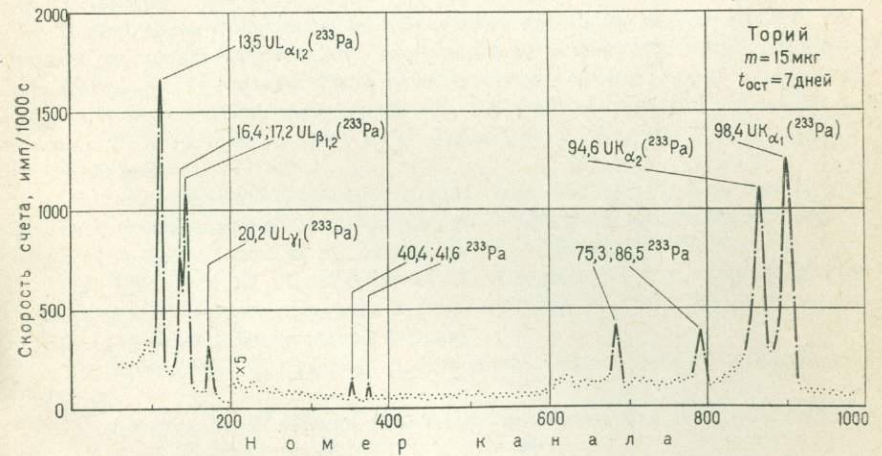
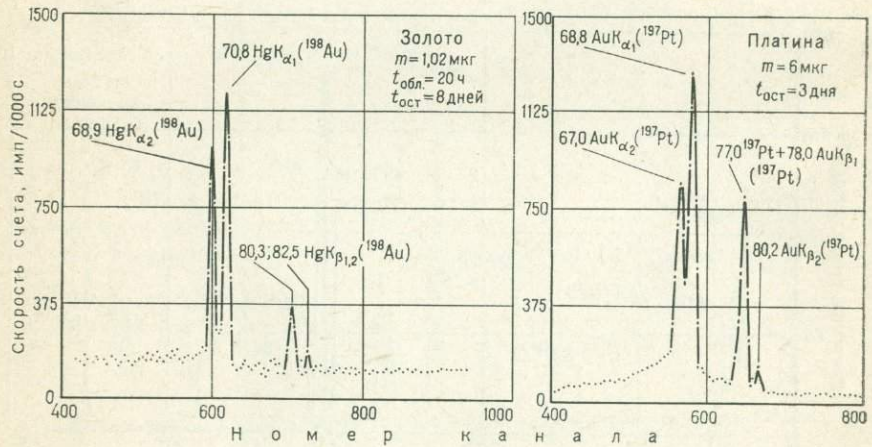
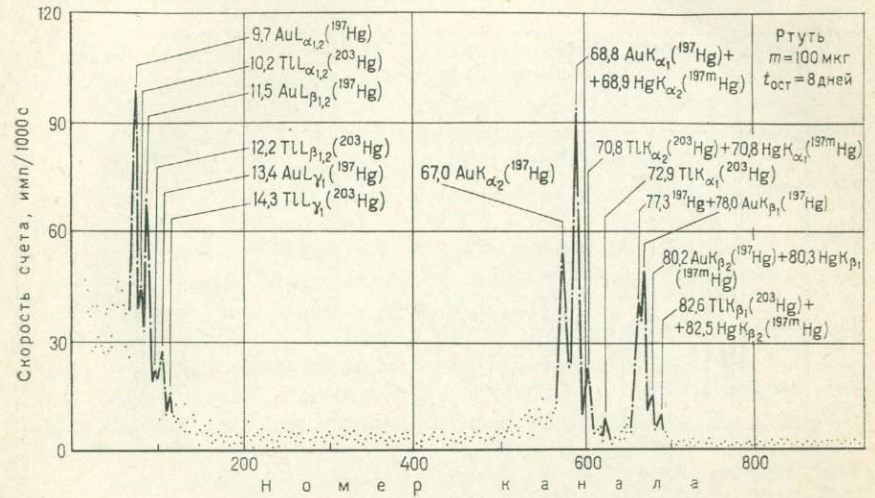
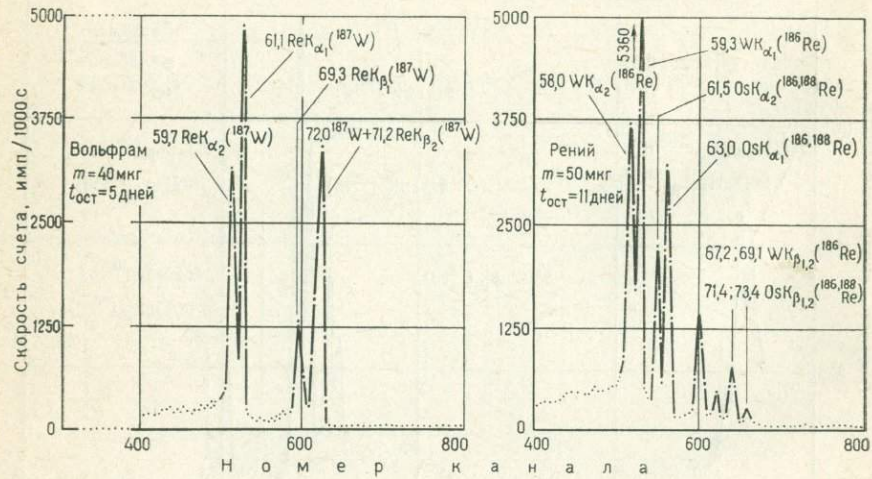


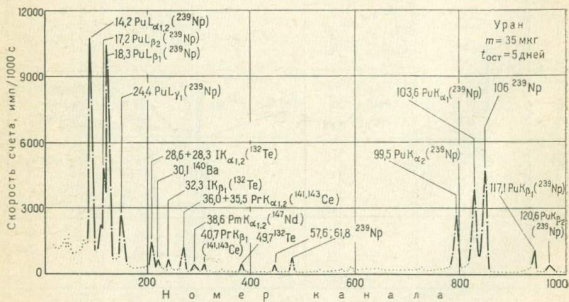












СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ганзеев А. А., Сотсков Ю. П. Распределение РЗЭ во флюорите различного генезиса. — «Геохимия», 1976, № 3. 308 с.
2. Гунне Х. Э., Пелекис Л. Л. Роль статистического характера излучения в выборе критерия чувствительности нейтронно-активационного анализа. — В кн.: Нейтронно-активационный анализ. Рига, «Знание», 1966. 5 с.
3. Гусев Н. Г., Рубцов П. М. Радиационные характеристики продуктов деления. Справочник. М., Атомиздат, 1974, с. 8—9.
4. Дамбург Н. А., Пелекис Л. Л., Протасова Л. Ф. Уменьшение потока и его учет в нейтронно-активационном анализе. — В кн.: Нейтронно-активационный анализ. Рига, «Знание», 1966. 15 с.
5. Джелипов Б. С., Кокшарова С. Ф. Гамма-кванты изотопов, применяемых в нейтронно-активационном анализе. М., Атомиздат, 1974. 172 с.
6. Егиазаров Б. Г., Корытко Л. А., Сельдяков Ю. П. Измерительная техника в инструментальном нейтронно-активационном анализе. М., Атомиздат, 1972. 211 с.
7. Зайцев Е. И., Сотсков Ю. П., Лаптев В. Г. Инструментальный активационный анализ горных пород. — «Разведка и охрана недр», 1971, № 8. 38 с.
8. Активационное определение тантала в минералах и горных породах с помощью Ge (Li)-спектрометра. — «Журнал аналитической химии», 1970, т. 25, № 10, 1922. с. Авт.: Е. И. Зайцев, И. С. Днепровский, Ю. П. Сотсков, В. Г. Лаптев.
9. Нейтронно-активационное определение некоторых редкоземельных элементов по характеристическому рентгеновскому и мягкому гамма-излучению продуктов (β , γ)-реакции. Экспресс-информация ВИЭМС. «Сер. Лабораторные и технологические исследования и методы обогащения минерального сырья». 1973. № 5. 13 с. Авт.: Е. И. Зайцев, О. П. Польша, Ю. П. Сотсков, Г. И. Фадеев.
10. Рентгенорадиометрический анализ геохимических проб на редкие элементы с использованием Si (Li)-детектора. — «Журнал аналитической химии», 1974, № 4. 668 с. Авт.: Е. И. Зайцев, Е. М. Марголин, О. П. Польша и др.
11. Зингерман Ю. В., Шведов О. В. Измерение потоков тепловых, надкадмиевых и быстрых нейтронов в реакторе ТВР. М., 1974. 36 с. (Ин-т теоретической и экспериментальной физики).
12. Ковальский Е. Ядерная электроника. Пер. с англ. М., Атомиздат, 1972. 402 с.
13. Крейтер В. М. Поиски и разведка месторождений полезных ископаемых. Ч. 2. М., Госгеолтехиздат, 1961, с. 375—396.
14. Кузнецов Р. Л. Активационный анализ. Изд. 2-е. М., Атомиздат, 1974. 323 с.
15. Маслов Н. А., Лукницкий В. А. Справочник по нейтронному активационному анализу. Л., «Наука», 1971. 312 с.

16. Резников Р. С., Сельдяков Ю. П. Промышленные полупроводниковые детекторы. М., Атомиздат, 1975. 87 с.
17. Сухов Г. В., Фирсов В. И. В сб. «Ядернофизические методы анализа вещества», М., Атомиздат, 1971. 52 с.
18. Якубович А. Л., Зайцев Е. И., Пржиялговский С. М. Ядернофизические методы анализа минерального сырья. Изд. 2-е, М., Атомиздат, 1973. 391 с.
19. Gordon G. E. Geochim. et cosmochim. acta, 1968, v. 32, No. 4, p. 369.
20. Kamemoto Y., Yamagashi Sh. Bull. Chem. Soc. of Japan, 1964, v. 37, No. 5, p. 664.
21. Landis D. A. Nucl. Instr. and Meth. 1972, v. 101, p. 127.
22. Lederer C. M., Hollander J. M., Perlman I. Table of Isotopes. Six ed N.-Y.-Lond. — Sydney, Willey, 1967.
23. Mantel M., Amiel S. Analytical Chemistry, 1972, v. 44, No. 3, p. 548.
24. Pagden I. M. H., Pearson G. J., Bewers J. M. «Journal of Radional. Chemistry». 1971, v. 8, 9.
25. Zaitsev E. I., Sotskov Yu. P. — «Jornal of Radioanalyt. Chem.», 1973, v. 18, p. 42.

СОДЕРЖАНИЕ

Предисловие	3
1. Методика анализа проб горных пород	5
2. Гамма-спектрометрическая аппаратура с ППД	9
3. Возможные источники погрешностей анализа	13
4. Анализ по долгоживущим изотопам	20
5. Анализ по относительно короткоживущим изотопам	45
6. Анализ по рентгеновскому и мягкому гамма-излучению	56
7. Обработка результатов измерений на ЭВМ	68
8. Некоторые результаты применения ИНАА	73
9. Комплексование нейтронно-активационного и рентгенорадиометрического методов	77
Аппаратурные спектры облученных препаратов природных элементов в области энергий 5—120 кэВ	86
Список литературы	99
Приложения (вкладки):	
1. Спектрограммы некоторых образцов, полученных на Ge (Li)-детекторе при анализе по долгоживущим изотопам	
2. Спектрограммы нефелинового сненита и иттро-синхизитовой руды, измеренные на детекторе рентгеновского излучения при анализе по долгоживущим радиоизотопам	

ИБ № 2279

Евгений Иванович Зайцев
Юрий Павлович Сотсков
Рафаил Семенович Резников

НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННЫЙ АНАЛИЗ
ГОРНЫХ ПОРОД
НА РЕДКИЕ ЭЛЕМЕНТЫ

Редактор издательства *Л. С. Цаплина*
Переплет художника *А. Е. Чучканова*
Художественный редактор *В. В. Евдокимов*
Технический редактор *А. Е. Матвеева*
Корректор *К. А. Кузьмина*

Сдано в набор 16/VI 1977 г.
Подписано в печать 15/X 1977 г.
Т-18317
Формат 60×90^{1/16} Бумага № 2
Печ. л. 7,25 с 2 вкл. Уч.-изд. л. 6,90
Тираж 1200 экз. Заказ 455/12203—14
Цена 50 коп.

Издательство «Недра», 103633, Москва, К-12,
Третьяковский проезд, 1/19

Ленинградская картографическая фабрика
объединения «Аэрогеология»

Уважаемый товарищ!

В издательстве «Недра»
готовятся к печати новые книги

**ИСАЕНКО М. П., БОРИШАНСКАЯ С. С., АФАНАСЬ-
ЕВА Е. Л. Определитель главнейших минералов руд в отражен-
ном свете. Учебное пособие. 20 л. 1 р. 84 к.**

В основу учебного пособия положена одноименная работа авторов, изданная в 1972 г. В определителе изложены главнейшие методы диагностики рудных минералов в отраженном свете: по отражению, твердости, цвету, анизотропии, внутренним рефлексам, кристалломорфным особенностям, а также методы микрохимического и парагенетического анализа. Книга содержит определительные и справочные таблицы, в которых сведены данные о диагностических свойствах почти 300 рудных минералов. Таблицы обеспечивают микроскопическую диагностику практически всех наиболее распространенных рудообразующих минералов.

Определитель предназначен в качестве учебного пособия по рудной микроскопии для студентов геологических вузов, а также будет полезен специалистам, занимающимся изучением руд и диагностикой рудных минералов.

**РУДНЫЕ месторождения СССР. В 3-х томах. Том I. Под
ред. акад. В. И. Смирнова. Изд. 2 перераб. и доп. (1 изд. — 1974).
31 л. 2 р. 17 к. Авт.: Смирнов В. И., Соколов Г. А., Павлов Н. В.
и др.**

Книга «Рудные месторождения СССР» составлена группой квалифицированных специалистов страны в области геологии рудных полезных ископаемых. В первом томе содержится описание месторождений железа, марганца, хрома, титана, ванадия и алюминия. Каждому металлу посвящен отдельный раздел. В его вводной части приведены общие сведения о месторождениях данного металла, обоснована их группировка. В основной части раздела содержится описание выделенных групп месторождений, иллюстрированное специально подобранными геологическими планами и разрезами. В качестве типичных примеров выбраны наиболее представительные и важные объекты. По классическим месторождениям страны приведены новейшие данные. Описание новых типов месторождений целиком построено на оригинальных материалах.

РУДНЫЕ месторождения СССР. В 3-х томах. Том II. Под ред. акад. В. И. Смирнова. Изд. 2, перераб. и доп. (1 изд.—1974). 35 л. 2 р. 39 к. Авт.: Смирнов В. И., Крутов Г. А., Горжеvский Д. И. и др.

Во втором томе книги охарактеризованы месторождения никеля, кобальта, меди, свинца, цинка, висмута, сурьмы, ртути и урана. Порядок описания месторождения тот же, что и для первого тома.

РУДНЫЕ месторождения СССР. В 3-х томах. Том III. Под ред. акад. В. И. Смирнова. Изд. 2, перераб. и доп. (1 изд.—1974). 44 л. 2 р. 86 к. Авт.: Смирнов В. И., Невский В. А., Щеголов А. Д. и др.

В третьем томе книги охарактеризованы месторождения редких металлов, а также рассеянных элементов. Порядок описания месторождений тот же, что и для первого и второго томов.

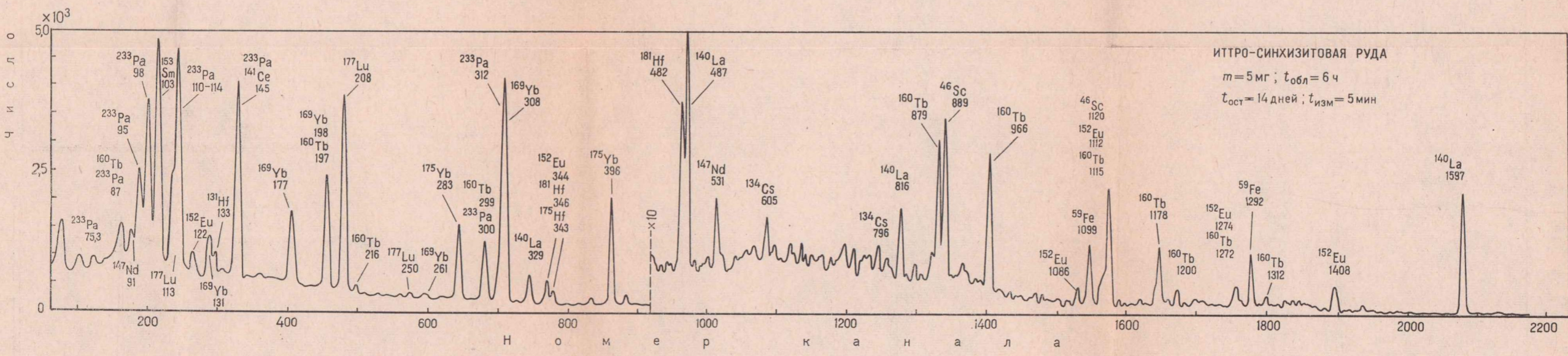
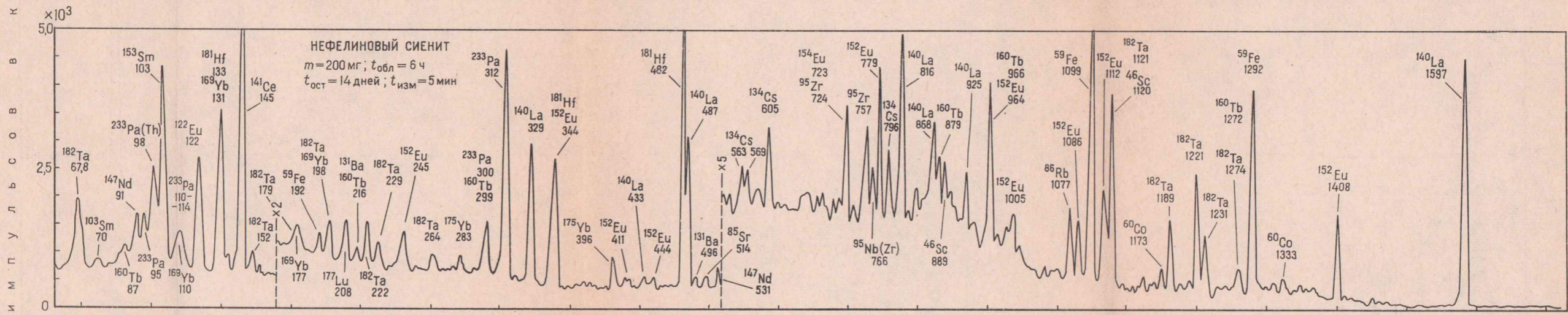
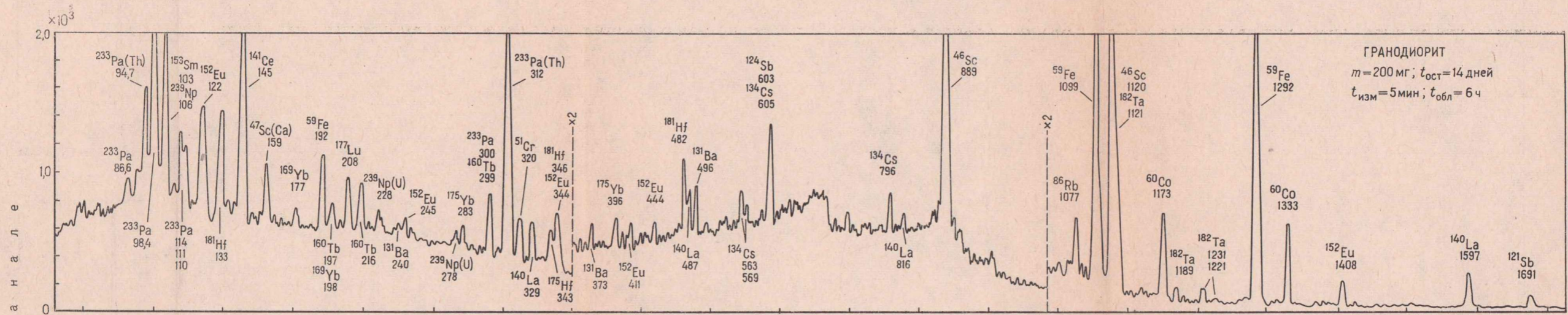
Трехтомник рассчитан на широкий круг геологов производственных и научных организаций, занимающихся изучением рудной базы страны, а также на студентов высших и средних геологических и горных учебных заведений.

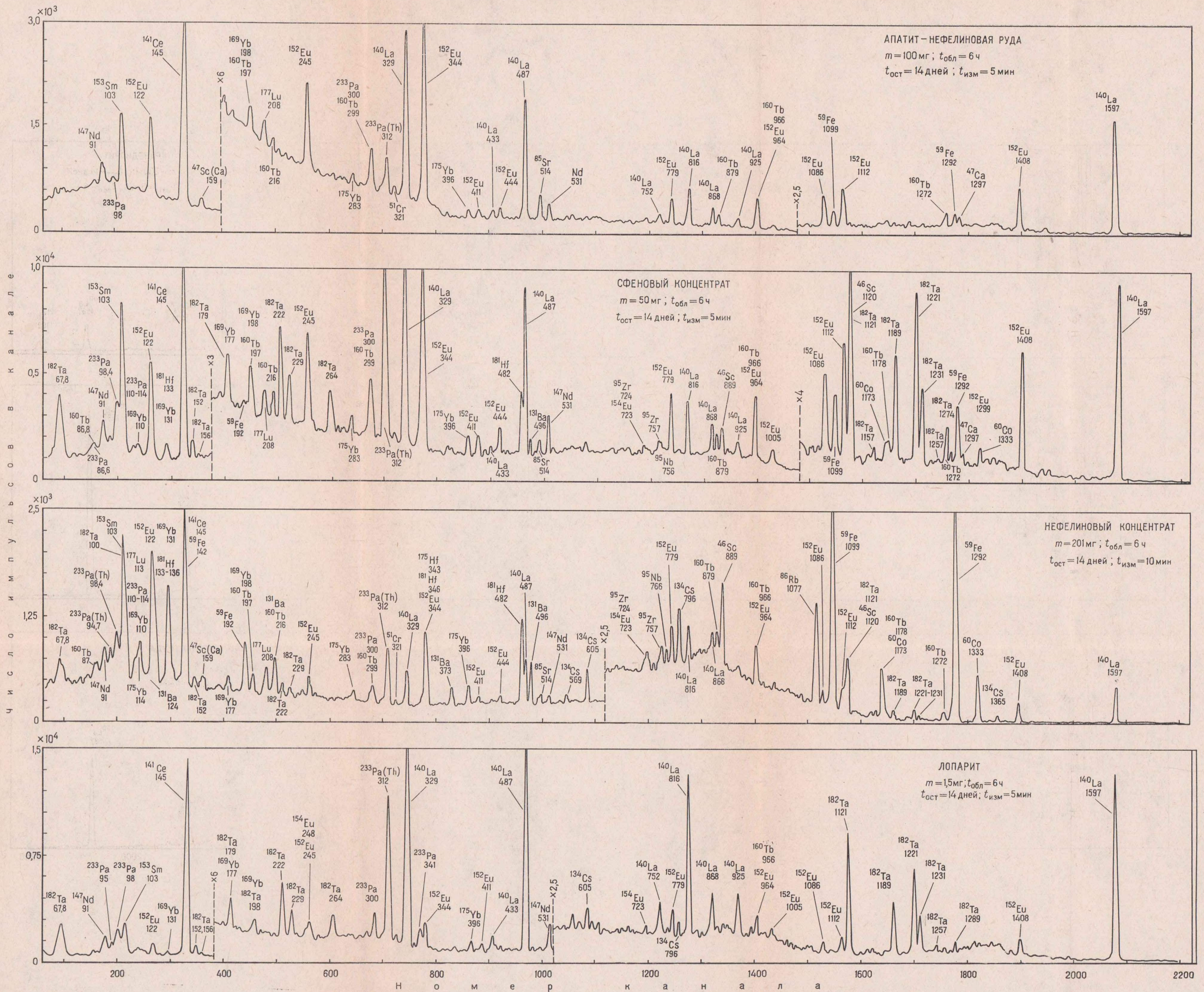
Интересующие Вас книги Вы можете приобрести в местных книжных магазинах, распространяющих научно-техническую литературу, или заказать через отдел «Книга — почтой» магазинов:

№ 17 — 199178 — Ленинград, В. О., Средний проспект, 61;

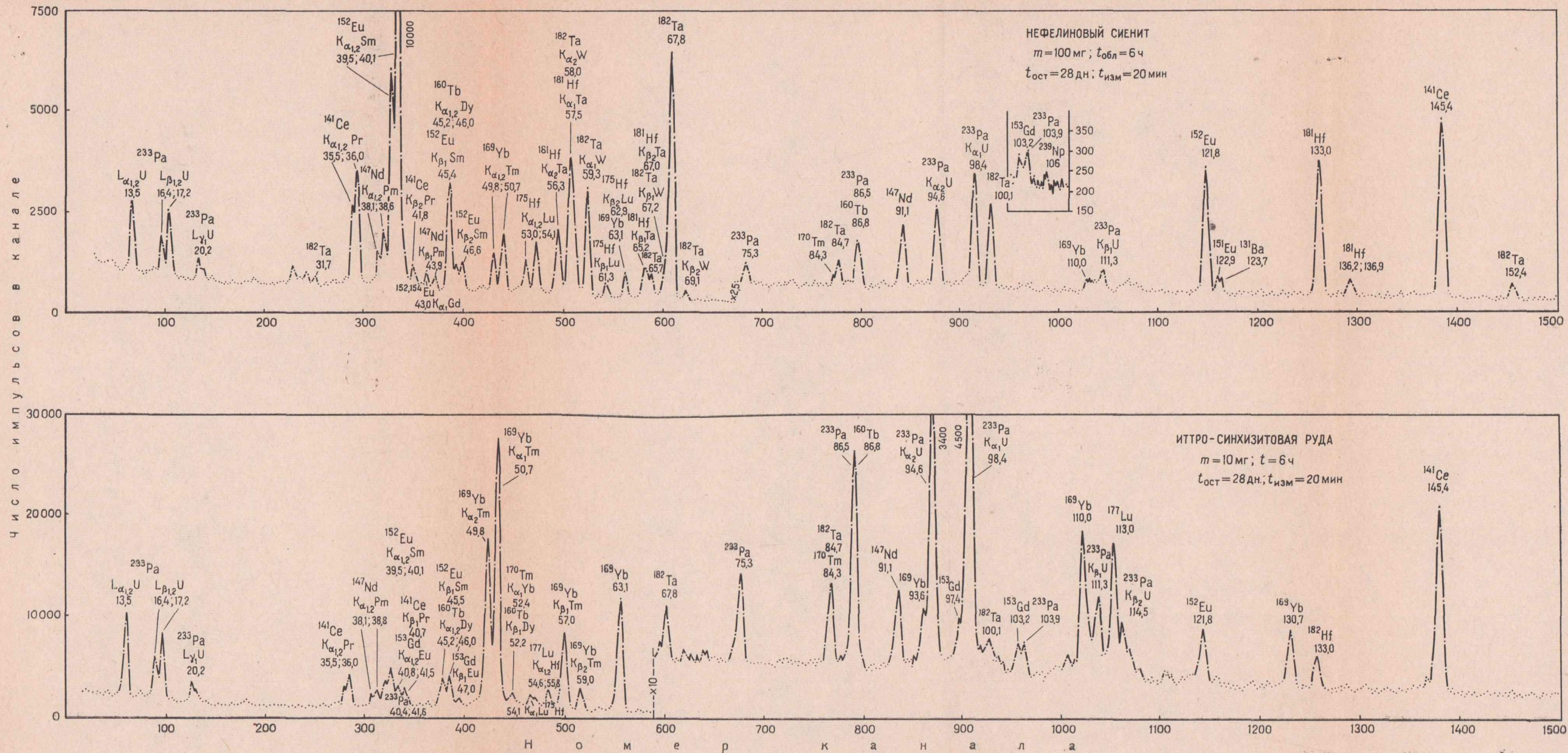
№ 59 — 127412 — Москва, Коровинское шоссе, 20

ИЗДАТЕЛЬСТВО «НЕДРА»





Приложение 2. Спектрограммы нефелинового сненита и иттро-синхизитовой руды, измеренные на детекторе рентгеновского излучения при анализе долгоживущим радиоизотопами



50 коп.

2323

НЕДРА