

## Использование полиэтиленовых расходных материалов при проведении нейтронно- активационного анализа по короткоживущим радионуклидам

С.Г. Ленник\*, К.А. Бедельбекова,  
Е.К. Соколенко, Т.В. Суздальцева

Республиканское государственное  
предприятие «Институт ядерной физики»  
Министерства энергетики Республики  
Казахстан, г. Алматы, Казахстан  
\*E-mail: [lennik\\_s@inp.kz](mailto:lennik_s@inp.kz)

При проведении нейтронно-активационного анализа по короткоживущим радионуклидам на реакторе ВВР-К используется пневмотранспортная система (Austria) со специфическими транспортными капсулами. При проведении анализа облученные образцы не вынимаются из транспортных капсул и измеряются непосредственно в капсуле. Необходимо учесть тот факт, что наведенная активность материала самой капсулы выступает в качестве фонового излучения по отношению к наведенной активности изучаемого образца.

Выполнено исследование материала капсул и используемых полиэтиленовых трубочек, применяемых в качестве фиксаторов образца по центру транспортной капсулы. Ранее было установлено, что в составе материала капсулы HDPE T50 присутствуют примесные элементы Ti, Cl, Al, Na, Ca. Обнаружено, что материал фиксаторов содержит большое количество примесей, приводящее к возрастанию загрузки спектрометрического оборудования и увеличению относительного вклада фона отдельных радионуклидов в итоговый спектр. Проанализированы и обработаны спектры наведенной активности, рассчитано содержание элементов в полиэтилене и показано, что аналитические сигналы Mg-27, Mn-56 и Sb-122m, Cr-51 и Sb-122 относятся исключительно к наведенной активности материала трубок-фиксаторов. Данное обстоятельство не позволяет определять малые концентрации этих элементов в самих образцах. Показана необходимость поиска более чистого материала для использования его в качестве фиксаторов образца при размещении в транспортной капсуле.

**Ключевые слова:** нейтронно-активационный анализ; пневмотранспортная система; короткоживущие радионуклиды; полиэтилен.

## Use of polyethylene consumables in neutron activation analysis for short- lived radionuclides

S.G. Lennik\*, K.A. Bedelbekova,  
E.K. Sokolenko, T.V. Suzdaltseva

Republican State Enterprise "Institute of  
Nuclear Physics" Ministry of Energy of the  
Republic of Kazakhstan, Almaty, Kazakhstan  
\*E-mail: [lennik\\_s@inp.kz](mailto:lennik_s@inp.kz)

The neutron activation analysis for short-lived radionuclides at the WWR-K uses a pneumatic transport system (Austria) with specific transport capsules. The irradiated samples are not removed from the transport capsules and are measured directly in the capsule. It is necessary to take into account the fact that the induced activity of the capsule material itself acts as the background radiation in relation to the induced activity of the sample under study.

A study of the capsule material and the polyethylene tubes used as sample fixing devices in the center of the transport capsule was performed. Earlier it was found that the HDPE T50 capsule material contains impurity elements Ti, Cl, Al, Na, Ca. It was found that the fixing material contains a larger amount of impurities, which leads to the increase of spectrometric equipment loading and to the increase of relative contribution of individual radionuclides to the final spectrum. The induced activity spectra were analyzed and processed, the content of elements in polyethylene was calculated and it was shown that the analytical signals of Mg-27, Mn-56 and Sb-122m, Cr-51 and Sb-122 refer exclusively to the induced activity of the fixer-tube material. This circumstance does not allow to determine small concentrations of these elements in the samples themselves. The necessity of search of other more pure material for its use as sample fixers at placement in a transport capsule is shown.

**Keywords:** neutron activation analysis; pneumatic transport system; short-lived isotopes; polyethylene.

## Қысқа мерзімді радионуклидтер бойынша нейтронды белсендіру талдауын жүргізу кезінде полиэтиленді шығыс материалдарын пайдалану

С.Г. Ленник\*, К.А. Бедельбекова,  
Е.К. Соколенко, Т.В. Суздальцева

Республикалық мемлекеттік кәсіпорын  
«Ядролық физика институты» Қазақстан  
Республикасы Энергетика Министірлігі,  
Алматы қ., Қазақстан  
\*E-mail: [lennik\\_s@inp.kz](mailto:lennik_s@inp.kz)

ССР-Қ реакторында қысқа мерзімді радионуклидтерге нейтронды белсендіру талдауын жүргізу кезінде арнайы тасымалдау капсулалары бар пневматикалық тасымалдау жүйесі (Австралия) қолданылады. Талдау кезінде сәулеленген үлгілер тасымалдау капсулаларынан алынбайды және тікелей капсулада өлшенеді. Капсула материалының бағыталған активтілігі өзі зерттелетін үлгінің бағыталған активтілігіне қатысты фон сәулесі ретінде әрекет ететінін ескеру қажет.

Тасымалдау капсуласының ортасында үлгі ұстағыш ретінде пайдаланылатын полиэтилен түтіктердің және капсулалардың материалына зерттеу жүргізілді. Бұрын HDPE T50 капсула материалында Ti, Cl, Al, Na және Ca қоспалары бар екені анықталды. Бекіткіш материалда көп мөлшерде қоспалар бар екені анықталды, бұл спектрометриялық аппаратураның жүктемесінің артуына және жеке радионуклидтер фонының салыстырмалы үлесінің артуына әкелетіні анықталды. Бағыталған активтілік спектрлері талданды және өңделді, полиэтилендегі элементтердің құрамы есептелді және Mg-27, Mn-56 және Sb-122m, Cr-51 және Sb-122 аналитикалық сигналдары тек түтіктерге қатысты екендігі көрсетілді. Бұл жағдай үлгілердің құрамында осы элементтердің төмен концентрациясын анықтауға мүмкіндік бермейді. Тасымалдау капсуласына салғанда үлгіні бекітуші ретінде қолдану үшін басқа таза материалды іздеу қажет екені көрсетілді.

**Түйін сөздер:** нейтронды активтендіру анализі; пневматикалық тасымалдау жүйесі; қысқа мерзімді радионуклидтер; полиэтилен.



Article (Статья)

## Использование полиэтиленовых расходных материалов при проведении нейтронно-активационного анализа по короткоживущим радионуклидам

С.Г. Ленник\* , К.А. Бедельбекова , Е.К. Соколенко , Т.В. Суздальцева 

Республиканское государственное предприятие «Институт ядерной физики» Министерства энергетики РК, ул. Ибрагимова 1, 050032 Алматы, Казахстан

\*E-mail: [lennik\\_s@inp.kz](mailto:lennik_s@inp.kz)

### 1. Введение

В ИЯФ с 60-х годов прошлого столетия проводятся исследования методом нейтронно-активационного анализа (НАА) [1]. Источником нейтронов выступает атомный реактор ВВР-К. В авторитетной базе исследовательских реакторов МАГАТЭ (содержащей информацию об исследовательских реакторах в мире) ВВК-К зарегистрирован под номером KZ0004 [2]. В техническом документе МАГАТЭ (TECDOC) 1215 указано, что на ВВР-К предусмотрено проведение исследований методом НАА [3]. Этот метод успешно применяется для решения задач Республики Казахстан в областях геологии, экологии, археологии, криминалистики, медицины, биологии, сельского хозяйства [4-7]. Во всем мире НАА остается одним из наиболее передовых аналитических методов как для проведения научных исследований, так и в прикладных целях [8-12].

В сухом горизонтальном канале ВВР-К (плотность потока тепловых нейтронов составляет  $10^{11}$  нсм<sup>-2</sup>·с<sup>-1</sup>) установлена новая пневмотранспортная система (ПТС) для проведения исследований по короткоживущим радионуклидам (НАА КЖР) [13]. Метод позволяет определять концентрации Na, K, Al, Mn, Cl, Ca, V, Ti, Mg, Cu, Dy, S, In и некоторых других элементов. Отметим, что при активации нейтронами часть указанных элементов не имеет долгоживущих радионуклидов и определяется исключительно методом НАА КЖР.

При проведении анализа элементного состава образцов в условиях ПТС важной задачей является корректный учет фонового излучения от применяемых

полиэтиленовых расходных материалов (транспортной капсулы, трубок-фиксаторов). Этой проблеме посвящена предложенная статья. Были выполнены исследования облученных расходных материалов методом НАА по КЖИ, анализ наблюдаемых спектров в режимах с интервалами «остывания» 5 мин, 2 ч и 1 сутки, проведены количественные расчеты активностей и анализ результатов.

### 2. Эксперимент

ПТС включает в себя ГУК – главный управляющий кабинет, компрессор, ресиверы, оптические датчики, предназначенные для контроля пролета капсулы, измерительную камеру, гибкие шланги, ведущие от ГУК к облучательной и измерительной камерам, горизонтальный гамма-спектрометр, специальное программное обеспечение [13-14]. На рисунке 1 приведена фотография рабочего участка для проведения НАА по КЖР и внешний вид ГУК. Необходимое давление воздуха в системе достигается посредством компрессора, подключенного к воздушной системе ПТС. Установленный в ГУК ресивер необходим для транспортировки капсулы в горизонтальный канал реактора. В камере из специального сплава облучается капсула с исследуемым образцом. В непосредственной близости от канала реактора расположен второй ресивер, также подключенный к воздушной системе ПТС и обеспечивает подачу сжатого воздуха в трубопровод для извлечения транспортной капсулы после окончания облучения в ГУК. Управление ПТС осуществляется специальной программой, возможности которой позволяют указать требуемое время облучения,

Received 28 Feb 2023; Received in revised form 29 Mar 2023; Accepted 30 Mar 2023; Available online 31 Mar 2023.

© 2023 The Authors

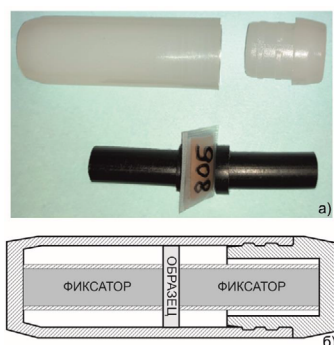
This is an open access article under the CC BY-NC-ND 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).



**Рисунок 1** – Проведение НАА по КЖР на пневмотранспортной системе

«остывания» и измерения  $\gamma$ -излучения наведенной активности образца. В ПТС интегрирован горизонтальный гамма-спектрометр с полупроводниковым детектором «CANBERRA» GC2018 с относительной эффективностью регистрации  $\gamma$ -излучения 24%.

Исследуемый образец помещается в транспортную капсулу, в которой происходит облучение и регистрация  $\gamma$ -излучения наведенной активности. На рисунке 2 приведены фотография (а) и чертеж (б) транспортной капсулы с фиксаторами.



Примечание: а – внешний вид, б – схема размещения образца внутри капсулы

**Рисунок 2** – Транспортная капсула для ПТС

Капсулы изготовлены из полиэтилена высокой плотности низкого давления HDPE. Герметичность транспортной капсулы обеспечивается за счет выступов пазов, которые не позволяют открыть крышку капсулы без механических повреждений. По этой причине капсулы не пригодны для повторного использования и представляют собой расходный материал.

В комплект поставки расходных материалов, полученных при наладке ПТС, входило определенное количество капсул (пр-во компании Posthumus, Нидерланды). Со временем, по мере проведения НАА, запас исходных капсул истощился. Решение задачи пополнения расходного материала для ПТС было найдено путем самостоятельного производства [15]. По индивидуальному заказу изготовлена специальная пресс-форма для литья капсулы и крышки (согласно чертежу на рисунке 2б). Подходящий и территориально ближайший пресс заливного типа находится на заводе пластиковых изделий ТОО «Alpha Plast» п. Байтерек, Енбекшиказахского района Алматинской области. Из марки полиэтилена высокой плотности HDPE T50 (плотность 0,951-0,955 г/см<sup>3</sup>, производство Туркменистан) была отлита партия транспортных капсул, ныне применяемых при проведении НАА по КЖР. В статье [15] приведена аргументация в пользу выбора данного материала для отливки капсул. Поскольку НАА по КЖР предусматривает, что облученные образцы не вынимаются из транспортных капсул и измеряются непосредственно в капсуле, то необходимо учесть наведенную активность материала самой капсулы. В случае малых образцов, помимо транспортной капсулы нужно учитывать фон от трубочек-фиксаторов. Они представляют собой две полые полиэтиленовые трубочки одинаковой длины диаметром 8 мм и предназначены для фиксации образца строго посередине капсулы. Внешний вид и схематическое изображение образца и фиксаторов внутри капсулы показаны на рисунке 2. Применение фиксаторов крайне необходимо в случае исследования образцов небольших геометрических размеров. Длина транспортной капсулы составляет 5 см. В отсутствие фиксаторов образец будет произвольно перемещаться внутри транспортной капсулы при ее ускоренном движении по системе ПТС, что приводит к неопределенности в процессе определения геометрии при облучении и измерении наведенной активности образца. Масса пустой транспортной капсулы с крышкой составляет 4,21 г, масса двух трубочек-фиксаторов составляет 1,22 г.

При проведении НАА по КЖР, сразу, без переупаковки, выполняется регистрация спектра наведенной активности. При этом излучение наведенной активности материалов транспортной капсулы и фиксаторов относительно навески исследуемого образца является фоновым излучением. Несомненно, что при обработке спектров необходимо проводить учет вклада фонового излучения. Кроме того, при исследовании образцов со слабоактивируемой матрицей, либо с малыми концентрациями определяемых

элементов, вклад фона может стать серьезной помехой. При времени «остывания» более 30 мин, предпочтительно переупаковать образец – извлечь из транспортной капсулы, переложить в дополнительный чистый полиэтиленовый пакетик и затем проводить измерение на спектрометре. Для малых времен остывания переупаковка недоступна, поэтому важно уменьшить влияние фона подбором чистых расходных материалов.

Элементный состав расходных материалов (капсул и фиксаторов) был исследован методом НАА по КЖР: на ПТС проведено облучение и исследованы спектры наведенной активности на гамма-спектрометрах. Отдельно проводилось облучение пустых транспортных капсул и капсул, внутри которых были размещены трубки-фиксаторы. Облучение проводилось в течение 5 мин. Сразу после активации капсулы поступали в измерительную

камеру, расположенную на расстоянии 20 см от окна гамма-детектора ПТС и регистрировались серии из двух спектров для  $T_{\text{ост}}$  (время «остывания», прошедшее после активации капсулы) 0 и 300 с. Время набора спектра  $T_{\text{изм}}$  при этом составляло 300 и 600 с, соответственно. Данный режим измерений позволяет определить радионуклиды с периодом полураспада  $T_{1/2}$  в несколько минут.

### 3. Результаты и обсуждение

На рисунках 3-5 в полулогарифмическом масштабе приведены спектры облученной капсулы с фиксаторами внутри. По вертикали на логарифмической шкале отложено количество зарегистрированных гамма-импульсов (N), по горизонтали – энергия гамма-излучения в кэВ.

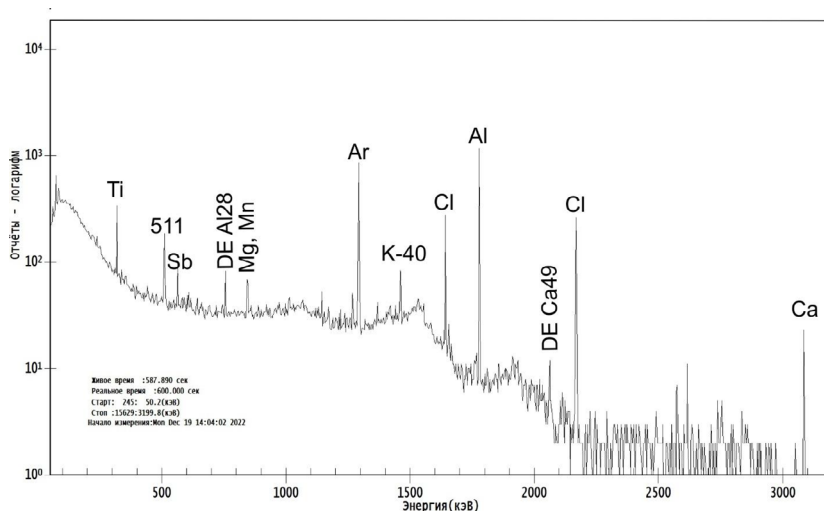


Рисунок 3 – Спектр капсулы с фиксаторами и пустым пакетиком. Время «остывания» 300 с

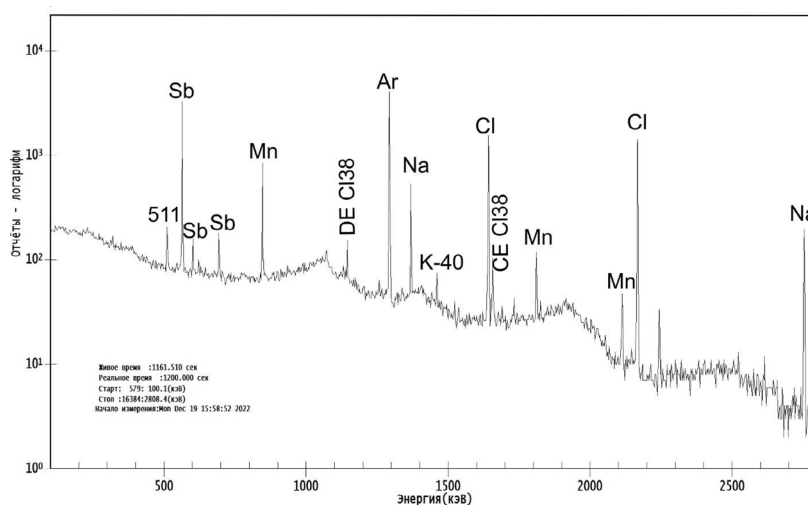


Рисунок 4 – Спектр капсулы с фиксаторами и пустым пакетиком. Время «остывания» 2 ч

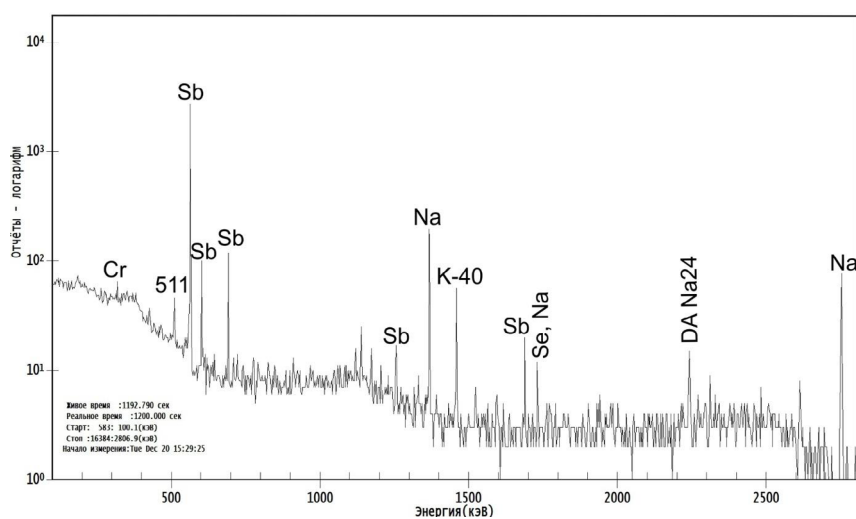


Рисунок 5 – Спектр капсулы с фиксаторами и пустым пакетиком. Время «остывания» 24 ч

В спектре обнаружены аналитические сигналы радионуклидов Mg-27 ( $E_V=843,8$  кэВ)  $T_{1/2}=9,5$  м, Al-28 ( $E_V=1273,3$  кэВ)  $T_{1/2}=2,2$  м, Cl-38 ( $E_V=1642,7$  кэВ и  $1293,6$  кэВ)  $T_{1/2}=37$  м, Ca-49 ( $E_V=3084,4$  кэВ)  $T_{1/2}=8,7$  м, Ti-51 ( $E_V=320,1$  кэВ)  $T_{1/2}=5,8$  м, Mn-56 ( $E_V=846,8$  кэВ)  $T_{1/2}=2,58$  ч и Sb-122m ( $E_V=61,4$  кэВ)  $T_{1/2}=4,2$  м. Присутствие в спектре пика Ar-41 вызвано излучением активированного воздуха, находящегося внутри капсулы. Гамма-излучение радионуклида Al-28 объясняется двумя факторами: как внешним загрязнением капсулы вследствие ее трения об алюминиевые трубки облучательной камеры ПТС при пролете по трубопроводу к месту облучения и обратно, так и наличием Al в самом материале.

Представленные на рисунках 4-5 спектры были зарегистрированы спустя 2 ч и 1 сутки после облучения на гамма-спектрометре с вертикальным полупро-водниковым детектором «Ortec» GEM40P4-83, с относительной эффективностью регистрации  $\gamma$ -излучения 43%. Следует отметить, что для этого детектора был специально изготовлен ряд подставок из оргстекла, позволяющий установить транспортную капсулу вертикально на заданной высоте от детектора. В данном случае, геометрия измерения составила 2,5 см, время измерения спектров – 20 мин (по реальному времени). Регистрация спектра через 2 ч после облучения выполнена для определения Cl-38, Mn-56 и других радионуклидов с  $T_{1/2}$  от 0,5 до несколько часов. Регистрация спектра через сутки после облучения выполнена для определения радионуклидов с  $T_{1/2}$  более 3 ч.

В спектре с  $T_{\text{ост}} 2$  ч наблюдаются аналитические сигналы радионуклидов Cl-38, Mn-56 и Na-24 ( $E_V=1368,6$  кэВ и  $2754,0$  кэВ) с периодом полураспада  $T_{1/2}=158$  ч. В спектре с  $T_{\text{ост}} 24$  ч (рисунок 5) обнаружены аналитические сигналы радионуклидов Na-24, Cr-51 ( $E_V=320,1$  кэВ)  $T_{1/2}=27,7$  суток, Sb-122 ( $E_V=564,2$  кэВ,  $692,7$  кэВ и  $1256,9$  кэВ)  $T_{1/2}=2,7$  суток.

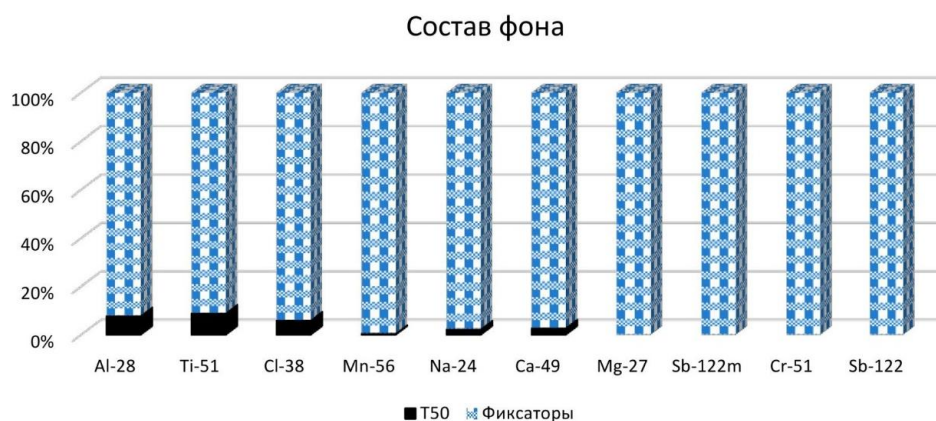
В спектрах присутствуют пики двойной и одиночной утечки (полное поглощение, за исключением двух или одного аннигиляционного фотона с энергией 511 кэВ): это энергии 757 кэВ, 1146 кэВ, 1268 кэВ, 1732 кэВ, 2244 кэВ – так называемые пики одиночного вылета (SE – single escape peak) и двойного вылета (DE – double escape peak) радионуклидов Al-28, Cl-38, Na-24.

Обработка спектров выполнена с использованием пакета программного обеспечения Genie-2000. Определены активности активируемых радионуклидов в транспортной капсуле HDPE T50 и в используемых трубках-фиксаторах. Результаты значений абсолютных активностей в Гбк ( $10^9$  Бк) на момент окончания активации приведены в таблице 1. Активности Mg-27, Al-28, Ca-49, Ti-51, Sb-122m определены по спектру с  $T_{\text{ост}} 5$  минут (рисунок 3). Активности Cl-38 и Mn-56 определены по спектру с  $T_{\text{ост}} 2$  ч (рисунок 4). Активности Na-24, Cr-51 и Sb-1225 определены по спектру с  $T_{\text{ост}} 24$  ч (рисунок 5).

На рисунке 6 в виде объемной гистограммы показан относительный вклад радионуклидов, обнаруженных после активации в составе самой капсулы (часть столбца, обозначенная черной сплошной заливкой) и трубок-фиксаторов (часть столбца, обозначенная узорчатой голубой заливкой).

Таким образом, как и ранее было установлено в статье [15], в составе материала капсулы HDPE T50 присутствуют примесные элементы Ti, Cl, Al, Na, Ca. Сравнивая спектр капсулы с фиксаторами внутри со спектром пустой транспортной капсулы, определили, что аналитические сигналы Mg-27, Mn-56 и Sb-122m (время «остывания» составляет 5 мин), Cr-51 и Sb-122 (время «остывания» составляет 2 ч и 1 сутки) относятся исключительно к наведенной активности материала трубок-фиксаторов.





**Рисунок 6** – Относительные вклады в состав фонового излучения отдельных материалов

**Таблица 1** – Активности радионуклидов в облученных материалах, ГБк ( $10^9$  Бк)

Радионуклид	T50	T50 с фиксаторами	Фиксаторы
Mg-27	–	8,23±0,70	8,23±0,70
Al-28	104±7	1354±78	1251±70
Ca-49	0,33±0,11	12,2±4,1	12,2±4,1
Ti-51	1,00±0,33	11,43±0,44	10,43±0,56
Sb-122m	–	14,1±1,8	14,10±2,37
Cl-38	50,3±1,9	855±11	803±15
Mn-56	0,148±0,037	40±3	40±3
Na-24	3,59±0,63	163±4	160±4
Cr-51	–	707±14	707±14
Sb-122	–	1650±30	1650±30

Из таблицы 1 и рисунка 6 следует, что основная активность всех активированных радионуклидов обусловлена вкладом материала трубок-фиксаторов. Значения абсолютной активности радионуклидов Al-28, Ca-49, Ti-51, Cl-38, Na-24 в пустой капсуле на порядок ниже, чем в трубках-фиксаторах. Вклад материала капсулы составляет менее 5% всего фонового излучения.

#### 4. Заключение

Для используемых расходных материалов в качестве фиксаторов и транспортных капсул получено, что материал фиксаторов содержит большее количество примесей в многократно большей концентрации, нежели материал самих транспортных капсул. Это является причиной возрастания загрузки спектрометрического оборудования и увеличения относительного вклада фона отдельных радионуклидов в итоговый спектр (образец+упаковка). Поскольку качество аналитических исследований обратно

пропорционально вкладу фона, при большом фоне от упаковки образца (капсула+фиксаторы) нельзя определять малые концентрации элементов в самих образцах. Необходимо найти и приобрести другой, более чистый материал для использования его в качестве фиксаторов образца при размещении в транспортной капсуле. Где возможно, рекомендуется проводить измерение облученных образцов после переупаковки. Где это невозможно, проводить корректный учет вклада фона от облученной капсулы и фиксаторов.

#### Благодарности

Данная работа выполнена в рамках бюджетного финансирования Министерства Энергетики Республики Казахстан «Развитие ядерно-физических методов и технологий для инновационной модернизации экономики Казахстана» ИРН: BR09158958.

## Литература

- 1 Сокольский В.В., Солодухин В.П., Казачевский И.В. Ядерно-физические методы анализа для науки и промышленности Казахстана // Международная конференция «Ядерная и радиационная физика». – Алматы, 1997. – С.208-216.
- 2 Reactor Database (RRDB) // IAEA. Web-page: <https://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx>
- 3 Use of Research Reactors for Neutron Activation Analysis // IAEA-TECDOC-1215. Report of an Advisory Group meeting held in Vienna, 22–26 June 1998. – 2001. – 98 p.
- 4 Беляев С.В., Солодухин В.П., Силачев И.Ю., Быченко А.Н., Каргина Н.А. и др. Хромитовые руды Казахстана – перспективный источник получения металлов платиновой группы // Материалы Международной научно-практической конференции «Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья». – Караганда, 2015. – С.106-109.
- 5 Кузгибекова Х.М., Исабаев С.М., Малышев В.П., Жумашев К.Ж., Жинова Е.В. и др. Принципы выбора оптимальной технологии переработки золотомышьяковистых концентратов Бестюбинского месторождения // Материалы Международной научно-практической конференции «Химия и металлургия комплексной переработки минерального сырья». – Караганда, 2015. – С.623-627.
- 6 Solodukhin V.P., Poznyak V.L., Silachev I.Yu., Gorlachev I.D. Development the complex of nuclear-physical methods of analysis for geological and technological tasks in Kazakhstan // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2016. – Vol.309. – P.125–134.
- 7 Solodukhin V.P., Lennik S.G., Kabirova G.M., Lobanov P.Yu., Zheltov D.A., et al. Natural radionuclides and toxic elements in the border areas of rivers flowing into Kazakhstan from Kyrgyzstan // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2020. – Vol.326, Is. 2. – P.1477-1489.
- 8 Bode P. Kilogram Sample analysis by nuclear analytical techniques: complementary opportunities for the mineral and geosciences // Minerals. – 2021. – Vol.11(5). – P.443.
- 9 Bode P. Neutron activation analysis (NAA) // Neutron Methods for Archaeology and Cultural Heritage. – P.209-219.
- 10 Dung H., Blaauw M., Beasley D., Freitas M. Development of the  $k_0$ -based cyclic neutron activation analysis for short-lived radionuclides // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2012. – Vol.291. – P.485–492.
- 11 Molnár G.L., Révay Zs., Szentmiklósi L. New perspectives for very short-lived neutron activation analysis // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2004. – Vol.262. – P.157-163.
- 12 Ridikas D., Pessoa Barradas N., Migliori A., Katukhov A., Bode P. Improved performance of neutron activation analysis laboratories by feedback workshops following interlaboratory comparison rounds // Accreditation and Quality Assurance – 2021. – Vol.26. – P.157–164.
- 13 Ismail S.S. A new automated sample transfer system for instrumental neutron activation analysis // Journal of Automated Methods and Management in Chemistry. – Vol.2010. – ID389374.
- 14 Ho V.D., Ho M.D., Ha T.V., Tran Q.T., Cao D.V. The upgrading of the cyclic neutron activation analysis facility at the Dalat research reactor // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry. – 2018. – Vol.315. – P.703–709.
- 15 Ленник С.Г., Соколенко Е.К., Бедельбекова К.А. Изучение возможности использования полиэтилена отдельных марок (видов) для изготовления транспортных капсул, необходимых при проведении нейтроноактивационного анализа по короткоживущим изотопам // Вестник НЯЦ РК. – 2021. – Vol.2(86). – P.11–18.

## References

- 1 Sokolskii VV, Solodukhin VP, Kazachevskii IV (1997) Nuclear-physical methods of analysis for science and industry of Kazakhstan [Yaderno-fizicheskie metody analiza dlya nauki i promyishlennosti Kazahstana]. International Conference “Nuclear and Radiation Physics”, Almaty, Kazakhstan. P.208-216. (In Russian)
- 2 Research Reactor Database (RRDB). IAEA. Web-page: <https://nucleus.iaea.org/RRDB/RR/ReactorSearch.aspx>
- 3 (2001) IAEA-TECDOC-1215. Use of Research Reactors for Neutron Activation Analysis. Report of an Advisory Group meeting held in Vienna, 22–26 June 1998.
- 4 Beliaev SV, Solodukhin VP, Silachev II, Bychenko AN, Kargina NA et al (2015) Chromite ores of Kazakhstan - a promising source of platinum group metals [Hromitovyie rudyi Kazahstana – perspektivnyiy istochnik polucheniya metallov platinovoy gruppyi]. International Scientific and Practical Conference “Chemistry and Metallurgy of Complex Processing of Mineral Raw Materials”, Karaganda, Kazakhstan. P.106-109. (In Russian)
- 5 Kuzgibekova KM, Isabaev SM, Malyshev VP, Zhumashev KZ, Zhinova EV, et al (2015) Principles for choosing the optimal technology for processing gold-arsenic concentrates of the Bestyubinskoye deposit [Printsipiyi vyibora optimalnoy tehnologii pererabotki zolotomyshyakovistyih kontsentratorov Bestyubinskogo mestorozhdeniya]. International Scientific and Practical Conference “Chemistry and Metallurgy of Complex Processing of Mineral Raw Materials”. Karaganda, Kazakhstan. P.623-627. (In Russian)
- 6 Solodukhin VP, Poznyak VL, Silachev IY, Gorlachev ID (2016) J Radioanal Nucl Ch 309:125–134. <https://doi.org/10.1007/s10967-016-4764-y>
- 7 Solodukhin VP, Lennik SG, Kabirova GM, Lobanov PY, Zheltov DA et al (2020) J Radioanal Nucl Ch 326:1477-1489. <https://doi.org/10.1007/s10967-020-07425-w>
- 8 Bode P (2021) Minerals 11(5):443. <https://doi.org/10.3390/min11050443>
- 9 Bode P (2017) Neutron Activation Analysis (NAA). In: Kardjilov N, Festa G (eds) Neutron Methods for Archaeology

- and Cultural Heritage. Neutron Scattering Applications and Techniques. Springer, Cham. P.209-219. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-33163-8\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-319-33163-8_10)
- 10 Dung H, Blaauw M, Beasley D, Freitas M (2012) J Radioanal Nucl Ch 291:485–492. <https://doi.org/10.1007/s10967-011-1317-2>
- 11 Molnár GL, Révay Z, Szentmiklósi L (2004) J Radioanal Nucl Ch 262(1):157-163. <https://doi.org/10.1023/B:JRNC.0000040868.70510.9f>
- 12 Ridikas D, Pessoa Barradas N, Migliori A, Katukhov A, Bode P (2021) Accredited Qual Assur 26:157–164 <https://doi.org/10.1007/s00769-021-01473-9>
- 13 Ismail SS (2010) J Autom Method Manag 2010:389374. <https://doi.org/10.1155/2010/389374>
- 14 Ho VD, Ho MD, Ha TV, Tran QT, Cao DV (2018) J Radioanal Nucl Ch 315:703–709. <http://doi.org/10.1007/s10967-017-5673-4>
- 15 Lennik SG, Sokolenko EK, Bedelbekova KA (2021) Bulletin of NNC RK [Vestnik NYaCz RK] 2(86):11-18. <https://doi.org/10.52676/1729-7885-2021-2-11-18>. (In Russian)