

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ СООБЩЕНИЯ

УДК 543.5:546.17

УЧЕТ МЕШАЮЩЕГО ВЛИЯНИЯ КОНКУРИРУЮЩЕЙ РЕАКЦИИ В НЕЙТРОННО-АКТИВАЦИОННОМ АНАЛИЗЕ

Мухаммедов С., Хушвактов Ж., Барсукова Е.Г., Холбутаев Ш. (ИЯФ АН РУз, г. Ташкент, Узбекистан)

В активационном анализе встречаются случаи, когда один и тот же радионуклид образуется как от определяемых, так и мешающих элементов [1]. Например, такие случаи имеются в активационном анализе с применением быстрых нейтронов энергией 14 МэВ, так как по ядерным реакциям (n, p) , $(n, 2n)$ и (n, α) , иногда и по реакции радиационного захвата (n, γ) на различных изотопах элементов образуется множество радионуклидов [2]. В настоящей работе предложен метод оценки доли активности радионуклида, образующегося от мешающего элемента, в суммарной активности аналитического радионуклида, основанный на применении понятия «изотопное отношение». При этом предполагается, что на мешающем элементе идут, по крайней мере, две реакции с образованием аналитического и другого радионуклида. Метод проверен на примере одновременного определения фосфора и кремния методом активационного анализа на быстрых нейтронах.

Массу определяемого элемента m в облучаемом материале рассчитывают по измеренной активности

$$A = 6,023 \cdot 10^{23} m \theta M^{-1} \sigma \Phi k F,$$

где θ — природная распространенность изотопа; M — молекулярная масса изотопа; σ — сечение реакции; Φ — поток нейтронов; k — доля регистрируемого излучения в распаде; $F = [(1 - \exp(-\lambda t_{\text{обл}})) \times \exp(-\lambda t_{\text{охл}})] [1 - \exp(-\lambda t_{\text{изм}})]$ — временной фактор; λ — постоянная распада; $t_{\text{обл}}$, $t_{\text{охл}}$, $t_{\text{изм}}$ — продолжительность облучения, остывания облученного материала и измерения радиоактивности соответственно. Очевидно, что при наличии мешающей реакции наведенная активность A представляет собой сумму долей определяемого A_o и мешающего элемента A_m и ее находят по числу зарегистрированных импульсов I (или площади фотопика):

$$A = A_o + A_m = I/\omega \varepsilon,$$

где ω — эффективность регистрации γ -излучения; ε — геометрический фактор измерения радиоактивности, индексы относятся к определяемому (о), мешающему (м) элементам и аналитическому радионуклиду (а) соответственно. Очевидно, что

$$A_o/A_m = I_o/I_m = m_o \theta_o M_o^{-1} \sigma_o / m_m \theta_m M_m^{-1} \sigma_m \text{ или} \quad (1)$$
$$I_o = I_m (m_o \theta_o M_o^{-1} \sigma_o) / (m_m \theta_m M_m^{-1} \sigma_m) = \Omega m_o m_m I_m,$$

где Ω — постоянный коэффициент, зависящий от ядерно-физических характеристик химических элементов и ядерных реакций.

Если на природном изотопе мешающего элемента распространенностью θ_m^* и массовым числом M_m^* образуется другой радионуклид с постоянной распада λ_m^* , его можно использовать для оценки мешающего влияния на определение содержания искомого элемента. В таком случае, поскольку геометрический фактор измерения остается одинаковым для обоих радионуклидов, отношение их наведенной активности $A_m/A_m^* = I_m \omega_2 / I_m^* \omega_1$. Здесь индексы 1 и 2 относятся к аналитическому и мешающему радионуклиду соответственно.

Подобно выражению (1) эту формулу можно переписать в виде

$$I_m/I_m^* = \omega_1 \theta_m M_m^* \sigma_m k F_a / \omega_m^* \theta_m^* M_m^* \sigma_m^* k_m^* F_m^* = \quad (2)$$
$$= \Psi (\omega_1 F_a / \omega_m^* F_m^*).$$

Здесь $\Psi = \theta_m M_m^* \sigma_m k / \theta_m^* M_m^* \sigma_m^* k_m^*$ — постоянный коэффициент, зависящий от ядерно-физических характеристик изотопов мешающего элемента и образующихся радионуклидов.

Используя выражения (1), (2), получаем $I_o = I - I_m = I_m^* \Psi \Omega (\omega_1 m_o F_a / \omega_m^* m_m F_m^*)$.

Применение этой формулы требует проводить сложные вычисления. Поэтому предложено упростить анализ путем предварительного экспериментального определения I_m/I_m^* для фиксированных значений $t_{\text{обл}}$, $t_{\text{охл}}$, $t_{\text{изм}}$. Для этого необходимо облучить некоторое количество мешающего элемента и измерить наведенную активность образца. Для таких условий (с) формулу (2) перепишем как $(I_m/I_m^*)_c = \Psi (\omega_1 F_a / \omega_m^* F_m^*)_c$. В таком случае

$$I_m/I_m^* = (I_m/I_m^*)_c [(F_a/F_m^*)/(F_a/F_m^*)_c] \text{ или } I_m = (I_m/I_m^*)_c I_m^*.$$

Долю импульсов, соответствующих определяемому элементу, находим как $I_o = I - (I_m/I_m^*)_c I_m^*$.

Т а б л и ц а 1. Ядерно-физические характеристики реакций и образующихся радионуклидов

Изотоп	Доля изотопа, %	Ядерная реакция	Q , МэВ	σ , мб	$T_{1/2}$, мин	E_γ , кэВ	I_γ , %
^{28}Si	92,17	$^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$	-3,857	$244,4 \pm 24$	2,24	1778,8	100
^{29}Si	4,71	$^{29}\text{Si}(n, p)^{29}\text{Al}$		121 ± 5	6,56	1273,3	90,6
^{29}P	100	$^{31}\text{P}(n, \alpha)^{28}\text{Al}$	-1,94	125 ± 6	2,24	1778,8	100

Оценено применение предложенного метода для случая, когда ^{28}Al одновременно образуется на определяемом (Р) и мешающем (Si) химических элементах по ядерным реакциям на быстрых нейтронах, приведенным в табл. 1. На кремнии также образуется ^{29}Al , так как на его природном изотопе ^{29}Si (4,71%) идет реакция (n, p) . Этот канал реакции использовали для нахождения содержания кремния и оценки его влияния на определение содержания фосфора.

Описание техники эксперимента приведено в исследованиях [3, 4]. Три образца массой 22 г каждый упаковывали в полиэтиленовые контейнеры цилиндрической формы, к крышкам которых приклеивали тонкую алюминиевую фольгу, служащую монитором потока быстрых нейтронов. В качестве эталона или образца сравнения использовали некоторые фосфор- и кремнийсодержащие соединения. Образец и эталон облучали отдельно. Монитор облучали вместе с каждым образцом и эталоном. Источником нейтронов служил нейтронный генератор НГ-150, обеспечивающий выход нейтронов $\sim 5 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}$ энергией 14,1 МэВ. Активность образцов измеряли с помощью полупроводникового детектора. Фиксированные временные режимы составляли $t_{\text{обл}} = 5 \text{ мин}$, $t_{\text{охл}} = 5 \text{ мин}$, $t_{\text{изм}} = 100 \text{ с}$.

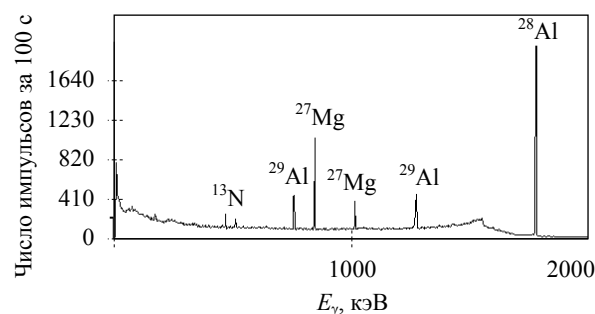
Образцы монокристаллического кремния и кварца облучали при двух значениях потока быстрых нейтронов. По результатам измерения радиоактивности образцов оценили отношение площади фотопиков (или числа зарегистрированных импульсов) γ -квантов ^{28}Al и ^{29}Al (табл. 2). Для приведенных временных условий эксперимента его среднее значение составило 14, которое в дальнейшем использовали для учета влияния кремния при определении содержания фосфора.

Для оценки возможности определения фосфора и кремния в некоторых сельскохозяйственных материалах — почве, гумусе, гречихе и фасоли образцы анализировали при упомянутых фиксированных временных режимах. Содержание искомых элементов определяли сопоставлением радиоактивности проб и образцов сравнения. На рисунке приведен энергетический спектр активированного образца почвы, который содержал фотопики ^{13}N , ^{28}Al , ^{29}Al и ^{27}Mg . В табл. 2 приведены результаты измерения активности некоторых исследованных образцов.

Содержание фосфора определяли сопоставлением активности пробы и образца сравнения — Na_2HPO_4 , кремния — относительно SiO_2 (табл. 3).

Т а б л и ц а 2. Результаты измерения наведенной активности образцов

Образец	^{29}Si $E_\gamma = 1273,3 \text{ кэВ}$	^{28}Si $E_\gamma = 1778,8 \text{ кэВ}$			I/I_{M^*}
	I_{M^*}	I	I_{M}	I_0	
Si (монокристалл)	1508	21 484	21 484	—	14,2
	5606	76 540	76 540	—	13,7
Кварц	537	7183	7183	—	13,4
	8199	126 021	126 021	—	14,4
Стандарт почвы СП-3	2193	71 660	30 702	40 958	32,7
Гумус	152	5957	2128	3829	39,2
Гречиха	—	655	—	655	—
Фасоль	—	522	—	533	—

Энергетический спектр γ -квантов облученного образца стандарта почвы СП-2

Среднеарифметическое содержание фосфора имеет отклонение, не превышающее 10%. В стандарте почвы СП-3 концентрация фосфора была в 18 раз больше, чем в гумусе. Фасоль и гречиха богаты фосфором. Содержание фосфора в биологическом гумусе и зернах оказалось примерно в 18 и 15 раз меньше, чем в стандарте почвы.

Таким образом, разработанным методом учета

Т а б л и ц а 3. Результаты анализа исследованных образцов

Образец	C_P , %	C_{Si} , %
Стандарт почвы	$8,5 \pm 0,8$	$3,9 \pm 0,3$
Гумус	$0,2 \pm 0,1$	$3,1 \pm 0,2$
Фасоль	$0,5 \pm 0,04$	—
Гречиха	$0,6 \pm 0,06$	—

влияния конкурирующей реакции в нейтронном активационном анализе можно одновременно определять содержание основного и мешающего элементов. Метод испытан на примере определения кремния и фосфора в некоторых сельскохозяйственных материалах по ядерным реакциям $^{28}\text{Si}(n, p)^{28}\text{Al}$, $^{29}\text{Si}(n, p)^{29}\text{Al}$, $^{31}\text{P}(n, \alpha)^{28}\text{Al}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Муминов В.А., Мухаммедов С. Ядерно-физические методы анализа газов в конденсированных средах. Ташкент: Фан, 1980. 209 с.

2. Муминов В.А., Навалихин Л.В. Активационный анализ с использованием нейтронного генератора. Ташкент: Фан, 1979. 152 с.
3. Мухаммедов С., Хайдаров А., Барсукова Е.Г. Определение белка в зернопродуктах методом активационного анализа с применением нейтронного генератора. — Атомная энергия, 2009, т. 106, вып. 3, с. 169—173.
4. Mukhammedov S., Khaydarov A., Osinskaya N.S., Barsukova E.G. Fast neutron activation analysis of protein in wheat. — Uzbek J. Phys., 2009, v. 11, № 1, p. 79—83.

Поступило в Редакцию 13.01.10

Р е ф е р а т ы с т а т е й

Окончание. Начало см. на с. 56

УДК 621.039.73

В а р л а к о в А.П. **Разработка унифицированного технологического процесса цементирования жидких радиоактивных отходов.** — Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 1, с. 14—19.

Рассматривается возможность цементирования жидких отходов различного состава унифицированным методом. Изучены методы цементирования в целях выявления сходства параметров приготовления цементного раствора при условии надежного (безаварийного) проведения технологического процесса. Определена возможность использования единого состава цементной композиции, вида оборудования, которые обеспечивают максимальное включение различных отходов в конечный продукт, отвечающий регламентированным требованиям. Рис. 1, табл. 2, список лит. 11 назв.

УДК 539.125.5+546.27:615.771.7

А р з у м а н о в С.С., Б о н д а р е н к о Л.Н., З а г р я д с к и й В.А., М а р к о в с к и й Д.В., М о р о з о в В.И., С т р е п е т о в А.Н., Ч у в и л и н Д.Ю. **Нейтрон-захватная терапия ультрахолодными нейтронами.** — Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 1, с. 19—28.

В статье изложено состояние и обозначены проблемы нейтрон-захватной терапии злокачественных опухолей — поражение здоровых тканей при транспортировке нейтронов до места облучения и наличие в терапевтическом пучке фона γ -излучения и быстрых нейтронов.

Для решения этих проблем авторами предложено использовать ультрахолодные нейтроны энергией ниже 10^{-7} эВ, уникальной особенностью которых является способность испытывать полное отражение от поверхности конденсированного вещества при любом угле падения. Возможность их транспортировки по нейтроноводам была показана в многочисленных экспериментах.

На пучке ультрахолодных и очень холодных нейтронов ИР-8 измерено сечение неупругого рассеяния нейтронов на водородосодержащих веществах — воде, этиловом спирте и биологической ткани. В области температуры 200—300 К экспериментальные данные хорошо согласуются с расчетом, однако при дальнейшем понижении температуры возникает расхождение, которое связано, возможно, с неточностью модельных спектров колебаний водородосодержащих веществ, использовавшихся в расчетах.

Использование ультрахолодных нейтронов открывает новые возможности нейтрон-захватной терапии в части

лечения злокачественных опухолей, локализующихся в полостях организма или его органов. Рис. 7, табл. 1, список лит. 21 назв.

УДК 539.1.074.3

К о р о л е в С.А., Л а в р у х и н Ю.Е., Р у м я н ц е в О.В. **Метрологическое обеспечение спектрометрического канала АСКРО.** — Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 1, с. 29—34.

Метрологическое обеспечение мониторинга приземного слоя атмосферы с помощью гамма-спектрометров АСКРО требует определения их чувствительности в геометрии измерения техногенных радионуклидов. Рассмотрено применение численного моделирования, метода подбора радиационных полей и комбинированного метода при оценке чувствительности спектрометра. Показано, что модельный метод завышает чувствительность и не позволяет проводить поверку спектрометра. Для уменьшения погрешности оценок использована комбинация измерений эффективности спектрометра по точечному источнику и расчета падающего потока методом Монте-Карло. Дана оценка общей относительной погрешности определения чувствительности и показана возможность проведения ее поверки. Полученные оценки чувствительности увеличивают минимальную измеряемую объемную активность спектрометра в области энергии меньше 1 МэВ. Табл. 2, список лит. 8 назв.

УДК 543.5

М у р а д я н Г.В., В о с к а н я н М.А., Т е р е х и н В.А., Я с т р е б о в а Л.П., И в а н о в И.Н. **Анализ возможностей нейтронно-резонансного метода определения элементного состава вещества.** — Атомная энергия, 2010, т. 109, вып. 1, с. 34—38.

Проведено математическое моделирование нейтронно-резонансного метода элементного и изотопного состава вещества, основанного на исследовании γ -каскадов, испускаемых ядрами при резонансном захвате нейтронов. Смоделированы γ -каскады определяемого элемента (эффект) и элементов матрицы (фон), а также регистрация этих каскадов многосекционным 4π -детектором γ -квантов. Приведены функции отклика детектора для случая анализа содержания золота в природной среде. Показано, что введение наряду со спектрометрией нейтронов спектрометрии γ -каскадов позволяет в 100 раз увеличить отношение эффекта к фону. Отмечена возможность дальнейшего увеличения этого отношения путем усовершенствования мето-