

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2025-2-96-102>

УДК: 502.51:543.3:546.296(574.41)

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЖИДКОСТНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДОНА В ВОДЕ

**К. Т. Жамалдинова*, Ф. Ф. Жамалдинов, М. Т. Дюсембаева,
А. Ж. Ташекова, А. С. Мамырбаева, К. А. Понтак**

Филиал «Институт радиационной безопасности и экологии» РГП НЯЦ РК, Курчатов, Казахстан

** E-mail для контактов: kuralay@nnc.kz*

В работе приведены результаты использования метода жидкостной сцинтилляционной спектрометрии (ЖСС) для измерения удельной активности радона в воде. Экспериментально определены оптимальные настройки разделения альфа- и бета-излучения, а также эффективность регистрации радона для различных типов сцинтилляторов. Метод апробирован на объектах водопользования, расположенных на территории Семипалатинского испытательного полигона (СИП). Для валидации метода ЖСС проведено сравнение с гамма-спектрометрическим анализом, которое показало их хорошую сопоставимость. Полученные результаты позволяют рекомендовать метод ЖСС для радиозоологического мониторинга водных объектов.

Ключевые слова: радионуклиды, радиоактивность воды, радон, жидкостной сцинтилляционный счет, метод измерения.

ВВЕДЕНИЕ

Естественная радиоактивность, присутствующая в природной воде, обусловлена растворенными и взвешенными частицами, содержащими элементы уранового и ториевого радиоактивного ряда, в частности изотопы Ra-226, Ra-228, U-234, U-238 и Pb-210. Основным источником природной радиоактивности вод является взаимодействие с горными породами и минералами, содержащими радионуклиды. Вода выступает в качестве основного механизма переноса радиоактивных элементов, их миграции и перераспределения под влиянием различных геофизических и геохимических факторов [1–3].

Радон встречается в природе в значительных количествах в трех различных изотопах. Наиболее опасным является радон-222 – продукт распада урана-238 или радия-226. Среди изотопов радона он является наиболее распространенным из-за своего более длительного периода полураспада (3,82 суток) по сравнению с Rn-220 (54,5 секунды) и Rn-219 (3,9 секунды). Радон может растворяться в подземных водах и накапливаться в связанных с ними источниках воды, таких как родники или колодцы. Эпидемиологические исследования не подтвердили связь между потреблением питьевой воды, содержащей радон, и повышенным риском развития рака желудка. Риски, связанные с содержанием радона в воде, преимущественно связаны с развитием рака легких в результате попадания радона в воздух. Во время выполнения людьми повседневных действий, таких как принятие душа или стирка белья, содержащийся в воде радон может высвобождаться в воздух. Для таких стран, как Казахстан, на территории которых находятся богатые ураном геологические районы, характерна более высокая концентрация радона в подземных водах [4–6].

В настоящее время существует три основных подхода к измерению активности радона в воде: гамма-

спектрометрия, эманационный метод и жидкостная сцинтилляционная спектрометрия [7–10]. Эти методы охватывают широкий спектр техник – от простых и экономичных до более сложных и дорогостоящих, что делает анализ радона доступным для большинства лабораторий, занимающихся радиозоологическими исследованиями. Метод жидкостного сцинтилляционного счета (ЖСС) является наиболее распространенным методом для измерения радона в грунтовых водах. Использование ЖСС имеет ряд преимуществ – высокая чувствительность, низкий предел обнаружения, малый объем исследуемого образца, простота подготовки проб к измерению. Однако в Казахстане этот метод не получил практического применения из-за малочисленности подобного дорогостоящего спектрометрического оборудования в радиозоологических лабораториях и научных центрах. В этой связи, использование метода ЖСС для измерения радона в воде представляет значительный научный и прикладной интерес.

В данной работе представлены результаты отработки процедур подготовки и спектрометрических измерений радона на калибровочных счетных образцах и объектах водопользования СИП с использованием однофазного и двухфазного сцинтилляторов, а также их валидация путем сравнения с альтернативным гамма-спектрометрическим методом.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Теоретическая основа метода измерения радона с помощью ЖСС

Принцип измерения радона в воде с помощью ЖСС основан на смешивании водного образца со сцинтилляционной жидкостью, которая при распаде радона испускает световые импульсы, регистрируемые детектором. Высокая растворимость радона в органических растворителях, таких как толуол и ксилол, составляющих основу сцинтилляционных кок-

тейлей, позволяет эффективно извлекать радиоактивный газ из водных проб в органическую фазу, тогда как другие радионуклиды, обладающие большей гидрофильностью, остаются в воде [11, 12].

Теоретическая эффективность измерения радона методом ЖСС может достигать 500%, поскольку он и его дочерние продукты распада (Po-218, Pb-214, Bi-214, Po-214) регистрируются практически с 100% вероятностью.

При измерении радона предпочтительно использование счетчиков с функцией разделения альфа- и бета-импульсов. Эффективное разделение альфа- и бета-излучения способствует значительному снижению предела обнаружения, поскольку основная часть фонового излучения относится к бета-спектру.

Измерительная аппаратура, выбор сцинтиллятора и материала счетных флаконов

Измерение радона проводилось с использованием ЖСС ультранизкого уровня Quantulus 1220 (рисунок 1). Спектры регистрировались программой WinQ и анализировались с помощью программного обеспечения Easy View. Прибор оснащен функцией анализа формы импульсов PSA (Pulse Shape Analysis), что позволило оптимально разделять спектры альфа- и бета-частиц в образцах окружающей среды [13]. Анализ формы импульса устанавливает различия между альфа- и бета-импульсами, генерируемыми в жидком сцинтилляционном коктейле, путем сравнения площади хвоста импульса производимого в фотоумножительных устройствах с общей площадью импульса. Импульс, обусловленный регистрацией альфа-частицы, длиннее, чем от бета-частиц.



Рисунок 1. Жидкостной сцинтилляционный счетчик альфа-бета-излучения Quantulus 1220

В работе использованы два типа сцинтиллятора: смешивающиеся с водой (однофазные) и не смешивающиеся с водой (двухфазные). В качестве однофазных коктейлей использовались Ultima Gold LLT и Ultima Gold AB. В качестве двухфазного коктейля применялся сцинтиллятор на основе высокоэффективного минерального масла Mineral Oil Scintillator.

В качестве материала счетных флаконов использовалось стекло. Применение тефлоновых и пластиковых флаконов было исключено, так как в ряде исследований [14, 15] выявлено диффундирование радона через эти материалы.

Калибровочный стандарт

В целях калибровки использовался раствор радия, полученный путем выделения из образца почвы, использованного в межлабораторных испытаниях IAEA-CU-2010 [16]. Аттестация полученного раствора проводилась гамма-спектрометрическим методом с применением полупроводникового детектора из особо чистого германия BE3830 фирмы Mirion. Измерение стандартного раствора проводилось в тройной повторности после предварительной выдержки (30 дней) для установления секулярного равновесия между радонем и его родительским радионуклидом Ra-226. Удельная активность раствора составила 7,7 Бк/мл. Калибровочные счетные образцы для ЖСС готовились аналогично счетным образцам для измерения радона.

Процедура подготовки и измерения счетных образцов

Счетные образцы готовились путем смешивания 10 мл сцинтилляционного коктейля с 10 мл исходной пробы. Образцы встряхивались и оставлялись в темноте минимум на три часа для достижения равновесия между радонем и его дочерними продуктами, а также для устранения фоновых искажений перед измерением. Измерение проводилось в течение 60 минут с использованием ЖСС Quantulus 1220 с заданным параметром разделения частиц в зависимости от типа коктейля.

Гамма-спектрометрическое определение активности радона

Верификация содержания радона в водных образцах выполнялась гамма-спектрометрическим методом. Для проведения измерений использовался гамма-спектрометр с детектором из особо чистого германия, модель BE 3830 (MIRION), обладающий относительной эффективностью не хуже 34% с энергетическим разрешением 0,7 кэВ на энергии 122 кэВ и 1,7 кэВ на энергии 1332 кэВ. Калибровка спектрометрического оборудования по эффективности регистрации проводилась с помощью стандартов IAEA-RGK, IAEA-RGTh, IAEA-RGU [17]. Для снижения фонового излучения использовалось экранирование детектора свинцовой защитой.

Измерение водного образца проводилось в пластиковой таре с геометрией идентичной с калибровочными образцами. Наполнение измерительных контейнеров водным образцом выполнялось максимально возможным, место соединения крышки контейнера дополнительно герметизировались во избежание утечки радона. Время выдержки подготовленного счетного образца и набора спектра составляло порядка 3 часов.

Определение активности радона в воде выполнялось по его дочерним радионуклидам: ^{214}Bi (609,3 кэВ) и ^{214}Pb (351,9 кэВ). При расчете активности радона учитывалась поправка на распад за время, прошедшее с момента отбора пробы до измерения счетного образца.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Определение оптимального параметра разделения альфа-, бета-частиц

Для настройки режима разделения альфа-, бета-частиц использовался стандарт радия. Измерение проводилось спустя месяц после приготовления счетного образца для установления радиоактивного равновесия между радием и радоном с дочерними продуктами распада. Подсчет проводился до достижения стандартной неопределенности не более 1%, с различными установленными настройками разделения частиц PSA (от 20 до 120). Параметр разделения в этом случае подбирался таким образом, чтобы соотношение скоростей счета в многоканальном анализаторе для альфа- и бета-излучения составляло $3\alpha:2\beta$. По результатам проведенных измерений оптимальный параметр разделения частиц составил для Ultima Gold AB; Ultima Gold LLT – 45, для Mineral Oil Scintillator – 60.

Определение эффективности и оптимальных окон регистрации при различных режимах измерения

Для оценки эффективности регистрации подготовленные счетные образцы из стандартного раствора радия измерялись при оптимальном значении параметра разделения альфа- и бета-частиц через 30 дней после их подготовки. В результате измерения счетных образцов был определен калибровочный фактор (CF) или эффективность регистрации радона согласно выражению:

$$CF = \frac{C_{st} - C_b}{A_{st}}, \quad (1)$$

где C_{st} – скорость счета стандарта, 1/с; C_b – фоновая скорость счета, 1/с; A_{st} – активность стандарта Ra-226 в виале, Бк [18].

В процессе обработки измерений определялись оп-

тимальные окна регистрации для каждого коктейля. Оценивалась эффективность регистрации с учетом альфа-, бета-излучателей и только альфа-излучателей (таблица 1). На рисунке 2 представлены спектры альфа-излучателей (Rn-222 – 5,5 МэВ, Po-218 – 6,0 МэВ, Po-214 – 7,7 МэВ), зарегистрированные в счетных образцах с использованием однофазных и двухфазного сцинтилляционных коктейлей. Во всех случаях спектры располагаются в диапазоне 500–800 каналов. Для однофазных коктейлей наблюдается смещение спектра в левую часть по сравнению с двухфазным, что обусловлено эффектом гашения, возникающим при полном смешивании сцинтиллятора с водным образцом.

Таблица 1. Эффективность регистрации радона различных сцинтилляционных коктейлей

Тип образца	Коктейль	Диапазон каналов α и β окна регистрации	Эффективность ($\alpha + \beta$), %	Эффективность α , %
Однофазный	Ultima Gold LLT	525–725	351	270
Однофазный	Ultima Gold AB	500–715	325	242
Двухфазный	Mineral Oil	500–785	340	265

Установлено, что эффективность регистрации радона однофазных и двухфазных типов сцинтилляторов сопоставима. Наибольшая эффективность регистрации наблюдается у коктейля Ultima Gold LLT, который показывает суммарную эффективность 351% и эффективность регистрации альфа-частиц 270%.

Однако применение двухфазного типа коктейля предпочтительно для измерения радона в воде, обеспечивая более высокую точность и надёжность измерений по сравнению с однофазными системами. Радон, обладая высокой растворимостью в органической среде и гидрофобными свойствами, эффективно переходит из водной фазы в сцинтиллятор. Это обстоятельство минимизирует влияние гашения, обусловленного присутствием солей, органических соединений или окрашивающих веществ, которые могут снижать эффективность регистрации в случае применения однофазного коктейля.

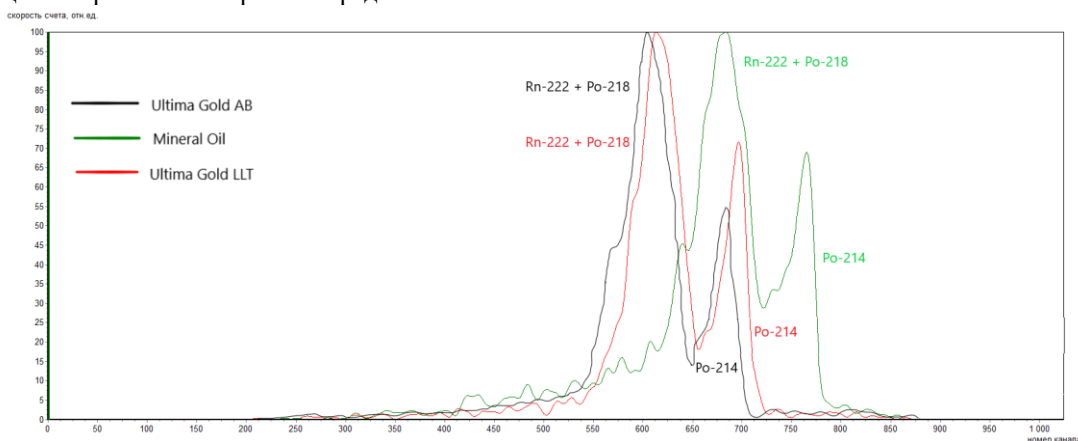


Рисунок 2. Спектр альфа-излучателей Rn-222, Po-214 Po-218 в счетных образцах с однофазными и двухфазными сцинтилляционными коктейлями

Кроме того, применение двухфазной системы позволяет существенно снизить интерференцию со стороны других радионуклидов, содержащихся в воде. Альфа- и бета-излучающие нуклиды, такие как стронций-90, торий-232 и тритий, преимущественно остаются в водной фазе и не переходят в органический сцинтиллятор. Это позволяет селективно регистрировать радон и его короткоживущие дочерние продукты, снижая вклад постороннего радиационного фона. В случае применения однофазного сцинтиллятора при измерении радона в водной пробе, загрязненной другими альфа-излучающими радионуклидами, дополнительно проводится подготовка фоновой пробы из исходной, используя дегазацию для удаления радона. Такая процедура позволяет оценить вклад постороннего альфа-излучения от других радионуклидов и вычесть его из общего спектра. Это усложняет подготовку проб к измерению и может внести дополнительную неопределенность при измерении радона.

Отработка процедуры измерения на образцах окружающей среды

Отработка метода измерения проводилась на образцах грунтовых вод, отобранных с объектов водопользования на СИП (рисунок 3). Исследовались девять подземных источников питьевых вод (колодцы и скважины) северной части СИП, так как содержание радона в воде из этих источников выше, чем в воде из поверхностных источников водоснабжения. Выбор точек для отбора проб воды обуславливался результатами предыдущих исследований водных объектов [19], в которых выявлены сравнительно высокие содержания урана для обследуемой территории. Отбор, транспортировка и хранение проб осуществлялись согласно требованиям международного стандарта

13164-4:2015. Объем каждой пробы составлял 1 л, при отборе фиксировалось точное время отбора, для учета распада радона при расчете активности.

Измерения образцов проводились с использованием различных сцинтилляционных коктейлей, не позднее 48 часов после отбора. Результаты содержания радона, определенные с помощью различных коктейлей оказались достаточно близки. Отклонение результатов от среднего значения не превысило 10% (таблица 2).

Дополнительно, пробы воды анализировались другим методом – гамма-спектрометрией высокого разрешения с использованием полупроводникового детектора из особо чистого германия BE3830 (Canberra). Результаты различных методов схожи, однако отклонение в единичных случаях достигало 36%, что может быть объяснено флуктуациями радона в воздухе помещений при проведении гамма-спектрометрических измерений (таблица 3). Статистический анализ с использованием t-критерия подтвердил отсутствие значимых различий между методами ($p > 0,05$) при уровне доверительной вероятности 95%, что свидетельствует о сопоставимости полученных данных.

Сравнивая данные методы, ЖСС обладает рядом существенных преимуществ перед гамма-спектрометрией при измерении радона. Благодаря регистрации как собственного альфа-излучения радона, так и альфа-излучения его дочерних продуктов, эффективность ЖСС достигает 270–300%, что гораздо выше эффективности гамма-спектрометрического метода, не превышающей 10%. ЖСС требует меньшего объема пробы, что значительно упрощает процесс анализа и менее подвержен влиянию фонового излучения, что повышает точность и воспроизводимость измерений.



Рисунок 3. Точки отбора проб воды на СИП

ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДА ЖИДКОСТНОЙ СЦИНТИЛЛЯЦИИ ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАДОНА В ВОДЕ

Таблица 2. Результаты измерения радона методом ЖСС в грунтовых водах СИП при использовании различных сцинтилляционных коктейлей

№ п/п	Место отбора	Точка отбора	Активность радона, Бк/л			
			Ultima Gold LLT	Mineral Oil	Ultima Gold AB	Среднее значение ± стандартное отклонение
1	Зимовка Алтынкудук	колодец	17±2	19±2	15±3	17±2
2	Летник Жаманкудук	колодец	17±2	22±3	18±2	19±3
3	Зимовка Жаркын	колодец	20±3	20±2	18±2	19±2
4	Зимовка Саба	колодец	37±3	43±4	40±4	40±3
5	Зимовка Торткудук	колодец	33±3	28±3	31±3	31±3
6	Летник Плохотникова	колодец	33±3	36±3	33±3	34±2
7	Зимовка Сартай Кора	колодец	15±2	17±2	15±3	16±1
8	Зимовка Аршалы	скважина	56±5	58±5	48±5	54±5
9	Зимовка Актас	колодец	8,7±2,0	11±2	13±2	11±2
Минимально детектируемая активность, Бк/л			< 0,54	< 0,56	< 0,65	< 0,58

Таблица 3. Сравнение ЖСС и гамма-спектрометрического метода измерения радона в воде

№ п/п	Место отбора	Точка отбора	Активность радона, Бк/л		Расхождение, %
			Гамма-спектрометрия	ЖСС	
1	Зимовка Алтынкудук	колодец	17±4	17±2	0
2	Летник Жаманкудук	колодец	20±4	19±3	5
3	Зимовка Жаркын	колодец	25±5	19±2	24
4	Зимовка Саба	колодец	35±7	40±3	-14
5	Зимовка Торткудук	колодец	33±7	31±3	6
6	Летник Плохотникова	колодец	30±5	34±2	-13
7	Зимовка Сартай Кора	колодец	25±5	16±1	36
8	Зимовка Аршалы	скважина	45±8	54±5	-20
9	Зимовка Актас	колодец	15±3	11±2	27
Минимально детектируемая активность, Бк/л			< 3,7	< 0,58	—

По результатам измерений удельная активность радона в подземных источниках питьевых воды в северной части СИП находится в диапазоне от 11 до 54 Бк/л. Во всех исследованных точках содержание радона не превысило уровня вмешательства в питьевой воде (60 Бк/л), установленного нормативами радиационной безопасности, действующими в Казахстане [20].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В рамках исследования проведена отработка метода ЖСС для измерения активности радона в воде. В работе применялись различные виды сцинтилляторов, для каждого из которых были экспериментально установлены оптимальные измерительные параметры, включая разделение альфа- и бета-излучений, эффективность регистрации радона и выбор спектральных окон.

Анализ эффективности различных сцинтилляционных коктейлей выявил, что однофазные и двухфазные среды демонстрируют сопоставимые результаты. Однако, применение сцинтиллятора двухфазного типа предпочтительнее, так как при однофазном методе измерения на результаты могут влиять эффект гашения счетного образца и интерференции от растворенных в воде радионуклидов.

Апробация метода на пробах грунтовых вод, отобранных на территории СИП, показала стабильность и воспроизводимость измерений. Результаты измерений, выполненных с использованием различных типов сцинтилляторов, имеют расхождение менее 10%, что свидетельствует о высокой точности метода. Данные были дополнительно подтверждены альтернативным методом измерения радона, использующим полупроводниковые детекторы гамма-излучения.

Таким образом, ЖСС может быть рекомендован как эффективный метод для определения содержания радона в природных водах в целях радиоэкологического мониторинга водных объектов.

Данные исследования выполнены в рамках программно-целевого финансирования МВОН РК BR21882086 «Разработка устойчивого управления земельными ресурсами и водными объектами на территории бывшего Семипалатинского испытательного полигона».

ЛИТЕРАТУРА

1. Jobbágy V., Kávási N., Somlai J., Dombóvári P., Gyöngyösi C., Kovács T. Gross alpha and beta activity concentrations in spring waters in Balaton Upland, Hungary // *Radiation Measurements*. – 2011. – V. 46. – P. 159–163.
2. Schwartz M.C. Significant groundwater input to a coastal plain estuary: assessment from excess radon // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2003. – V. 56. – P. 31–42.
3. Corbett D.R., Burnett W.C., Cable P.H., Clark S.B. Radon tracing of groundwater input into Par Pond, Savannah River Site // *Journal of Hydrology*. – 1997. – V. 203. – P. 209–227.
4. WHO. Handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press, 2009.
5. Кузьмин М. И., Кузьмина О. В. Радон в подземных водах Южного Прибайкалья: результаты мониторинга и прогноз концентраций // *Геология и разведка*. – 2010. – № 2. – С. 45–53.
6. Шитова Т. А., Шитов А. В. Радон в обводненных разломных зонах Байкальского рифта // *Геофизические исследования*. – 2015. – Т. 16, № 3. – С. 58–67.
7. ISO. Water quality – Radon-222 – Part 1: General principles (ISO 13164-1:2013). International Organization for Standardization, 2013.
8. ISO. Water quality – Radon-222 – Part 2: Test method using gamma-ray spectrometry (ISO 13164-2:2013). International Organization for Standardization, 2013.
9. ISO. Water quality – Radon-222 – Part 3: Test method using emanometry (ISO 13164-3:2013). International Organization for Standardization, 2013.
10. ISO. Water quality – Radon-222 – Part 4: Test method using two-phase liquid scintillation counting (ISO 13164-4:2015). International Organization for Standardization, 2015.
11. Cantaloub M. G. Aqueous-organic partition coefficients for Rn-222 and their application to radon analysis by liquid scintillation methods. 2000.
12. Sekine T., Yamasaki A. Studies of the Liquid-Liquid Partition Systems. I. The Distribution of Radon (0) between Various Organic Solvents and Aqueous Solutions // *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. – 1965. – V. 38, No. 7. – P. 1110–1115.
13. Manual I. Wallac 1220 Quantulus ultra low level liquid scintillation spectrometer. PerkinElmer, 2002.
14. Lucchetti C., De Simone G., Galli G., Tuccimei P. Evaluating radon loss from water during storage in standard PET, bio-based PET, and PLA bottles // *Radiation Measurements*. – 2016. – V. 84. – P. 1–8.
15. Trull-Hernandis C., Noverques A., Juste B., Sancho M., Verdú G. Radon leakage in LSC vials: Material-dependent analysis for utilization and reutilization // *Radiation Physics and Chemistry*. – 2024. – V. 222. – P. 111831.
16. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). ALMERA Proficiency Tests. URL: <https://analytical-reference-materials.iaea.org/almera-proficiency-tests>
17. Международное агентство по атомной энергии (МАГАТЭ). Сертифицированные эталонные материалы. URL: <https://analytical-reference-materials.iaea.org/certified-reference-materials>
18. ASTM International. ASTM D5072-09(2016): Standard practice for radon measurement in water // *ASTM International*. – 2016. URL: <https://www.astm.org/d5072-09.html>
19. Дюсембаева М. Т., Мухамедияров Н. Ж., Есильканов Г. М., Ташекова А. Ж., Айдарханов А. О. Эколого-геохимические особенности некоторых водных объектов Семипалатинского испытательного полигона. – Алматы: Интеллект, 2023. – 268 с. – ISBN 978-601-08-3227-5.
20. Министерство здравоохранения Республики Казахстан. Приказ Министра здравоохранения Республики Казахстан от 02 августа 2022 года № ҚР ДСМ-71 «Об утверждении гигиенических нормативов к обеспечению радиационной безопасности». URL: <https://adilet.zan.kz>

REFERENCES

1. Jobbágy V., Kávási N., Somlai J., Dombóvári P., Gyöngyösi C., Kovács T. Gross alpha and beta activity concentrations in spring waters in Balaton Upland, Hungary // *Radiation Measurements*. – 2011. – V. 46. – P. 159–163.
2. Schwartz M.C. Significant groundwater input to a coastal plain estuary: assessment from excess radon // *Estuarine, Coastal and Shelf Science*. – 2003. – V. 56. – P. 31–42.
3. Corbett D.R., Burnett W.C., Cable P.H., Clark S.B. Radon tracing of groundwater input into Par Pond, Savannah River Site // *Journal of Hydrology*. – 1997. – V. 203. – P. 209–227.
4. WHO. Handbook on indoor radon: a public health perspective. Geneva: WHO Press, 2009.
5. Kuz'min M. I., Kuz'mina O. V. Radon v podzemnykh vodakh Yuzhnogo Pribaykal'ya: rezul'taty monitoringa i prognoz kontsentratsiy // *Geologiya i razvedka*. – 2010. – No. – P. 45–53.
6. Shitova T. A., Shitov A. V. Radon v obvodnennykh razlomnykh zonakh Baykal'skogo rifa // *GEOFIZICHESKIE ISSLEDOVANIYA*. – 2015. – V. 16, No. 3. – P. 58–67.
7. ISO. Water quality – Radon-222 – Part 1: General principles (ISO 13164-1:2013). International Organization for Standardization, 2013.
8. ISO. Water quality – Radon-222 – Part 2: Test method using gamma-ray spectrometry (ISO 13164-2:2013). International Organization for Standardization, 2013.
9. ISO. Water quality – Radon-222 – Part 3: Test method using emanometry (ISO 13164-3:2013). International Organization for Standardization, 2013.
10. ISO. Water quality – Radon-222 – Part 4: Test method using two-phase liquid scintillation counting (ISO 13164-4:2015). International Organization for Standardization, 2015.
11. Cantaloub M. G. Aqueous-organic partition coefficients for Rn-222 and their application to radon analysis by liquid scintillation methods. 2000.
12. Sekine T., Yamasaki A. Studies of the Liquid-Liquid Partition Systems. I. The Distribution of Radon (0) between Various Organic Solvents and Aqueous Solutions // *Bulletin of the Chemical Society of Japan*. – 1965. – V. 38, No. 7. – P. 1110–1115.
13. Manual I. Wallac 1220 Quantulus ultra low level liquid scintillation spectrometer. PerkinElmer, 2002.
14. Lucchetti C., De Simone G., Galli G., Tuccimei P. Evaluating radon loss from water during storage in standard PET, bio-based PET, and PLA bottles // *Radiation Measurements*. – 2016. – V. 84. – P. 1–8.
15. Trull-Hernandis C., Noverques A., Juste B., Sancho M., Verdú G. Radon leakage in LSC vials: Material-dependent

- analysis for utilization and reutilization // Radiation Physics and Chemistry. – 2024. – V. 222. – P. 111831.
16. Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoy energii (MAGATE). ALMERA Proficiency Tests. URL: <https://analytical-reference-materials.iaea.org/almera-proficiency-tests>
 17. Mezhdunarodnoe agentstvo po atomnoy energii (MAGATE). Serifikirovannyye etalonnyye materialy. URL: <https://analytical-reference-materials.iaea.org/certified-reference-materials>
 18. ASTM International. ASTM D5072-09(2016): Standard practice for radon measurement in water // ASTM International. – 2016. URL: <https://www.astm.org/d5072-09.html>
 19. Dyusembaeva M. T., Mukhamediyarov N. Zh., Esil'kanov G. M., Tashekoval A. Zh., Aydarkhanov A. O. Ekologo-geokhimicheskiye osobennosti nekotorykh vodnykh ob'ektov Semipalatinskogo ispytatel'nogo poligona. – Almaty: Intellect, 2023. – 268 p. – ISBN 978-601-08-3227-5.
 20. Ministerstvo zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan. Prikaz Ministra zdravookhraneniya Respubliki Kazakhstan ot 02 avgusta 2022 goda No. QR DSM-71 "Ob utverzhdenii gigienicheskikh normativov k obespecheniyu radiatsionnoy bezopasnosti". URL: <https://adilet.zan.kz>

СУДАҒЫ РАДОНДЫ АНЫҚТАУ ҮШІН СҰЙЫҚ СЦИНТИЛЛЯЦИЯ ӘДІСІН ҚОЛДАНУ

**К. Т. Жамалдинова*, Ф. Ф. Жамалдинов, М. Т. Дюсембаева,
А. С. Мамырбаева, А. Ж. Ташекова, К. А. Понтак**

ҚР ҰҰО РМҚ «Радиациялық қауіпсіздік және экология институты» филиалы, Курчатов, Қазақстан

* Байланыс үшін E-mail: kuralay@nnc.kz

Жұмыста судағы радон концентрациясын өлшеу үшін сұйық сцинтилляциялық есеп әдісін қолдану нәтижелері келтірілген. Эксперименттік жолмен альфа- және бета-сәулеленулерді бөлу үшін оңтайлы параметрлер мен түрлі сцинтилляторлардың радонды тіркеу тиімділігі анықталды. Әдіс Семей полигонындағы су пайдалану объектілерінде тексерілді. ЖСС әдісінің валидациясы гамма-спектрометриялық талдаумен салыстыру арқылы жүзеге асырылды, бұл әдістердің жақсы сәйкес келетінін көрсетті. Алынған нәтижелер су объектілерін радиоэкологиялық бақылау үшін ЖСС әдісін қолдануды ұсынуға мүмкіндік береді.

Түйін сөздер: радионуклидтер, судың радиоактивтілігі, радон, сұйық сцинтилляциялық есеп, өлшеу әдісі.

APPLICATION OF LIQUID SCINTILLATION METHOD FOR RADON DETERMINATION IN WATER

**K. T. Zhamaldinova*, F. F. Zhamaldinov, M. T. Dyusembaeva,
A. S. Mamyrbaeva, A. J. Tashekoval, K. A. Pontak**

Branch "Institute of Radiation Safety and Ecology" RSE NNC RK, Kurchatov, Kazakhstan

* E-mail for contacts: kuralay@nnc.kz

The paper presents the results of using the method of liquid scintillation counting (LSC) for measurement of radon concentration in water. The optimal settings of separation of alpha- and beta-radiation, as well as the efficiency of radon registration for different types of scintillators have been determined experimentally. The method was tested on water objects located on the territory of Semipalatinsk test site (STS). The comparison with gamma-spectrometric analysis was carried out for validation of the LSC method, which showed their good agreement. The obtained results allow recommending the LSC method for radioecological monitoring of water objects.

Keywords: radionuclides, water radioactivity, radon, liquid scintillation counting, measurement method.