

УДК 54.08

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОПРЕДЕЛЕНИЯ БЕТА ИЗЛУЧАЮЩИХ  
РАДИОНУКЛИДОВ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ПРИБОРОМ  
QUANTULUS-1220****Петрыгина Лидия Викторовна**

Выпускница Филиала Северного (Арктического) федерального университета им.  
М.В.Ломоносова, Институт судостроения и морской арктической техники г. Северодвинск,  
Российская Федерация  
e-mail: lidiapetrygina@gmail.com

**Аннотация**

В статье изложены результаты сравнительного анализа приборов для определения бета-излучателей в поверхностных водах. Произведена оценка современной методики определения радионуклидов в поверхностных водах лаборатории радиационного контроля АЭС. Исходя из полученных данных принято решение о разработке методики, позволяющей повысить эффективность системы радиационного контроля. По полученным экспериментальным данным приборов был произведен расчёт проверки равнозначности данных методов с помощью критерия Фишера и сравнение средних значений двух выборочных совокупностей с помощью критерия Стьюдента.

**Ключевые слова:** АЭС, радиационный контроль, бета-излучатели, методика определения, quantulus-1220, поверхностные воды

**DEVELOPMENT OF A METHODOLOGY FOR THE DETERMINATION OF  
BETA-EMITTING RADIONUCLIDES IN SURFACE WATERS BY THE  
QUANTULUS-1220 DEVICE****Lydia V. Petrygina**

graduate of the Branch of the Northern (Arctic) Federal University named after M.V.Lomonosov,  
Institute of Shipbuilding and Marine Arctic Technology Severodvinsk, Russian Federation  
e-mail: lidiapetrygina@gmail.com

**ABSTRACT**

The article presents the results of a comparative analysis of devices for determining beta emitters in surface waters. The evaluation of the modern methodology for the determination of radionuclides in the surface waters of the nuclear power plant radiation control laboratory was carried out. Based on the data obtained, it was decided to develop a methodology to improve the efficiency of the radiation monitoring system. According to the obtained experimental data of the devices, the calculation of the equivalence of these methods was carried out using the Fisher

criterion and the comparison of the average values of two sample populations using the Student's criterion.

**Keywords:** NPP, radiation monitoring, beta emitters, determination method, quantulus-1220, surface waters

#### Введение

В результате эксплуатации АЭС образуется большое количество отработанной воды, в состав которой входят радионуклиды [1]. Отработанные воды сбрасываются в конечный поглотитель. Для предупреждения загрязнения водоёма радиоактивными веществами должен быть организован экологический контроль. На данный момент методика определения бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах имеет ряд недостатков:

- сложность подготовки счетного образца;
- длительность пробоподготовки;
- потеря трития при упаривании пробы.

Для повышения оперативности и точности измерения активности бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах предлагается модернизировать методику путём внедрения нового прибора.

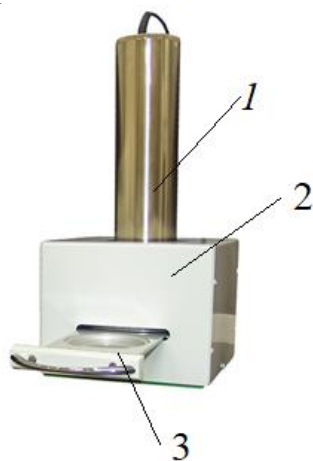
Цель: разработка методики, позволяющая повысить эффективность системы радиационного контроля.

В связи со свойствами водных объектов, а именно активность и радионуклидный состав, были выбраны установки для определения бета излучающих радионуклидов в поверхностных водах.

#### 1)МКС-01А

На данный момент в лаборатории радиационного контроля для измерения бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах используется МКС-01А. МКС - 01А (рисунок 1) предназначен для измерения активности и удельной активности альфа-, бета- и гамма-излучающих нуклидов в специально приготовленных образцах.

Принцип действия МКС-01А основан на преобразовании энергии ионизирующих излучений в электрические импульсы, которые с помощью аналого-цифрового преобразователя преобразуются в цифровой сигнал. Цифровой сигнал в дальнейшем обрабатывается посредством программного обеспечения «Процесс-5» [2].



1 – блок детектирования; 2 – свинцовый колодец; 3 – измерительная кювета.

Рисунок 1. МКС-01А: [https://atomsnab.kz/product/mks-01a\\_gamma/](https://atomsnab.kz/product/mks-01a_gamma/)

Для МКС–01А в лаборатории проводится сложная пробоподготовка (выпаривание, сушка). При выпаривании проба теряет радионуклиды, например тритий, а также прибор не выявляет состав радионуклидов.

2) «Quantulus-1220».

Радиометр -альфа, -бета излучения «Quantulus» (рисунок 2) предназначен для определения активности бета излучающих радионуклидов в счетных образцах, представляющих смесь исследуемого раствора и жидкого сцинтиллятора или источников, помещаемых в сосуд со сцинтиллятором, для применения в любых областях радиационного контроля.



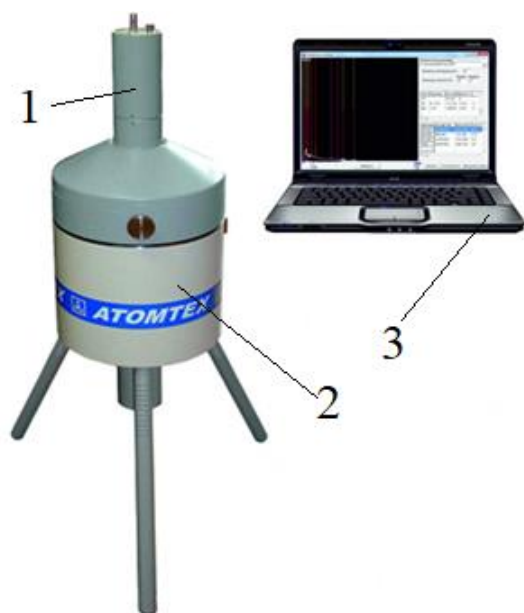
1 – спектрометр; 2 – персональный компьютер; 3 – измерительные флаконы.

Рисунок 2. Радиометр «Quantulus-1220»: <https://www.igns.gov.ua/en/diyalnist/czentr-kolektyvnogo-korystuvannya/>

Заряженная частица, взаимодействуя с молекулами сцинтиллятора, передает им свою энергию. Энергия образующейся световой вспышки пропорциональна энергии, потерянной частицей в сцинтилляционном коктейле. Световые кванты вызывают фотоэлектрический эффект на катодах фотоэлектронного умножителя [3]. Заряд, снимаемый с анода фотоэлектронного умножителя, пропорционален числу первичных фотоэлектронов и, следовательно, пропорционален интенсивности световой вспышки, попавшей на катод. Сигналы с анода двух фотоэлектронного умножителя проходят через схему совпадений (при условии совпадения), суммируются, суммарный сигнал усиливается, формируется для получения оптимального отношения сигнал/шум и преобразуется в цифровой код. Получаемые коды накапливаются в памяти спектрометра и образуют энергетический спектр излучения - зависимость количества зарегистрированных импульсов от энергии излучения.

3) МКС-АТ1315

Гамма-бета спектрометр МКС-АТ1315 (рисунок 3) представляет собой комбинированное спектрометрическое и радиометрическое средство измерения гамма-бета излучения.



1 – блок детектирования; 2 – блок защиты; 3 – персональный компьютер.

Рисунок 3. Спектрометр «МКС-АТ1315»: [https:// portland-nk.ru/katalog/gamma-beta-spektrometr-mks-at1315/](https://portland-nk.ru/katalog/gamma-beta-spektrometr-mks-at1315/)

Спектрометр МКС-АТ1315 имеет стационарную конструкцию и состоит из блока детектирования гамма-излучения, блока детектирования бета-излучения и блока защиты. Блок детектирования бета-излучения размещается в крышке блока защиты и использует пластмассовый сцинтиллятор в качестве регистратора бета-излучения [4].

Сравнение и выбор установок для определения бета-излучателей в поверхностных водах. Для осуществления выбора подходящего прибора для определения бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах был проведен сравнительный анализ существующих приборов по основным параметрам и характеристикам (таблица 1).

Таблица 1. Сравнение приборов по определению бета-излучающих радионуклидов

Критерии сравнения	Приборы		
	МКС-01А	Quantulus-1220	МКС-АТ1315
Энергетический диапазон, кэВ	150 - 2000	1 - 2000	150 - 2500
Основная относительная погрешность измерения активности, %	±25%	±10 %	±20 %
Проектный срок эксплуатации, лет	6	10	7
Масса, кг	200	1000	123
Диапазон рабочих температур, °С	-15 - +40	+15 - +35	+10 - +35
Потребляемая мощность, Вт	220	250	300
Время пробоподготовки, час	506	1	3

Время измерения, час	1	3	1
Количество одновременно измеряемых образцов	1	60	1
Регистрация трития	нет	да	нет
Стоимость, рубли	540 200	10 356 220	421 200

Выполненный обзор существующих приборов показал, что «Quantulus-1220» является оптимальным вариантом, ввиду высокой эффективности регистрации частиц, малого объема пробы, необходимой для анализа, простотой процедуры пробоподготовки и экспрессностью данного метода. Исходя из энергетического диапазона представленных выше приборов определение трития возможно только прибором «Quantulus-1220». Также, данный прибор обладает сравнительно небольшим потреблением мощности и большим проектным сроком эксплуатации по сравнению с другими приборами.

Главным минусом «Quantulus-1220» является его высокая стоимость. Таким образом, наилучшим решением для определения бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах является «Quantulus-1220».

Описание методики определения бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах

Методика с применением прибора «Quantulus-1220» предназначена для определения бета-излучающих радионуклидов в счетных образцах, которые представляют собой пробу, смешанную со сцинтиллятором ULTIMA GOLD. Данная методика проходит в несколько этапов.

подготовка счётного образца, представляющего собой смесь сцинтиллятора ULTIMA GOLD и водной аликвоты пробы,

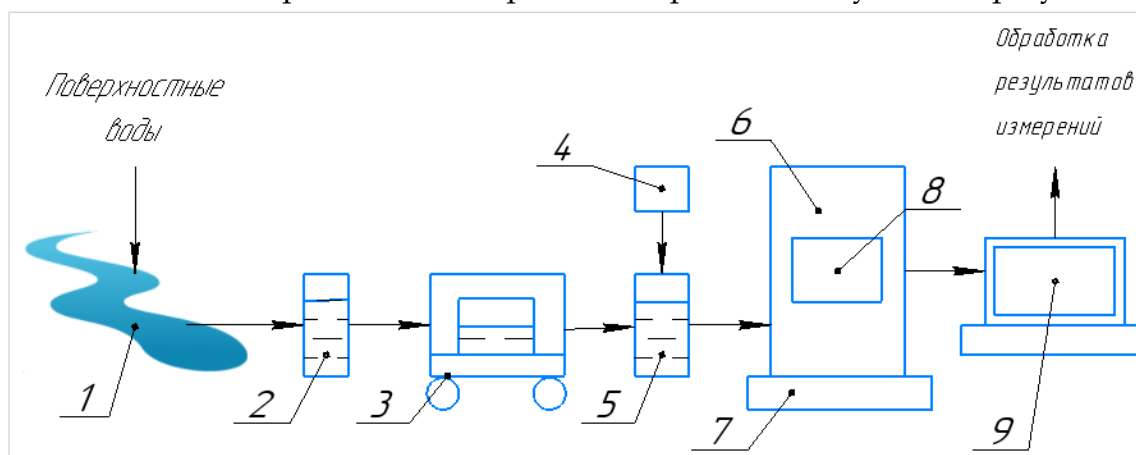
измерение излучения счётного образца на жидкосцинтилляционном спектрометрическом комплексе,

запись полученного аппаратного энергетического спектра,

расчет активности радионуклидов с использованием специализированного программного обеспечения обработки непрерывных спектров.

Принципиальная схема методики определения бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах представлена на рисунке 4.

Схема содержит бак-сборник для отбора проб, представлена их транспортировка в лабораторию, подготовка счётного образца путём добавления в него сцинтиллятора, подача счётных образцов на измерения и обработка полученных результатов.



1 – отбор проб; 2 – емкость объемом 1 л. с отобранной пробой; 3 – передвижная радиометрическая лаборатория; 4 – дозатор сцинтиллятора ULTIMA GOLD; 5 – измерительный флакон; 6 – «Quantulus-1220»; 7 – опорная рама; 8 – система подачи образцов; 9 – персональный компьютер.

Рисунок 4. Принципиальная схема линии определения бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах

В результате эксплуатации АЭС образуется большое количество отработанной воды, в состав которой входят радионуклиды. Отработанные воды сбрасываются в конечный поглотитель. Для предупреждения загрязнения водоёма радиоактивными веществами организован экологический контроль. Экологический контроль осуществляют лаборатория охраны окружающей среды. Передвижная радиометрическая лаборатория, входящая в состав АСКРО, отбирает водные пробы баком-сборником (1) объемом 1 л и подкисляют концентрированной азотной кислотой до уровня pH 3-4 [5]. Уровень pH проверяют с помощью универсальной индикаторной бумаги ПНД 50-975-84. Емкости с пробами (2) герметично закрывают и доставляют ПРЛ (3) в лабораторию. Из анализируемой пробы воды отбирают аликвоту объемом 10 мл и переносят в измерительные флаконы (5) для «Quantulus 1220» (6), добавляют 10 мл сцинтилляционного коктейля Ultima Gold AB и тщательно встряхивают. Подготовленные СОБ помещают в систему подачи образцов (8). Радиометр Quantulus 1220 обеспечивает сверхнизкофоновые показатели за счет уникального сочетания активной и пассивной защиты. Мощная пассивная защита состоит из низкоактивного свинца вокруг блока детекторования с максимальной толщиной 200 мм сверху, 100 мм на боковых стенках и 150 мм внизу (рисунок 6). Головка поршня системы подачи образцов (8) выполнена из меди и является частью пассивной защиты.

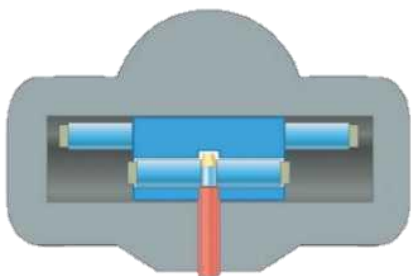


Рисунок 5. Конструкция комбинированной защиты «Quantulus 1220»:

<https://c14dating.com/quant.html>

Прибор позволяет загружать до трех лотков со счетными образцами, до 20 штук в каждом. Измерения проводятся 3 часа, но если нижний предел диапазона измерения активности радионуклидов в воде составляет не более 0,03 Бк, то время измерения 500 мин.

Результаты измерения обрабатываются с помощью ПК (9). Обработку результатов измерений и анализ полученных аппаратных спектров выполняют с на базе программного обеспечения «Liquid Master» в соответствии с руководством оператора.

Измерения по настоящей методике необходимо проводить при условиях, указанных в техническом паспорте на спектрометрический комплекс:

температура воздуха, °С от плюс 15 до плюс 35;

относительная влажность, не более 75 %;

атмосферное давление, кПа (100±10);

напряжение сети питания электронной аппаратуры, В (220±20);  
частота сети питания электронной аппаратуры, Гц (50±2).

Измерения по настоящей методике должны проводиться в чистом помещении, не содержащем посторонних источников ионизирующих излучений, которые могут повлиять на результаты измерений. При невозможности обеспечения чистоты помещения следует проводить контроль фона при измерении каждого счётного образца.

Подготовленный для измерений счётный образец должен представлять собой гомогенную бесцветную жидкость в объеме, не превышающим 20 мл, помещенную в специализированный полиэтиленовый или стеклянный флакон, закрытый крышкой.

После измерений, если прибор не обнаружил радионуклидов, счётный образец сливается в бак-сборник. В случае обнаружения радионуклидов СОБ сливается в специальный контейнер для ЖРО.

Для доказательства эффективности и работоспособности разработанной методики следует рассчитать расхождения между итоговыми значениями.

Расчет значимости различия между средними значениями

Экспериментально на двух приборах (I – МКС-01А, II – Quantulus 1220) были получены следующие результаты при анализе пробы поверхностной воды на активность (Бк/кг):  
I 0,0062; 0,0061; 0,0060; 0,0062; 0,0063.

II 0,0061; 0,0063; 0,0062; 0,0062; 0,0061.

Из выборки II для возможности расчёта был исключен тритий, активность которого составила 6,12 Бк/кг, так как в выборке I данный радионуклид не учитывается (теряется при пробоподготовке).

Далее выполняется расчёт на принадлежность обеих выборок одной и той же генеральной совокупности (при доверительной вероятности P=0,95)

Рассчитаем среднее и дисперсию для выборки I и II:

$$\bar{X}_I = 0,00616 \text{ и } \bar{X}_{II} = 0,00618.$$

Расчет дисперсии проводится по формуле:

$$S^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n-1},$$

где  $n$  – число повторных измерений.

$$S_I^2 = 1,26 \cdot 10^{-8} \text{ и } S_{II}^2 = 7 \cdot 10^{-9}.$$

Для проверки равнозначности выбранных методов воспользуемся критерием Фишера:

$$F_{\text{эксп}} = \frac{S_I^2}{S_{II}^2} = 1,8$$

Расхождения между дисперсиями незначимо, так как  $F_{\text{крит}} = 6,4$  ( $f_1 = 4$  и  $f_2 = 4$ ;  $P=0,95$ ), а  $F_{\text{эксп}} > F_{\text{крит}}$ , следовательно методы равнозначны.

Сравниваем средние значения двух выборочных совокупностей. Для этого произведем расчёт среднего взвешенного двух дисперсий

$$\bar{S}^2 = \frac{f_1 \cdot S_1^2 + f_2 \cdot S_2^2}{f_1 + f_2} = 9,8 \cdot 10^{-9}$$

и  $t_{\text{эксп}}$  соответственно:

$$t_{\text{эксп}} = \frac{|\bar{x}_1 - \bar{x}_2|}{\sqrt{\bar{S}^2}} \cdot \sqrt{\frac{n_1 \cdot n_2}{n_1 + n_2}} = 0,319.$$

Так как  $t_{\text{эксп}} < t_{\text{крит}}$  ( $t_{\text{крит}} = 2,31$  при  $P=0,95$  и  $f = n_1 + n_2 - 2 = 8$ ). Расхождение между средними незначимо и можно считать обе выборки одной выборочной совокупностью с числом результатов равным 20.

Заключение

С целью совершенствования радиационного контроля была разработана методика определения бета-излучающих радионуклидов в поверхностных водах прибором Quantulus 1220.

По полученным экспериментальным данным двух приборов был произведен расчёт проверки равнозначности данных методов с помощью критерия Фишера и с р а в н е н и е средних значений двух выборочных совокупностей с помощью критерия Стьюдента. Расчёт показал, что расхождение между средними незначимо и можно считать обе выборки одной выборочной совокупностью с числом результатов равным 20.

#### Список литературы:

1. Отчёт об экологической безопасности Кольской АЭС URL: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/e70/e7046ee3fb0665efd802cf894ee1fa65.pdf> (дата обращения: 26.10.2023)
2. Установка спектрометрическая МКС-01А «МУЛЬТИРАД» URL: <https://pribory-si.ru/catalog/03-01/ustanovka-spektrometriceskaya-mks-01a-multirad/> (дата обращения: 26.10.2023)
3. Ультра-низкофоновый жидкосцинтилляционный спектрометр «QUANTULUS 1220» URL: [http://atomproekt.ru/equipment/spektrometriya/zhidkoscintillyacionnaya\\_spektrometriya/quantulus\\_1220](http://atomproekt.ru/equipment/spektrometriya/zhidkoscintillyacionnaya_spektrometriya/quantulus_1220) (дата обращения: 27.10.2023)
4. Гамма-бета спектрометр МКС-АТ1315 URL: <https://www.ntcexpert.ru/rk/dozimetry/931-gamma-beta-spektrometr-mks-at1315> (дата обращения: 28.10.2023)
5. Передвижная радиометрическая лаборатория Кольской АЭС URL: <https://www.rspp.ru/simplepage/filial-oao-kontsern-rosenergoatom-kolskaya-atomnaya-stantsiya-kolskaya-aes/> (дата обращения: 28.10.2023)

#### References:

1. Report on the environmental safety of the Kola NPP URL: <https://www.rosatom.ru/upload/iblock/e70/e7046ee3fb0665efd802cf894ee1fa65.pdf> (access date: 10/26/2023)
2. Spectrometric installation MKS-01A "MULTIRAD" URL: <https://pribory-si.ru/catalog/03-01/ustanovka-spektrometriceskaya-mks-01a-multirad/> (access date: 10/26/2023)
3. Ultra-low-background liquid scintillation spectrometer "QUANTULUS 1220" URL: [http://atomproekt.ru/equipment/spektrometriya/zhidkoscintillyacionnaya\\_spektrometriya/quantulus\\_1220](http://atomproekt.ru/equipment/spektrometriya/zhidkoscintillyacionnaya_spektrometriya/quantulus_1220) (access date: 10/27/2023)
4. Gamma-beta spectrometer MKS-AT1315 URL: <https://www.ntcexpert.ru/rk/dozimetry/931-gamma-beta-spektrometr-mks-at1315> (access date: 10/28/2023)
5. Mobile radiometric laboratory of the Kola NPP URL: <https://www.rspp.ru/simplepage/filial-oao-kontsern-rosenergoatom-kolskaya-atomnaya-stantsiya-kolskaya-aes/> (access date: 10/28/2023)