

УДК 53.087:681.3:578:621.039.85

**РАДИОИНДИКАТОРНАЯ РЕГИСТРАЦИЯ КИНЕТИКИ  
СОВМЕСТНОГО ПЕРЕНОСА НЕСКОЛЬКИХ МЕЧЕНЫХ ИОНОВ  
ГАММА-СПЕКТРОМЕТРИЧЕСКИМ МЕТОДОМ  
С ПРИМЕНЕНИЕМ МИНИ-ЭВМ**

**Б. И. ШКАРИН, В. В. РАЧИНСКИЙ**

**(Кафедра прикладной атомной физики и радиохимии)**

Решение ряда теоретических и практических задач, возникающих при изучении динамики переноса, распределения и сорбции

веществ в растениях, почвах, хроматографических колонках и т. д., связано с получением непрерывной или дискретно-непрерыв-

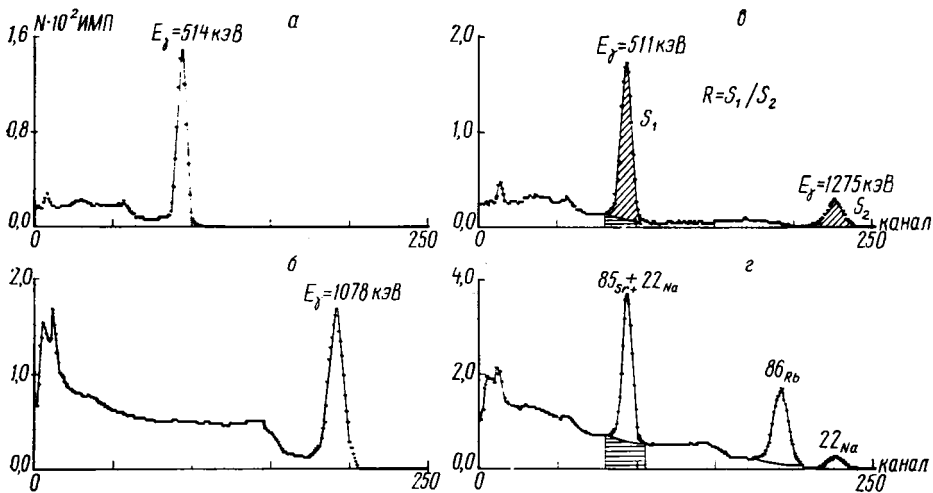


Рис. 1. Аппаратурные спектры гамма-излучающих изотопов  $^{85}\text{Sr}$  (а),  $^{86}\text{Rb}$  (б),  $^{22}\text{Na}$  (в) и их смеси (г).  
 $S_1$  и  $S_2$  — площади под фотопиками соответственно  $E_\gamma = 511$  кэВ и  $E_\gamma = 1275$  кэВ.

ной информации об изменении их концентрации в различных объектах. Метод меченых атомов в последние десятилетия с успехом применяется в подобного рода исследованиях. Обычно при исследовании каких-либо динамических процессов используется радиометрическая методика регистрации интенсивности излучения одного меченого иона, а другие вводятся немечеными [1, 6, 7, 9]. Увеличение числа радионуклидов в эксперименте требует привлечения дополнительных конструктивных и методических решений. Для изучения процессов взаимовлияния различных меченых ионов в том или ином объекте необходимо применение спектрометрической аппаратуры. Так, в работе [5] описывается сцинтилляционный автоматический дифференциальный интенсивметр-спектрометр, способный регистрировать скорость счета в различных энергетических поддиапазонах, что позволяет использовать образцы, меченные несколькими гамма-излучающими радионуклидами. При этом нужно отметить, что применение интенсивметра иногда может привести к достаточно сильным искажениям аппаратурных линий из-за его «инерционности» в передаче сигнала.

Восстановление истинной картины протекающего процесса представляет собой достаточно сложную и трудоемкую операцию [3, 4].

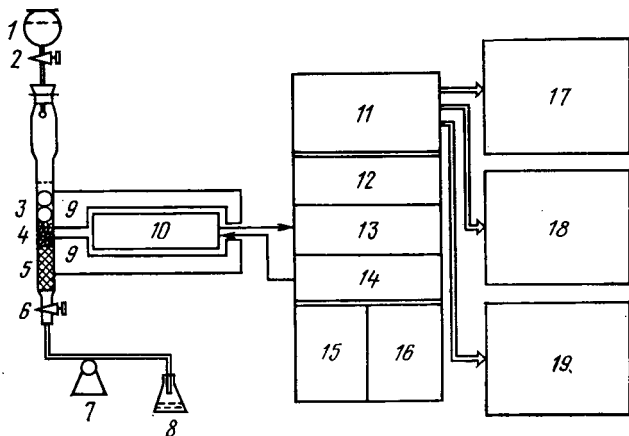
Другая методика регистрации интенсивности излучения меченых ионов основывается на гамма-спектрометрических измерениях динамических процессов, протекающих в источнике излучения. В этом случае наиболее точная и объективная информация при регистрации гамма-излучения нескольких радионуклидов может быть получена при помощи многоканального амплитудного анализатора [2]. Действительно, если в качестве детектора излучения используется сцинтилляционный кристалл  $\text{NaI(Tl)}$ , то амплитуда сигнала, возникающего в результате взаимодействия гамма-излучения с веществом детектора, линейно зависит от энергии падающего излучения и в наиболее простом виде описывается выражением

$$U = kE_\gamma, \quad (1)$$

где  $U$  — амплитуда выходного сигнала с детектора излучения;  $E_\gamma$  — энергия гамма-фотона и  $k$  — коэффициент пропорциональности. Поэтому зарегистрированный амплитудным анализатором аппаратурный спектр

Рис. 2. Схема измерительного комплекса.

1 — сосуд с меченым или немеченым раствором; 2 — кран I; 3 — стеклянные шарики; 4 — отрезки корней; 5 — песок; 6 — кран II; 7 — перистальтический насос; 8 — сосуд с отработанным раствором; 9 — свинцовая защита с коллиматором; 10 — сцинтилляционный детектор с кристаллом  $\text{NaI(Tl)}$ ; 11 — мини-ЭВМ MULTI-4 с объемом оперативной памяти 64 Кбайт; 12 — аналого-цифровой преобразователь; 13 — усилитель; 14 — источник питания ФЭУ для детектора; 15 и 16 — блоки гибких дисков; 17 — дисплей с клавиатурой; 18 — терминал для вывода графоцифровой информации; 19 — терминал для перфорирования данных.



прямо или косвенно характеризует энергетическое распределение взаимодействия гамма-излучения с веществом детектора. Наименьшим искажением в аппаратурном спектре подвержен пик полного поглощения, или фотопик, обусловленный многократным комптоновским взаимодействием гамма-фотона с детектором при поглощении гамма-фотона или фотоэлектронным взаимодействием. Используя кривую фотоэффективности гамма-спектрометра, полученную при его энергетической градуировке, по зарегистрированному аппаратурному спектру можно определить как качественные, так и количественные характеристики гамма-излучающих образцов. В результате оказывается возможным идентифицировать изотопный состав и найти парциальную активность каждого изотопа многокомпонентного источника.

Для практического применения подобной методики необходимо использовать современные системы сбора и обработки экспериментальной информации, реализованные на основе универсальных малых или микро-ЭВМ, работающих в реальном масштабе времени эксперимента. Разработанный нами автоматизированный измерительный комплекс создан на базе программируемого многоканального амплитудного анализатора IN-90 французской фирмы «Intertechnique» и предназначен для регистрации парциальных активностей смеси гамма-излучающих радионуклидов. Для исследования кинетики совместного переноса различных элементов в растительном материале нами были выбраны меченые ионы Sr, Rb и Na. На рис. 1 приведены аппаратурные спектры как отдельных гамма-излучающих изотопов  $^{85}\text{Sr}$ ,  $^{86}\text{Rb}$  и  $^{22}\text{Na}$ , так и их смеси. Вопросы аппаратного и программного обеспечения автоматизированного измерительного комплекса, работающего в режиме регистрации данных, рассматриваются в настоящей работе.

На рис. 2 дана структурная схема измерительного комплекса. Сектор колонки (с внутренним диаметром 7,7 мм), в котором размещаются миллиметровые отрезки корней растений, устанавливаются напротив щели свинцового коллиматора (высотой 5,5 мм и длиной 80 мм) таким образом, чтобы она фиксировала часть объема колонки, полностью заполненного растительным материалом. Наличие свинцовой защиты вокруг детектора позволяет снизить радиационный фон установок. Однако в результате использования коллиматора эффективность регистрации гамма-излучения сцинтилляционным детектором (с кристаллом NaI(Tl) размером 60×60 мм) снижалась. Сырую массу корней, в которых происходило поглощение или вымывание меченых ионов, определяли с учетом «коэффициента улавливания» (отношение объема, занимаемого отрезками корней, к объему колонки напротив щели коллиматора). Для исследования процессов поглощения и вымывания ионов из различных компартментов растительной клетки через колонку перистальтическим насосом с установленной скоростью прокачивали сначала меченый раствор с заданной концентрацией для каждого меченого элемента, затем для обеспечения процесса регистрации вымывания накопленных ионов раствор немеченого элемента того же объема и той же молярности. Чтобы стандартизировать размеще-

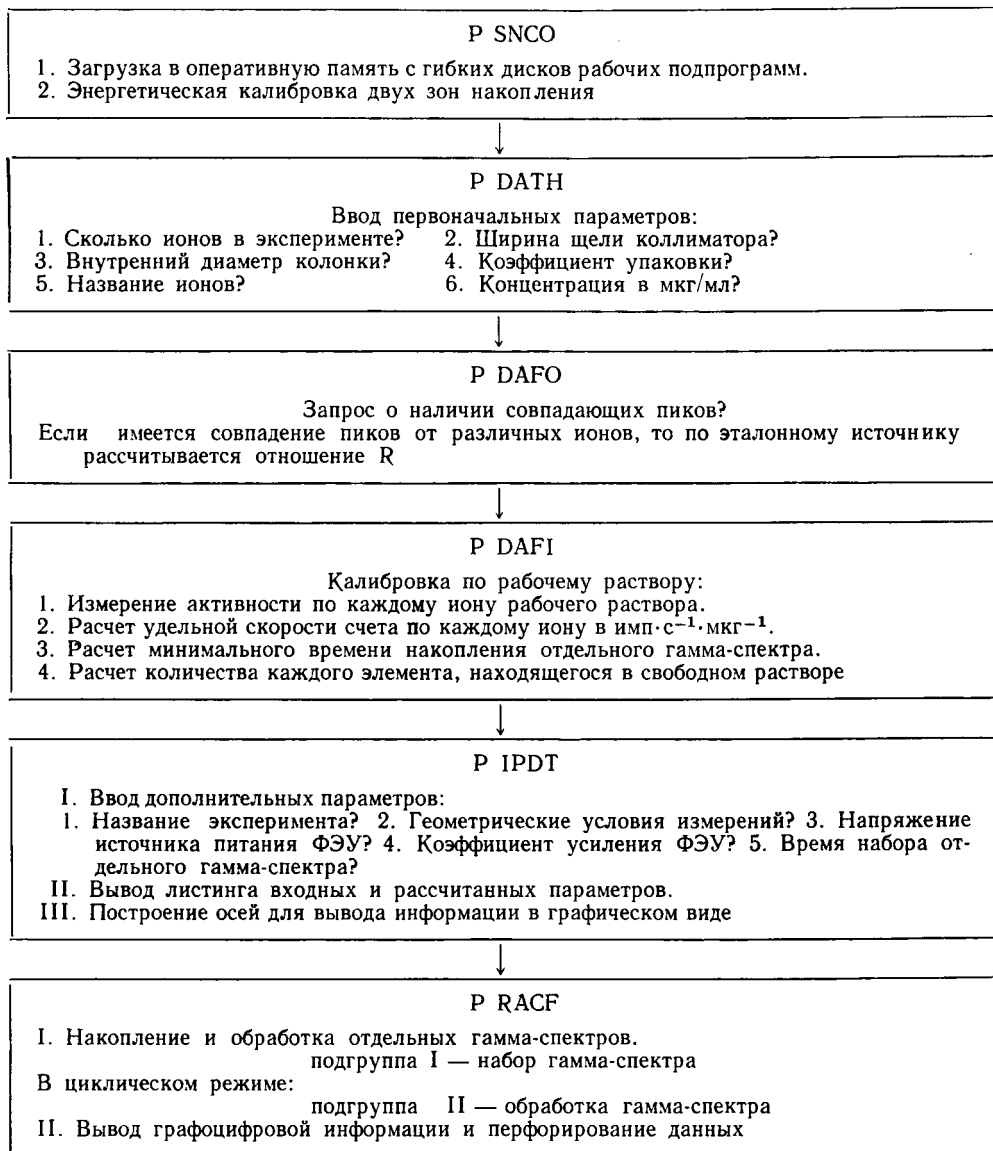
ние отрезков корней по объему колонки и исключить их самопроизвольное всплытие, в нее вводили два стеклянных шарика. Электрические сигналы, которые вырабатываются в результате взаимодействия гамма-фотонов, излучаемых радионуклидами, с веществом детектора, усиливались спектрометрическим усилителем ORTEC-471 и подавались далее на амплитудно-цифровой преобразователь СТ-101, осуществляющий преобразование амплитуды входного сигнала в цифровой код. Информация об амплитудных распределениях сигналов накапливалась в памяти анализатора IN-90 (рис. 1). Мини-ЭВМ MULTI-4, сопряженная с анализатором IN-90, использовалась для управления работой измерительного комплекса и обработки экспериментальной информации с последующим выводом полученных данных.

Ниже представлена укрупненная структурная схема разработанного нами программного обеспечения комплекса. Перед началом эксперимента определяют удельную абсолютную активность рабочего раствора (в мкКюри/мл) для каждого меченого иона. Затем при помощи программы SNCO осуществляют загрузку в оперативную память мини-ЭВМ всех необходимых программ и проводят энергетическую калибровку двух зон накопления (по 256 каналов в каждой). Такая калибровка необходима для обработки рабочих гамма-спектров по стандартным программам-функциям, входящим в состав математического обеспечения мини-ЭВМ.

Далее управление передается программе DATH, предназначенной для проведения диалога между экспериментатором и мини-ЭВМ. Данные, вводимые по программе DATH, требуются для расчетов в программе DAFI.

Программа DAFO начинается с запроса о наличии совпадающих пиков полного поглощения на гамма-спектре по энергиям для различных изотопов. Если, например, в рабочем растворе присутствуют меченые ионы Sr и Na, то, как видно из рис. 1, пики полного поглощения  $^{85}\text{Sr}$  с  $E_\gamma=514$  кэВ и  $^{22}\text{Na}$  с  $E_\gamma=511$  кэВ совпадают из-за недостаточного энергетического разрешения сцинтилляционного детектора. Поэтому для того, чтобы учесть вклад импульсов от Na в пик Sr, необходимо предварительно рассчитать коэффициент R (рис. 1, в), являющийся отношением числа зарегистрированных импульсов в пике с  $E_\gamma=511$  кэВ к числу импульсов пика с  $E_\gamma=1275$  кэВ. В данном случае программа DAFO выдает сообщение о необходимости размещения и измерения источника только с раствором  $^{22}\text{Na}$ . Этот источник измеряется в тех же самых геометрических условиях, что и рабочая колонка с растительным материалом. На основании зарегистрированного гамма-спектра рассчитывается отношение R и далее следует переход к программе DAFI.

При помощи программы DAFI осуществляется эталонирование измерительного тракта, для чего проводится накопление гамма-спектра от источника только с рабочим раствором в геометрических условиях, аналогичных при измерениях активности в рабочей колонке с растительным материалом). С учетом зарегистрированной скорости счета и известной концентрации меченого иона в рабочем растворе определяется удельная скорость счета (в  $\text{имп}\cdot\text{с}^{-1}\cdot\text{мкг}^{-1}$ ).



Также на основании известного «коэффициента упаковки» рассчитывается количество каждого элемента в объеме свободного раствора напротив щели коллиматора. В момент начала обработки набранного спектра включается специальный таймер мини-ЭВМ, который фиксирует время, затраченное на получение результатов вплоть до графоцифрового вывода и перфорирования данных единичного измерения. В зависимости от числа гамма-линий, присутствующих в спектре, время обработки отдельного цикла измерений колеблется от 60 до 100 с. Поэтому время набора рабочего спектра выбиралось равным 150 с.

Программа IPDT завершает подготовительный этап к проведению отдельной повторности. Сначала по программе IPDT в виде диалога осуществляется ввод дополнительных параметров, характеризующих особенности эксперимента, связанные с аппаратурой. Затем идет распечатка листин-

га входных и рассчитанных параметров с построением осей для последующего вывода отдельных измерений в графическом виде.

Программа RACF, последняя из этого пакета, предназначена для непосредственного проведения циклических накоплений и обработки отдельных гамма-спектров в режиме «пинг-понг». При указанном режиме после набора гамма-спектра за заданное время, например в подгруппе 2, автоматически начинается накопление спектра в подгруппе 1. За время накопления спектра в подгруппе 1 программа RACF на основе специальных функций математического обеспечения анализатора IN-90 осуществляет обработку ранее набранного аппаратурного спектра. Последовательность обработки следующая: сначала проводится поиск пиков, т. е. анализ амплитудной гистограммы, чтобы разделить

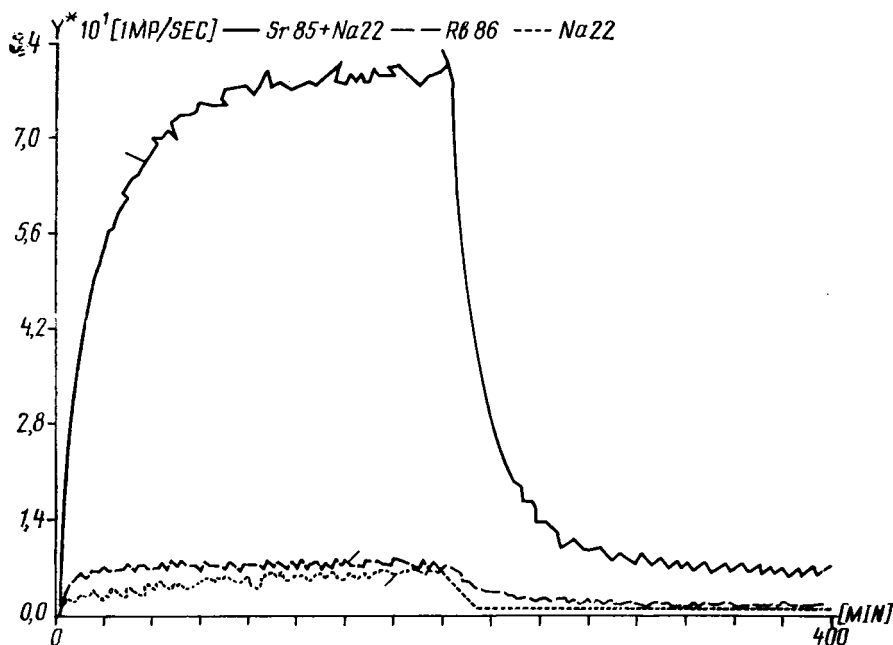


Рис. 3. Графический листинг экспериментальных кривых динамики совместного накопления и вымывания меченых ионов  $^{85}\text{Sr}^{2+}$ ,  $^{86}\text{Rb}^{+}$  и  $^{22}\text{Na}^{+}$  в отделенных корнях кукурузы.

ее на основе ряда статистических тестов [10, 11] на стационарные (комптоновское распределение и фон) и нестационарные (пики полного поглощения) зоны. Затем последовательно, начиная с последней нестационарной зоны, определяется площадь под каждым пиком с вычитанием фонового и комптоновского распределений, над которыми располагается пик полного поглощения (рис. 1). Такая последовательность обработки пиков выбрана для того, чтобы при помощи коэффициента R (рис. 1, в) учесть вклад  $^{22}\text{Na}$  в пик полного поглощения  $^{85}\text{Sr}$ , если проводится их совместное измерение. После анализа и расчета всех нестационарных зон подгруппы 2 информация отдельного измерения гамма-спектра выводилась в цифровом и графическом виде на поле терминального устройства с перфорированием данных для хранения и дальнейшей обработки. По окончании перечисленных выше операций компьютер переходит в ждущий режим до истечения заданного времени накопления в подгруппе 1. Далее режим работы в подгруппах взаимозаменяется, т. е. в подгруппе 1 осуществляются обработки

спектра, а в подгруппе 2 — накопление следующего спектра и т. д.

На рис. 3 представлен листинг отдельной повторности экспериментальных данных о динамике совместного накопления и вымывания трех типов  $^{85}\text{Sr}^{2+}$ ,  $^{86}\text{Rb}^{+}$  и  $^{22}\text{Na}^{+}$ . Как правило, повторность измерений для каждой комбинации ионов в процессе проведения экспериментальной работы 3—4-кратная.

Программы управления экспериментом и обработки данных были написаны на языке ЛЕМ-II (модификация языка БЭИСИК), который облегчает построение диалоговых элементов программ. В разработанные программы вводили специальные функции аппаратурного и математического обеспечения мини-ЭВМ, позволяющие выполнить необходимые операции, связанные с гамма-спектрометрическим анализом [8].

Авторы считают своим долгом выразить благодарность Ю. Я. Мазелю за ряд полезных советов при постановке экспериментальной (биологической) части данной работы.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Барабанщиков М. Н., Мазель Ю. Я., Шкарин Б. И. Применение компармент-анализа для определения потоков ионов кальция в клетках корня кукурузы. — Изв. ТСХА, 1979, вып. 1, с. 10—16. — 2. Вартанов Н. А., Самойлов П. С. Прикладная сцинтилляционная гамма-спектрометрия. Изд. 2-е, доп. М.: Атомиздат, 1975. — 3. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Талдыкин С. А. и др. Абиогенная миграция токсикантов в подзолистых и дерново-подзолистых почвах есте-

ственного сложения. Итоги 1978. Ч. I. Депонировано во ВНИИЦ, Б 748 457, 5 апреля 1979 г. — 4. Рачинский В. В., Фокин А. Д., Талдыкин С. А. и др. Биогенная трансформация и перенос токсических металлов в почвах. Итоги 1978 г. Ч. II. Депонировано во ВНИИЦ, Б 748 456, 5 апреля 1979 г. — 5. Шкарин Б. И., Фурман А. О. Автоматическая установка для регистрации гамма-излучения смеси радионуклидов в динамическом режиме на базе сцинтилляционного спектрометра. — Изв.

ТСХА, 1977, вып. 5, с. 188—195.— 6. Ban-  
ge G.—Physiol. Plant., 1979, vol. 46,  
p. 179—183.— 7. Cheeseman J. M.—J.  
Membrane Biol., 1982, vol. 70, p. 157—164.—  
8. IN-90.—Notice technique. 1 ed. Inter-  
technique, Sept., 1976.— 9. Lough-  
man B. C., Roberts S. C., Goodwin-Bai-  
ley C. I.—Plant a. Soil., 1983, vol. 72,  
N 2—3, p. 245—259.— 10. Philip-  
pot J. C.—IEEE Transactions on Nuclear  
Sci, 1970, vol. NS-17, N 7.— 11. Philip-  
pot J. C.—International conference on low  
radioactivity measurements and applications.  
Tatranska Lomnica, Thecoslovaquia, Oct.  
6—10, 1975.

*Статья поступила 11 апреля 1984 г.*

#### SUMMARY

Methods of registering dynamic processes of the change in partial activities of a mixture of gamma-radiating radionuclides have been suggested. Measurements have been taken with the help of scintillating gamma-spectrometre based on a programmable amplitude analyser with a built-in computer. As an example, the article considers joint accumulation and emission of labelled ions  $^{85}\text{Sr}^{2+}$ ,  $^{86}\text{Rb}^+$  and  $^{22}\text{Na}^+$  by separated roots of corn. Technical and instructional provisions for automatized measuring complex for data registration regime have been worked out. A structural scheme of the measuring complex and experimental results are presented in graphical form. Instructions for experiment management and data processing have been written in the language LEM-II (modification of the BASIK language).