ФЕДЕРАЛЬНАЯ СЛУЖБА
ПО ЭКОЛОГИЧЕСКОМУ, ТЕХНОЛОГИЧЕСКОМУ И АТОМНОМУ НАДЗОРУ
(РОСТЕХНАДЗОР)

ПРИКАЗ

04 апреля 2019 г. № 137

Москва

Об утверждении руководства по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла»

В целях реализации полномочий, установленных подпунктом 5.3.18 пункта 5 Положения о Федеральной службе по экологическому, технологическому и атомному надзору, утвержденного постановлением Правительства Российской Федерации от 30 июля 2004 г. № 401, приказываю:

Утвердить прилагаемое к настоящему приказу руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла».

Врио руководителя А.Л. Рыбас

ФБУ «НТЦ ЯРБ»
Уч.№ 15
Дата 04.04.19
Кол-во листов 1+30

gost.e-ecolog.ru

УТВЕРЖДЕНО
приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «04» апреля 2019 г. № 134

**Руководство по безопасности
при использовании атомной энергии
«Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений
для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов
в радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла»**

(РБ-154-19)

I. Общие положения

1. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендации по применению метода радионуклидных соотношений для определения содержания сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах предприятий ядерного топливного цикла» (РБ-154-19) (далее – Руководство по безопасности) разработано в соответствии со статьей 6 Федерального закона от 21 ноября 1995 г. № 170-ФЗ «Об использовании атомной энергии» в целях содействия соблюдению требований федеральных норм и правил в области использования атомной энергии «Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла» (НП-016-05), утвержденных постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2005 г. № 11 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 1 февраля 2006 г., регистрационный № 7433), «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование жидких радиоактивных отходов. Требования безопасности» (НП-019-15), утвержденных приказом Ростехнадзора от 25 июня 2015 г. № 242 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 27 июля 2015 г., регистрационный № 38209), «Сбор, переработка, хранение и кондиционирование твердых радиоактивных отходов. Требования безопасности» (НП-020-15), утвержденных приказом

Ростехнадзора от 25 июня 2015 г. № 243 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 21 июля 2015 г., регистрационный № 38118), «Захоронение радиоактивных отходов. Принципы, критерии и основные требования безопасности» (НП-055-14), утвержденных приказом Ростехнадзора от 22 августа 2014 г. № 379 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 2 февраля 2015 г., регистрационный № 35819), «Безопасность при обращении с радиоактивными отходами. Общие положения» (НП-058-14), утвержденных приказом Ростехнадзора от 5 августа 2014 г. № 347 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 14 ноября 2014 г., регистрационный № 34701), «Основные правила учета и контроля радиоактивных отходов в организации» (НП-067-16), утвержденных приказом Ростехнадзора от 28 ноября 2016 г. № 503 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 21 декабря 2016 г., регистрационный № 44843), «Приповерхностное захоронение радиоактивных отходов. Требования безопасности» (НП-069-14), утвержденных приказом Ростехнадзора от 6 июня 2014 г. № 249 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 14 августа 2014 г., регистрационный № 33583), «Критерии приемлемости радиоактивных отходов для захоронения» (НП-093-14), утвержденных приказом Ростехнадзора от 15 декабря 2014 г. № 572 (зарегистрировано Министерством юстиции Российской Федерации 27 марта 2015 г., регистрационный № 36592).

2. Руководство по безопасности содержит рекомендации Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору по использованию метода радионуклидных соотношений (метода радионуклидного вектора)[1] для определения удельных активностей сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах, передаваемых на захоронение.

---

[1] Определения данного термина и иных терминов, использованных в настоящем Руководстве по безопасности, приведены в приложении № 1 к настоящему Руководству по безопасности.

3. Действие настоящего Руководства по безопасности распространяется на объекты ядерного топливного цикла (за исключением организаций, осуществляющих деятельность по добыче и переработке урановых руд), специализированные организации по обращению с радиоактивными отходами объектов ядерного топливного цикла, национального оператора по обращению с радиоактивными отходами (далее – НО РАО).

4. Настоящее Руководство по безопасности предназначено для использования специалистами указанных в пункте 3 настоящего Руководства по безопасности организаций при определении удельных активностей сложнодетектируемых радионуклидов в твердых (включая отвержденные, омоноличенные) радиоактивных отходах, в том числе в рамках осуществления контроля их соответствия критериям приемлемости для захоронения. Настоящее Руководство по безопасности может также применяться при осуществлении контроля соответствия критериям приемлемости для захоронения жидких радиоактивных отходов, направляемых на захоронение в пункты глубинного захоронения жидких радиоактивных отходов, при условии их соответствия критериям гомогенности, приведенным в пункте 11 настоящего Руководства по безопасности. Рекомендации настоящего Руководства по безопасности могут быть использованы при разработке методик измерения сложнодетектируемых радионуклидов.

II. Рекомендации по определению применимости метода радионуклидных соотношений

5. Определение применимости метода радионуклидных соотношений рекомендуется осуществлять организациям, в результате деятельности которых образовались радиоактивные отходы, а также специализированным организациям по обращению с радиоактивными отходами.

6. В целях определения применимости метода радионуклидных соотношений рекомендуется:

на основании качественных признаков (похожий механизм образования радиоактивных отходов (далее – РАО), близкий морфологический и радионуклидный состав, одинаковые способы переработки) осуществить выбор РАО, в отношении которых метод радионуклидных соотношений может быть применим;

выполнить отбор проб из выбранных РАО;

методами радиохимического и (или) спектрометрического анализа измерить удельные активности сложнодетектируемых радионуклидов (далее – СДР) и реперных радионуклидов в отобранных пробах с использованием сертифицированных средств измерения, внесенных в реестр средств измерений, и методик, аттестованных в порядке, установленном законодательством в области обеспечения единства измерений.

7. Организациям, в результате деятельности которых образовались РАО, рекомендуется вести базу данных об отобранных пробах РАО и заносить записи в эту базу данных в следующем виде:

номер (шифр) пробы;

реквизиты лаборатории, выполнявшей измерения и оформлявшей протоколы измерений;

номер протокола измерения активности радионуклидов в пробе;

наименование объекта ядерного топливного цикла (ОЯТЦ), завода, цеха, участка и иные сведения, позволяющие однозначно идентифицировать место, где была отобрана проба, и учитывающие особенности ориентирования на ОЯТЦ;

источник образования РАО;

тип РАО (с указанием морфологического состава):

жидкие радиоактивные отходы (далее – ЖРО): гомогенные или гетерогенные, органические или неорганические (малосолевые или высокосолевые), горючие или негорючие;

твердые радиоактивные отходы (далее – ТРО): сжигаемые, измельчаемые, переплавляемые, прессуемые;

дата и время отбора пробы;

дата и время измерения активности радионуклидов в пробе и наименование организации, выполнившей измерения, реквизиты методики измерения, наименование используемого оборудования;

активность радионуклидов (в том числе реперных) в пробе на момент ее отбора с указанием неопределенности измерений, рассчитанная по закону радиоактивного распада относительно момента измерения, предел обнаружения[2] или минимально детектируемая активность по каждому радионуклиду;

влагосодержание для отработавших ионообменных смол и ТРО.

8. Выполнение отбора проб РАО рекомендуется выполнять одним из двух методов:

гомогенизированная выборка;

накопленная выборка.

9. Метод гомогенизированной (усредненной) выборки рекомендуется использовать при отборе проб из гомогенных РАО (РАО, в которых активность радионуклидов равномерно распределена по их объему) либо из гетерогенных РАО, которые поддаются гомогенизации посредством доступных методов подготовки проб к измерениям (далее – методы подготовки композитных проб). В случае если целесообразным является установление масштабирующего коэффициента или параметров линейной регрессии для РАО, содержащихся в совокупности емкостей, в рамках метода гомогенизированной выборки гомогенность РАО рекомендуется обеспечивать посредством смешивания проб в такой пропорции, в которой соотносятся полные массы РАО, содержащихся в этих емкостях. Такой же подход к смешиванию проб рекомендуется использовать в отношении гетерогенных РАО, поддающихся гомогенизации посредством доступных методов подготовки композитных проб.

[2] Здесь и далее термин «предел обнаружения» употребляется в значении, определенном Национальным стандартом Российской Федерации «Контроль объекта аналитический. Термины и определения ГОСТ Р 52361-2005».

10. В качестве РАО, которые могут быть гомогенными[3], рекомендуется рассматривать ЖРО либо ТРО, полученные таким способом переработки или кондиционирования, при котором обеспечивается гомогенизация. Среди РАО, не являющихся гомогенными, методы подготовки композитных проб рекомендуется применять при условии, что отбор проб из емкостей хранения РАО осуществлялся таким образом, что удельные активности радионуклидов, представленные в совокупности проб, охватывают весь диапазон изменения значений удельных активностей радионуклидов в пределах объема РАО, хранящегося в емкости.

11. К гомогенным РАО рекомендуется относить РАО, в которых относительный разброс содержания радионуклидов, определенный по результатам неразрушающих измерений (измерений без осуществления пробоотбора), с доверительной вероятностью 0,95 не превышает 30 %.

12. Метод накопленной выборки[4] рекомендуется использовать при отборе проб из гетерогенных РАО (РАО, не являющихся гомогенными, и (или) содержащих различные твердые компоненты).

13. В качестве РАО, которые могут быть гетерогенными, рекомендуется, в первую очередь, рассматривать такие ТРО, как загрязненные спецодежда, средства индивидуальной защиты, ветошь, резинотехнические изделия, пластикаты, полимерные материалы, отработавшее загрязненное оборудование (в том числе кассетные фильтры).

14. При использовании метода накопленной выборки рекомендуется отбирать пробы таким образом, чтобы диапазоны удельных активностей СДР и реперных радионуклидов отобранных проб охватывали диапазоны, характерные для РАО, известные, например, по результатам производственного радиационного контроля РАО.

---

[3] К таким РАО, в первую очередь, относятся концентраты и отвержденные жидкие РАО.

[4] Отличием метода накопленной выборки от метода гомогенизированной выборки является то, что приемлемая точность определения масштабирующего коэффициента или параметров линейной регрессии и представительность пробоотбора могут быть достигнуты лишь с использованием большого числа проб.

15. При обнаружении среди результатов измерения активностей радионуклидов в пробах РАО статистических выбросов[5] рекомендуется выяснить причину аномалии (например, ошибки при измерении или интерпретации результатов измерений). Если определить причину не представляется возможным, рекомендуется применять методы анализа и очистки данных от статистических выбросов. Пример метода очистки данных от статистических выбросов приведен в приложении № 2 к настоящему Руководству по безопасности.

16. При определении необходимого количества проб рекомендуется руководствоваться принципом, согласно которому число отобранных проб достаточно, если дополнительный отбор и анализ проб не приводят к существенному снижению неопределенности расчета масштабирующих коэффициентов или параметров линейной регрессии. Рекомендации по определению минимального количества проб РАО при применении метода накопленной выборки приведены в приложении № 3 к настоящему Руководству по безопасности.

17. Рекомендуется использовать один из двух способов определения применимости[6] метода радионуклидных соотношений для характеризации РАО по СДР, либо их комбинацию:

выявление наличия в РАО, пробы которых отобраны с учетом рекомендаций пунктов 5 – 16 настоящего Руководства по безопасности, статистической корреляции значений измеренных удельных активностей СДР с измеренными значениями удельных активностей реперных радионуклидов;

---

[5] Здесь и далее термин «статистический выброс» используется в значении термина «выброс», определение которого приведено в ГОСТ Р ИСО 16269-4 – 2017 «Статистические методы. Статистическое представление данных. Часть 4. Выявление и обработка выбросов», утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 10 августа 2017 г. № 865-ст.

[6] Для характеризации РАО, образовавшихся при обращении с отработавшим ядерным топливом (ОЯТ) (в том числе при его радиохимической переработке), в качестве приоритета рекомендуется рассматривать выявление статистической корреляции, а для перерабатываемых РАО, образовавшихся при изготовлении топлива на сублиматном производстве или на производстве по разделению изотопов урана, – нахождение функциональной зависимости, основанной на физических закономерностях.

нахождение функциональной зависимости удельной активности СДР от удельной активности реперного радионуклида, основанной на физических закономерностях.

18. Наличие статистической корреляции рекомендуется считать доказанным, если по итогам выполнения организацией, в результате осуществления деятельности которой образовались РАО, рекомендаций пунктов 19 – 25 настоящего Руководства по безопасности коэффициенты корреляции между удельными активностями СДР и реперных радионуклидов равны или превышают значения целевого ориентира коэффициента корреляции.

19. Рекомендуется рассчитать коэффициент корреляции между удельными активностями пары «СДР – реперный радионуклид» по формуле:

$$R_A = \frac{\sum_{k=1}^{n} A_{r,k} \cdot A_{i,k} - \frac{\left(\sum_{k=1}^{n} A_{r,k}\right) \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} A_{i,k}\right)}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^{n} A_{r,k}^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^{n} A_{r,k}\right)^2}{n}\right) \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} A_{i,k}^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^{n} A_{i,k}\right)^2}{n}\right)}}, \quad (1)$$

где:

$A_{i,k}$ – удельная активность i-го СДР в k-ой пробе РАО;

$A_{r,k}$ – удельная активность реперного радионуклида в k-ой пробе РАО;

n – число проб РАО.

20. Рекомендуется выполнить сопоставление коэффициента корреляции R_A со значением целевого ориентира коэффициента корреляции. В качестве целевого ориентира рекомендуется использовать значение коэффициента корреляции 0,7 и более.

21. В случае если R_A не ниже значения целевого ориентира коэффициента корреляции, рекомендуется определить масштабирующие коэффициенты с использованием метода, применяемого при линейном соотношении между удельными активностями СДР и реперных радионуклидов, в соответствии с пунктом 37 настоящего Руководства по безопасности.

22. В случае если R_A ниже значения целевого ориентира коэффициента корреляции, рекомендуется рассчитать коэффициент корреляции $R_{\ln A}$ между логарифмами удельных активностей СДР и реперных радионуклидов по формуле:

$$R_{\ln A} = \frac{\sum_{k=1}^{n} \ln(A_{r,k}) \cdot \ln(\cdot A_{i,k}) - \frac{\left(\sum_{k=1}^{n} \ln(A_{r,k})\right) \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} \ln(A_{i,k})\right)}{n}}{\sqrt{\left(\sum_{k=1}^{n} \ln(A_{r,k})^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^{n} \ln(A_{r,k})\right)^2}{n}\right) \cdot \left(\sum_{k=1}^{n} \ln(A_{i,k})^2 - \frac{\left(\sum_{k=1}^{n} \ln(A_{i,k})\right)^2}{n}\right)}}. \quad (2)$$

23. В случае если по результатам расчетов, выполненных в соответствии с рекомендациями пункта 22 настоящего Руководства по безопасности, $R_{\ln A}$ не ниже значения целевого ориентира коэффициента корреляции, рекомендуется определить параметры линейной регрессии с использованием метода, применяемого при линейном соотношении между логарифмами удельных активностей СДР и реперных радионуклидов, в соответствии с пунктами 38 – 39 настоящего Руководства по безопасности.

24. Для РАО, в отношении которых применяется метод гомогенизированной выборки, получение значений R_A и $R_{\ln A}$ меньших, чем значение целевого ориентира коэффициента корреляции, рекомендуется рассматривать как свидетельство неприменимости метода радионуклидных соотношений для характеризации РАО по конкретному СДР. В данном случае рекомендуется определить применимость метода радионуклидных соотношений с использованием альтернативного реперного радионуклида (при наличии) или с использованием в качестве такового вспомогательного радионуклида, активность которого коррелирует как с рассматриваемым СДР, так и с одним из радионуклидов, рассматривавшихся в качестве реперных.

25. При получении для РАО, в отношении которых применяется метод накопленной выборки, значений R_A и $R_{\ln A}$ меньших, чем значение целевого ориентира коэффициента корреляции, рекомендуется либо выполнять действия по определению применимости метода радионуклидного вектора, рекомендованные в пункте 24 настоящего Руководства по безопасности, либо

выполнять дальнейший отбор проб РАО до достижения целевого ориентира коэффициента корреляции и, в зависимости от результатов, выполнять рекомендации пунктов 21 или 23 настоящего Руководства по безопасности.

26. Факт установления соотношения реперного радионуклида и СДР рекомендуется оформлять документом, обосновывающим применимость метода радионуклидных соотношений.

27. Для нахождения функциональных зависимостей удельной активности СДР от удельной активности реперного радионуклида, основанных на физических закономерностях, рекомендуется использовать удельные активности СДР и реперных радионуклидов, полученные с использованием:

расчетов, учитывающих цепочки радиоактивного распада, связывающие реперные радионуклиды и СДР, и учитывающих коэффициенты ветвления и постоянные распада радионуклидов, входящих в данные цепочки распада;

балансовых моделей технологических переделов ядерного топливного цикла (далее – ЯТЦ), позволяющих рассчитывать вещественные, элементные и радионуклидные составы потока технологических сред во всех основных продуктах и отходах технологии и учитывающих параметры технологической среды (кислотность, плотность, тепловыделение; удельные активности, растворимости и летучести, содержащихся в ней радионуклидов), а также учитывающих эффективности извлечения из потока технологической среды радионуклидов, характерные для применяемой технологии
(например, эффективность разделения ^{235}U и ^{238}U на конкретном разделительном каскаде);

моделей расчета радионуклидного состава ядерного топлива (с учетом процессов радиационного захвата нейтронов, их неупругого рассеяния, а также радиоактивного распада образующихся радионуклидов), которое

облучено в активной зоне и обращение с которым впоследствии осуществляется на предприятии ядерного топливного цикла (ПЯТЦ)[7].

III. Рекомендации по выбору реперных радионуклидов

28. Выбор радионуклида в качестве реперного[8] для конкретного СДР рекомендуется осуществлять на основе набора приведенных ниже базовых и дополнительных критериев.

29. В качестве базовых критериев отнесения радионуклида к реперному радионуклиду рекомендуется принять следующие критерии:

активность радионуклида в упаковке или в партии РАО может быть измерена с использованием методов неразрушающих измерений (измерений без осуществления пробоотбора);

удельная активность радионуклида в РАО превышает пределы обнаружения, характерные для применяемых средств измерений и методики выполнения измерений, и будет их превышать, как минимум, до момента передачи упаковки (партии) РАО в НО РАО настолько, чтобы точность ее измерения в это время была приемлемой для передачи на захоронение;

есть основания полагать (в том числе с учетом результатов производственного радиационного контроля РАО), что активность радионуклида в РАО коррелирует или связана физической закономерностью с активностью СДР.

30. В качестве дополнительных критериев отнесения радионуклида к реперному радионуклиду рекомендуется принять следующие критерии:

механизмы образования радионуклида и СДР должны быть схожи (как радионуклид, так и СДР являются продуктами активации или продуктами деления);

физико-химические свойства (в частности, растворимость и летучесть) радионуклида и СДР должны быть схожи.

---

[7] Данная рекомендация применима только в отношении РАО, образовавшихся при обращении с ОЯТ.

[8] Список реперных радионуклидов приведен в документе «Strategy and Methodology for Radioactive Waste Characterization IAEA-TECDOC-1537» (технический документ МАГАТЭ № 1537 «Стратегия и методология характеризации радиоактивных отходов»).

31. Радионуклид рекомендуется считать реперным для конкретного СДР, если он удовлетворяет всем базовым критериям и, как минимум, одному из дополнительных критериев.

32. Реперным радионуклидом рекомендуется выбрать тот, использование которого дает наименьшую неопределенность расчета удельной активности СДР.

33. Для остеклованных ЖРО, являющихся продуктом радиохимической переработки ОЯТ, в качестве реперных радионуклидов рекомендуется рассматривать радионуклиды, указанные в приложении № 4 к настоящему Руководству по безопасности.

34. Для технологических ЖРО в виде отработавших ионообменных смол, а также для технологических и нетехнологических перерабатываемых ТРО, образовавшихся при обращении с ОЯТ, за исключением указанных в пункте 33 настоящего Руководства по безопасности, в качестве реперного радионуклида для СДР коррозионного происхождения рекомендуется рассматривать ^{60}Co, а для СДР, являющихся продуктами деления и (или) альфа-излучающими радионуклидами, – ^{137}Cs и (или) ^{60}Co.

35. Для перерабатываемых РАО, образовавшихся при изготовлении топлива, на сублиматном производстве или на производстве по разделению изотопов урана, на которых осуществляется обращение с ураном, содержащим только природные радиоактивные изотопы урана, в качестве реперного радионуклида рекомендуется рассматривать ^{235}U.

36. Для перерабатываемых РАО, образовавшихся при изготовлении топлива, на сублиматном производстве или на производстве по разделению изотопов урана, на которых осуществляется обращение с регенерированным ураном, в качестве реперных радионуклидов рекомендуется рассматривать дочерние продукты распада ^{232}U (например, ^{208}Tl) или ^{235}U.

IV. Метод радионуклидных соотношений

37. При линейном соотношении между удельными активностями СДР и реперных радионуклидов в РАО, выявленном на основе корреляционного

анализа, рекомендуется определить масштабирующий коэффициент по формуле:

$$\overline{K_i} = \exp\left(\frac{1}{\sum_{k=1}^{n}(\frac{1}{u_{K_{i,k}}})^2} \cdot \sum_{k=1}^{n} \frac{\ln(K_{i,k})}{(u_{K_{i,k}})^2}\right), \quad (3)$$

где:

$K_{i,k}$ – соотношения для i-го СДР и реперного радионуклида в k-ой пробе, определяемые по формуле $\frac{A_{i,k}}{A_{r,k}}$;

n – количество проб;

$u_{K_{i,k}}$ – относительная неопределенность результата расчета соотношения для i-го радионуклида в k-ой пробе, определяемая по формуле $u_{K_{i,k}} = \sqrt{(u_{A_{i,k}})^2 + (u_{A_{r,k}})^2}$;

$u_{A_{i,k}}$ и $u_{A_{r,k}}$ – относительные неопределенности измерения удельных активностей СДР и реперного радионуклида в k-ой пробе РАО, определенные с использованием аттестованных методик выполнения измерений.

38. При линейном соотношении между логарифмами удельных активностей СДР и реперных радионуклидов в РАО, выявленном на основе корреляционного анализа, рекомендуется определить параметры α и β линейной регрессии между логарифмами указанных удельных активностей в предположении, что зависимость логарифма удельной активности СДР от логарифма удельной активности реперного радионуклида имеет вид:

$$\ln(A_i) = \alpha + \beta \cdot \ln(A_r), \quad (4)$$

где:

A_i – удельная активность i–го СДР в РАО;

A_r – удельная активность реперного радионуклида в РАО;

α – константа;

β – коэффициент регрессии.

39. В случае если определенная по результатам разрушающего контроля на этапе определения применимости метода радионуклидных соотношений неопределенность измерения активности реперных радионуклидов существенно меньше неопределенности измерения СДР, то для целей определения зависимости логарифма удельной активности СДР от логарифма удельной активности реперного радионуклида в РАО расчет параметров линейной регрессии рекомендуется выполнять с использованием стандартного метода наименьших квадратов в соответствии с рекомендациями, приведенными в приложении № 5 к настоящему Руководству по безопасности. В остальных случаях расчет параметров линейной регрессии для определения зависимости логарифма удельной активности СДР от логарифма удельной активности реперного радионуклида в РАО рекомендуется выполнять с использованием метода Ньютона-Рафсона в соответствии с рекомендациями, приведенными в приложении № 6 к настоящему Руководству по безопасности.

40. Для обеспечения достоверности результатов определения радионуклидного состава и удельных активностей радионуклидов в РАО методом радионуклидных соотношений рекомендуется проводить его периодическую актуализацию, заключающуюся в корректировке масштабирующего коэффициента или параметров линейной регрессии с учетом удельных активностей СДР и реперных радионуклидов в РАО, измеренных с использованием методов радиохимического и (или) спектрометрического анализа в течение года, отсчитанного от даты определения масштабирующего коэффициента или параметров линейной регрессии, подлежащих актуализации.

41. При изменении технологии, использовании новых типов сырья рекомендуется проводить внеочередную актуализацию.

IV. Применение масштабирующего коэффициента или параметров линейной регрессии для определения удельной активности сложнодетектируемых радионуклидов в радиоактивных отходах, передаваемых на захоронение

42. При выявленном на основе корреляционного анализа линейном соотношении между удельными активностями СДР и реперного радионуклида в РАО рекомендуется определять удельную активность СДР в упаковке (партии) РАО по формуле:

$$A_i = \overline{K_i} \cdot A_r \,, \tag{5}$$

где:

A_i – удельная активность i-го СДР в РАО;

$\overline{K_i}$ – масштабирующий коэффициент для i-го СДР в РАО, рассчитанный по формуле (3) настоящего Руководства по безопасности;

A_r – удельная активность реперного радионуклида в упаковке или в партии РАО, определенная методами неразрушающих измерений (измерений без осуществления пробоотбора).

43. Относительную неопределенность расчета удельной активности СДР в упаковке (партии) РАО по формуле (5) настоящего Руководства по безопасности рекомендуется рассчитывать с использованием формулы:

$$u_{A_i} = \sqrt{\left(A_r \cdot u_{\overline{K_i}}\right)^2 + \left(\overline{K_i} \cdot u_{A_r}\right)^2}, \tag{6}$$

где:

$u_{\overline{K_i}}$ – относительная неопределенность масштабирующего коэффициента $\overline{K_i}$, рассчитанная по формулам (7) – (13) настоящего Руководства по безопасности;

u_{A_r} – относительная неопределенность определения удельной активности реперного радионуклида в упаковке (партии) РАО методами неразрушающих измерений (измерений без осуществления пробоотбора).

44. Относительную неопределенность масштабирующего коэффициента $u_{\overline{K_i}}$ рекомендуется рассчитывать по формулам:

$$u_{\overline{K_i}} = \sqrt{I_1 + I_2 + I_3 + I_4 + I_5 + I_6}\,; \tag{7}$$

$$I_1 = \sum_{k=2}^{n-1}\left[\left[\prod_{p=1}^{k-1}\left(\frac{A_{i,p}}{A_{r,p}}\right)^{g_p}\cdot\prod_{p=k+1}^{n}\left(\frac{A_{i,p}}{A_{r,p}}\right)^{g_p}\right]\cdot\frac{g_k}{(A_{r,k})^{g_k}}\cdot(A_{i,k})^{g_k-1}\right]^2\cdot\left(u_{A_{i,k}}\right)^2; \tag{8}$$

$$I_2 = \sum_{k=2}^{n-1}\left[\left[\prod_{p=1}^{k-1}\left(\frac{A_{i,p}}{A_{r,p}}\right)^{g_p}\cdot\prod_{p=k+1}^{n}\left(\frac{A_{i,p}}{A_{r,p}}\right)^{g_p}\right]\cdot g_k\cdot(A_{i,k})^{g_k}\cdot(A_{r,k})^{-(g_k+1)}\right]^2\cdot\left(u_{A_{r,k}}\right)^2; \tag{9}$$

$$I_3 = \left[\left[\prod_{p=2}^{n}\left(\frac{A_{i,p}}{A_{r,p}}\right)^{g_p}\right]\cdot\frac{g_1}{(A_{r,1})^{g_1}}\cdot(A_{i,1})^{g_1-1}\right]^2\cdot\left(u_{A_{i,1}}\right)^2; \tag{10}$$

$$I_4 = \left[\left[\prod_{p=1}^{n-1}\left(\frac{A_{i,p}}{A_{r,p}}\right)^{g_p}\right]\cdot\frac{g_n}{(A_{r,n})^{g_n}}\cdot(A_{i,n})^{g_n-1}\right]^2\cdot\left(u_{A_{i,n}}\right)^2; \tag{11}$$

$$I_5 = \left[\left[\prod_{p=2}^{n}\left(\frac{A_{i,p}}{A_{r,p}}\right)^{g_p}\right]\cdot g_1\cdot(A_{i,1})^{g_1}\cdot(A_{r,1})^{-(g_1+1)}\right]^2\cdot\left(u_{A_{r,1}}\right)^2; \tag{12}$$

$$I_6 = \left[\left[\prod_{p=1}^{n-1}\left(\frac{A_{i,p}}{A_{r,p}}\right)^{g_p}\right]\cdot g_n\cdot(A_{i,n})^{g_1}\cdot(A_{r,n})^{-(g_n+1)}\right]^2\cdot\left(u_{A_{r,n}}\right)^2, \tag{13}$$

где:

g_1, g_k, g_n, g_p – параметры, рассчитываемые по формуле вида $\left(u_{K_{i,t}}\right)^{-2}$, где $u_{K_{i,t}} = \sqrt{\left(u_{A_{i,t}}\right)^2 + \left(u_{A_{r,t}}\right)^2}$, а индекс t принимает значения 1 (один), k, n или p.

45. При выявленном на основе корреляционного анализа линейном соотношении между логарифмами удельных активностей СДР и реперного радионуклида в РАО рекомендуется определять удельную активность СДР в упаковке (партии) РАО по формуле:

$$A_i = e^{\alpha}\cdot(A_r)^{\beta}, \tag{14}$$

где:

α и β – константа и коэффициент регрессии, определенные с использованием стандартного метода наименьших квадратов или метода Ньютона-Рафсона в соответствии с рекомендациями пункта 39 настоящего Руководства по безопасности;

e – число Эйлера, равное 2,718.

46. Для расчета относительной неопределенности удельной активности СДР в упаковке (партии) РАО по формуле (14) настоящего Руководства по безопасности рекомендуется учитывать, что константа α и коэффициент регрессии β являются функциями переменных, количество которых равно $2 \cdot n$ и определяется количеством отобранных проб РАО (n), а сами переменные представляют собой удельные активности i-го СДР в k-ой пробе РАО ($A_{i,k}$) и удельные активности реперного радионуклида в k-ой пробе РАО ($A_{r,k}$). Учитывая, таким образом, что $\alpha = \alpha(A_{i,1,\dots}, A_{i,n}, A_{r,1,\dots}, A_{r,n})$, $\beta = \beta(A_{i,1,\dots}, A_{i,n}, A_{r,1,\dots}, A_{r,n})$, а также, что $A_i = A_i(A_{i,1,\dots}, A_{i,n}, A_{r,1,\dots}, A_{r,n}, A_r)$, относительную неопределенность расчета удельной активности СДР в упаковке (партии) РАО рекомендуется рассчитывать по формуле[9]:

$$u_{A_i} = \sqrt{\sum_{m=1}^{n}\left(u_{A_{i,m}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\partial A_i}{\partial A_{i,m}}\right)^2 + \sum_{m=1}^{n}\left(u_{A_{r,m}}\right)^2 \cdot \left(\frac{\partial A_i}{\partial A_{r,m}}\right)^2 + \left(u_{A_r}\right)^2 \cdot \beta^2 \cdot e^{2\alpha} \cdot (A_r)^{2(\beta-1)}}, \quad (15)$$

где:

n – количество проб РАО;

m – переменная суммирования;

$\frac{\partial A_i}{\partial A_{i,m}}, \frac{\partial A_i}{\partial A_{r,m}}$ – частные производные от функции $A_i(A_{i,1,\dots}, A_{i,n}, A_{r,1,\dots}, A_{r,n}, A_r)$, задаваемой формулой (14) настоящего руководства по безопасности по переменным $A_{i,m}$ и $A_{r,m}$, соответственно;

u_{A_r} – относительная неопределенность определения удельной активности

[9] Формула получена на основе подхода к расчету неопределенности измерения, установленного в ГОСТ 34100.3-2017/ISO/IEC Guide 98-3:2008 «Неопределенность измерения. Часть 3. Руководство по выражению неопределенности измерения», введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 12 сентября 2017 г. № 1065-ст.

реперного радионуклида в упаковке (партии) РАО методами неразрушающих измерений (измерений без осуществления пробоотбора);

$u_{A_{i,m}}$ – относительная неопределенность измерения удельной активности i-го СДР в m-ой пробе РАО;

$u_{A_{r,m}}$ – относительная неопределенность измерения удельной активности реперного радионуклида в m-ой пробе РАО.

47. При выявленной на основе рекомендаций, приведенных в пункте 27 настоящего Руководства по безопасности, функциональной зависимости удельной активности СДР от удельной активности реперного радионуклида, основанной на физических закономерностях, рекомендуется определять удельную активность СДР в упаковке (партии) РАО с использованием зависимости вида:

$$A_i = f(A_r)\,, \tag{16}$$

где:

$f(A_r)$ – функциональная зависимость удельной активности СДР от удельной активности реперного радионуклида в упаковке (партии) РАО, определенной методами неразрушающих измерений (измерений без осуществления пробоотбора).

48. Точность расчета удельной активности СДР в упаковке (партии) РАО по формулам (5) – (15) настоящего Руководства по безопасности рекомендуется считать неприемлемой, если отклонение расчетного значения от определенного методами разрушающего контроля превышает один порядок величины.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 1
к руководству по безопасности при
использовании атомной энергии
«Рекомендации по применению метода
радионуклидных соотношений для определения
содержания сложнодетектируемых
радионуклидов в радиоактивных отходах
предприятий ядерного топливного цикла»,
утвержденному приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «04» апреля 2019 г. № 138

Термины и определения

1. **Масштабирующий коэффициент** – коэффициент прямой пропорциональной зависимости между удельной активностью сложнодетектируемого радионуклида и удельной активностью реперного радионуклида в РАО.

2. **Метод радионуклидных соотношений (метод радионуклидного вектора)** – совокупность подходов к построению функциональной зависимости между активностью сложнодетектируемых радионуклидов и активностью реперных радионуклидов в РАО, основанных на выявлении статистических корреляций между указанными активностями или на физических закономерностях, обуславливающих эту зависимость.

3. **Метод гомогенизированной (усредненной) выборки** – метод формирования совокупности проб из РАО, результаты измерения активности радионуклидов в которых используются для определения масштабирующего коэффициента или параметров линейной регрессии, при котором приемлемая точность данных характеристик обеспечивается либо посредством отбора проб из РАО, активность радионуклидов в которых равномерно распределена по массе их содержимого, либо с использованием методов пробоотбора, обеспечивающих равномерность распределения активности радионуклидов по массе проб.

4. **Метод накопленной выборки** – метод формирования совокупности проб РАО, результаты измерения активности радионуклидов в которых используются для определения масштабирующего коэффициента или параметров линейной регрессии, при котором приемлемая точность данных значений обеспечивается посредством отбора проб в количестве, достаточном для ее достижения, а обеспечение приемлемой точности – способами, характерными для метода гомогенизированной выборки, – невозможно.

5. **Реперный радионуклид** – излучающий фотонное или нейтронное ионизирующие излучения радионуклид, активность которого в РАО статистически коррелирует или связана на основании физической закономерности с активностью сложнодетектируемого радионуклида и при этом может быть измерена в упаковке (партии) этих РАО методами неразрушающих измерений (измерений без осуществления пробоотбора).

6. **Сложнодетектируемый радионуклид** – радионуклид, активность которого в РАО подлежит контролю в соответствии с нормативными правовыми актами, устанавливающими требования по безопасному обращению с РАО, и активность которого в упаковке (партии) РАО не может быть определена без использования методов разрушающего контроля.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 2
к руководству по безопасности при
использовании атомной энергии
«Рекомендации по применению метода
радионуклидных соотношений для определения
содержания сложнодетектируемых
радионуклидов в радиоактивных отходах
предприятий ядерного топливного цикла»,
утвержденному приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «04» апреля 2019 г. № 137

Пример метода очистки данных от статистических выбросов

Ниже приведен пример метода очистки результатов измерения удельных активностей СДР и реперных радионуклидов в РАО от статистических выбросов по критерию Граббса.

1. Результаты измерения удельных активностей конкретного радионуклида r выстраиваются по возрастанию (от меньшего к большему) в виде $A_{m,r}^{(1)} \le A_{m,r}^{(2)} \le \cdots \le A_{m,r}^{(n)}$, где n – число результатов измерения в выборке, а $i \in [1, n]$.

2. Экспертно определяется максимально возможная доля, g, статистических выбросов в выборке, например 0,05. Указанный параметр значит, что число статистических выбросов в выборке будет меньше или равно $g \cdot n$.

3. Выстраивается ряд разностей $\Delta_i = A_{m,r}^{(i+1)} - A_{m,r}^{(i)}$. В результате получается n-1 положительных элементов в последовательности $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_{n-1}$.

4. С учетом результатов, полученных в пункте 3, находится максимальная разность $max\ \Delta_{i'}$, где i' – индекс, соответствующий максимальной разности из последовательности $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_{n-1}$.

5. Выполняется проверка, попадает ли выброс в заданную в пункте 2 область. Если $i' \ge n \cdot g$ и одновременно $i' \le n - n \cdot g$, то статистические

выбросы в выборке отсутствуют и проверка прекращается. В противном случае элемент с индексом i' возможно является статистическим выбросом. В таком случае выполняются следующие действия.

6. Из начальной последовательности элементов $\Delta_1, \Delta_2, \dots, \Delta_{n-1}$ извлекается подпоследовательность $\Delta_{i'}, \dots, \Delta_{n-1}$ (если $i' < n \cdot g$) или $\Delta_1, \dots, \Delta_{i'}$ если ($i' > n - n \cdot g$).

7. С учетом набора индексов, характерных для подпоследовательностей, определенных в пункте 6, рассчитывается среднее значение выборки $\Delta_1^{'} = \frac{1}{n'} \cdot \sum_{k=i'}^{n-1} k \cdot \Delta_k$ или $\Delta_2^{'} = \frac{1}{n'} \cdot \sum_{k=1}^{i'} k \cdot \Delta_k$, а также среднеквадратичное отклонение $s_1^2 = \frac{1}{n'-1} \cdot \sum_{k=i'}^{n-1} k \cdot \left(\Delta_k - \Delta_1^{'}\right)^2$ или $s_2^2 = \frac{1}{n'-1} \cdot \sum_{k=1}^{i'} k \cdot \left(\Delta_k - \Delta_2^{'}\right)^2$, где n' – число элементов в извлеченной подпоследовательности.

8. Рассчитывается значение статистики Граббса $G_{i'}^1 = \frac{\left|\Delta_1^{'} - \Delta_{i'}\right|}{s_1}$ или $G_{i'}^2 = \frac{\left|\Delta_2^{'} - \Delta_{i'}\right|}{s_2}$.

9. Задается уровень значимости (величины вероятности ошибки) α. Рекомендуется задать уровень 5 %.

10. По значению уровня значимости α и числу элементов в подпоследовательности n' с использованием таблиц Граббса[1] определяется критическое значение $G_{\alpha,n'}$.

11. Выполняется сравнение $G_{i'}^1$ или $G_{i'}^2$ с $G_{\alpha,n'}$. Если $G_{i'}^1 < G_{\alpha,n'}$ или $G_{i'}^2 < G_{\alpha,n'}$, то большее значение $A_{m,r}$ из разности $\Delta_{i'}$ не является статистическим выбросом и в последовательности $A_{m,r}^{(1)} \le A_{m,r}^{(2)} \le \dots \le A_{m,r}^{(n)}$ статистические выбросы отсутствуют. Если $G_{i'}^1 > G_{\alpha,n'}$ или $G_{i'}^2 > G_{\alpha,n'}$, то большее значение $A_{m,r}$ из разности $\Delta_{i'}$ является статистическим выбросом.

[1] Приведены в ГОСТ Р 8.736-2011 «Государственная система обеспечения единства измерений (ГСИ). Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения», утвержден и введен в действие приказом Федерального агентства по техническому регулирвоанию и метрологии от 13 декабря 2011 г. № 1045-ст.

В этом случае, если $\Delta_{i'}$ принадлежит подпоследовательности $\Delta_1, \Delta_2, \ldots, \Delta_{i'}$, то все значения, идущие до него, являются статистическими выбросами, а если $\Delta_{i'}$ принадлежит подпоследовательности $\Delta_{i'}, \ldots, \Delta_{n-1}$, то все значения, идущие после него, являются статистическими выбросами.

12. Если согласно пункту 11 обнаружен выброс, то из выборки $A_{m,r}^{(1)} \leq A_{m,r}^{(2)} \leq \cdots \leq A_{m,r}^{(n)}$ исключаются выбросы, а весь алгоритм повторяется с пункта 1 до тех пор, пока выбросы перестанут обнаруживаться.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 3
к руководству по безопасности при
использовании атомной энергии
«Рекомендации по применению метода
радионуклидных соотношений для определения
содержания сложнодетектируемых
радионуклидов в радиоактивных отходах
предприятий ядерного топливного цикла»,
утвержденному приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «04» апреля 2019 г. № 134

Рекомендации по определению минимального количества проб радиоактивных отходов при применении метода накопленной выборки

1. Для определения минимального количества проб РАО при применении метода накопленной выборки рекомендуется руководствоваться таблицей № 1 настоящего приложения.

Таблица № 1

Количества проб РАО и соответствующие им целевые значения коэффициентов корреляции по Пирсону

Количество проб	**Целевое значение коэффициента корреляции**
20	0,95
25	0,9
30	0,8
35	0,7

2. Минимальное количество проб РАО рекомендуется определять с использованием рекомендаций, приведенных далее.

3. Первоначально рекомендуется отобрать минимальное количество проб РАО, указанное в таблице № 1 настоящего приложения.

4. В случае если соответствующее значение коэффициента корреляции, полученное с использованием результатов измерения активности СДР и предполагаемого реперного радионуклида не достигнуто, рекомендуется отбирать дополнительное количество проб в соответствии с таблицей № 1 настоящего приложения вплоть до достижения соответствующего значения коэффициента корреляции.

5. При невозможности достижения минимального в соответствии с таблицей № 1 настоящего приложения значения коэффициента корреляции (минимального значения целевого ориентира коэффициента корреляции) рекомендуется выполнение действий, предусмотренных пунктом 27 настоящего Руководства безопасности.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 4
к руководству по безопасности при
использовании атомной энергии
«Рекомендации по применению метода
радионуклидных соотношений для определения
содержания сложнодетектируемых
радионуклидов в радиоактивных отходах
предприятий ядерного топливного цикла»,
утвержденному приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «04» апреля 2019 г. № 137

Радионуклиды, рекомендуемые к рассмотрению в качестве реперных для остеклованных жидких радиоактивных отходов, являющихся продуктом радиохимической переработки отработавшего ядерного топлива

Сложнодетектируемые радионуклиды	Реперный радионуклид
^{55}Fe, ^{58}Co, ^{59}Ni, ^{63}Ni	^{60}Co[1]
$^{106}(Ru+Rh)$	^{103}Ru
^{144}Ce, ^{147}Pm, ^{151}Sm, ^{155}Eu	^{154}Eu
^{135}Cs, ^{136}Cs	^{137}Cs, ^{244}Cm[2, 3]
^{244}Cm, ^{243}Cm, ^{242}Cm, ^{242m}Am, ^{243}Am	^{137}Cs, ^{241}Am[2, 4]
^{3}H, ^{14}C, ^{99}Tc, ^{235}U, ^{129}I, ^{239}Pu, ^{241}Am	^{244}Cm[3]

[1] Различия примесных концентраций в материале могут привести к значительной неопределенности отношений активностей.

[2] Радионуклид применяется в качестве реперного в случае невозможности применения в качестве такового ^{137}Cs.

[3] Активность ^{244}Cm определяется по нейтронам спонтанного деления.

[4] Гамма-спектрометрические измерения выполняются по низкоэнергетической линии 59,6 кэВ.

ПРИЛОЖЕНИЕ № 5
к руководству по безопасности при
использовании атомной энергии
«Рекомендации по применению метода
радионуклидных соотношений для определения
содержания сложнодетектируемых
радионуклидов в радиоактивных отходах
предприятий ядерного топливного цикла»,
утвержденному приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «04» апреля 2019 г. № 137

Рекомендуемый метод расчета параметров линейной регрессии для определения зависимости логарифма удельной активности сложнодетектируемого радионуклида от логарифма удельной активности реперного радионуклида в радиоактивных отходах с использованием стандартного метода наименьших квадратов

1. Значение коэффициента регрессии β ищется методом наименьших квадратов по формуле (1):

$$\beta = \frac{C - A \cdot B}{D}. \quad (1)$$

2. Параметры A, B, C, D, необходимые для расчета β, определяются по формулам (2) – (5):

$$A = \frac{\sum_{k=1}^{n} ln(A_{r,k})}{n}; \quad (2)$$

$$B = \frac{\sum_{k=1}^{n} ln(A_{i,k})}{n}; \quad (3)$$

$$C = \frac{\sum_{k=1}^{n} ln(A_{i,k}) \cdot ln(A_{r,k})}{n}; \quad (4)$$

$$D = \frac{\sum_{k=1}^{n} ln(A_{r,k})^2}{n} - \frac{\left[\sum_{k=1}^{n} ln(A_{r,k})\right]^2}{n^2}, \quad (5)$$

где:

$A_{r,k}$ – активность реперного радионуклида в к-ой пробе;

$A_{i,k}$ – активность СДР в к-ой пробе;

n – общее количество проб;

k – номер пробы.

3. Константа α рассчитывается по формуле:

$$\alpha = B - \beta \cdot A. \quad (6)$$

ПРИЛОЖЕНИЕ № 6
к руководству по безопасности при
использовании атомной энергии
«Рекомендации по применению метода
радионуклидных соотношений для определения
содержания сложнодетектируемых
радионуклидов в радиоактивных отходах
предприятий ядерного топливного цикла»,
утвержденному приказом Федеральной службы
по экологическому, технологическому
и атомному надзору
от «04» апреля 2019 г. № 137

Рекомендуемый метод расчета параметров линейной регрессии для определения зависимости логарифма удельной активности сложнодетектируемого радионуклида от логарифма удельной активности реперного радионуклида в радиоактивных отходах с использованием метода Ньютона-Рафсона

1. Значение коэффициента регрессии β ищется методом итерационных приближений с использованием формулы (1) настоящего приложения до прекращения значимого прироста значений β. При этом фиксируются номер итерации M, на которой данное условие достигнуто, и достигнутое значение β_M.

$$\beta_{m+1} = \beta_m + \frac{F(\beta_m)}{C(\beta_m)}, \quad (1)$$

где:

$F(\beta_m)$ определяется по формуле (2) настоящего приложения;

$C(\beta_m)$ – производная по β от $F(\beta)$;

m – номер итерации.

2. Зависимость $F(\beta)$ определяется по формуле:

$$F(\beta) = \sum_{k=1}^{n} w_k^2 \cdot \left[\beta \cdot \left(\frac{q_k^2}{u_k} - \frac{p_k^2}{v_k}\right) + \left(\frac{1}{v_k} - \frac{\beta^2}{u_k}\right) \cdot q_k \cdot p_k\right], \quad (2)$$

где:

w_k – рассчитывается по формуле $\frac{1}{s_k^2}$;

s_k^2 – рассчитывается по формуле $s_{\ln(A_i),k}^2 + \left(\beta \cdot s_{\ln(A_r),k}\right)^2$;

p_k и q_k – рассчитываются по формулам $\ln(A_{r,k}) - \overline{\ln(A_r)}$ и $\ln(A_{i,k}) - \overline{\ln(A_i)}$, соответственно;

u_k и v_k – рассчитываются по формулам $\frac{1}{s_{\ln(A_r),k}^2}$ и $\frac{1}{s_{\ln(A_i),k}^2}$;

$A_{r,k}$ – удельная активность реперного радионуклида в k-ой пробе РАО;

$A_{i,k}$ – удельная активность i-го СДР в k-ой пробе РАО;

n – число проб РАО.

3. Значения $\overline{\ln(A_r)}$ и $\overline{\ln(A_i)}$ рассчитываются с использованием формул:

$$\overline{\ln(A_r)} = \frac{1}{w} \cdot \sum_{k=1}^{n} w_k \cdot \ln(A_{r,k}) ;$$

$$\overline{\ln(A_i)} = \frac{1}{w} \cdot \sum_{k=1}^{n} w_k \cdot \ln(A_{i,k}) ,$$

где w – рассчитывается по формуле $\sum_{k=1}^{n} w_k$.

4. Значения $s_{\ln(A_r),k}^2$ и $s_{\ln(A_i),k}^2$ определяются по формулам:

$$s_{\ln(A_r),k}^2 = \frac{s_{A_r,k}^2}{A_{r,k}^2} ; \quad (3)$$

$$s_{\ln(A_i),k}^2 = \frac{s_{A_i,k}^2}{A_{i,k}^2} , \quad (4)$$

где $s_{A_r,k}^2$ и $s_{A_i,k}^2$ – абсолютные неопределенности измерения удельных активностей СДР и реперного радионуклида в k-ой пробе РАО, соответственно, определенные с использованием аттестованных методик выполнения измерений.

5. Значение $\ln(\alpha)$ рассчитывается с использованием формулы:

$$\ln(\alpha) = \overline{\ln(A_i)} - \beta_M \cdot \overline{\ln(A_r)}. \quad (5)$$

gost.e-ecolog.ru