

ОТЗЫВ

официального оппонента Ключкова Владимира Николаевича, доктора технических наук, доцента
о диссертационной работе Назарова Евгения Игоревича
«Совершенствование методов обоснования радиационной безопасности от выброса углерода-14 при нормальной эксплуатации предприятий атомной отрасли»,
представленной на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности «2.4.9. Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность»

Соискатель ученой степени кандидата технических наук Е.И. Назаров представил диссертацию в виде специально подготовленной рукописи, написанной единолично. Работа выполнена на кафедре экспериментальной физики Физико-технологического института в Федеральном государственном автономном образовательном учреждении высшего образования «Уральский федеральный университет имени первого Президента России Б. Н. Ельцина».

Диссертантом сформулирована **цель работы** - совершенствование системы мониторинга текущих выбросов и ретроспективной оценки поступления ^{14}C в атмосферу при нормальной эксплуатации предприятий атомной отрасли.

Для достижения поставленной цели диссертантом определены три задачи:

1) модификация метода и разработка специального пробоотборного стенда одновременного отбора ^{14}C в различных химических соединениях в выбросах предприятий атомной отрасли;

2) разработка метода ретроспективной оценки годового выброса ^{14}C ядерными реакторами различного типа с учетом различных химических соединений радиоуглерода;

3) проведение исследований по ретроспективной оценке годовых эффективных доз облучения населения в результате выброса ^{14}C с учетом пищевой корзины населения, проживающего вблизи источника выброса – в качестве апробации разработанной методологии и получения радиационно-гигиенической оценки значимости выброса ^{14}C .

Актуальность диссертационной работы.

Углерод-14 с периодом полураспада 5730 лет – природный радионуклид, который образуется в верхних слоях атмосферы в результате ядерных реакций под действием космического излучения. Его вклад в стабильный углерод в течение многих столетий менялся очень медленно (на уровне 240 Бк/г), что дало возможность реализовать методику радиоуглеродного анализа возраста различных исторических находок. В период ядерных испытаний в атмосфере вклад углерода-14 вырос почти вдвое, но затем, после прекращения ядерных взрывов в атмосфере, за прошедшие примерно 60 лет вклад углерода-14 вернулся к прежнему

стабильному уровню, что свидетельствует об интенсивном процессе углеродного обмена в природе, главным образом, с океаном.

В настоящее время заметный вклад в генерацию углерода-14 дает ядерная энергетика. Вклад углерода-14 в выбросы и сбросы радиационных объектов 20-40 лет назад был незначительным на фоне других радионуклидов (цезия-137, кобальта-60, рутения-106 и др.). Но огромный прогресс в технологиях очистки воздушных и водных сред позволил на порядки снизить объемную активность аэрозолей в воздушных выбросах и удельную активность радионуклидов в жидких сбросах. Поскольку углерод-14 выбрасывается в виде газообразных соединений CO_2 , CO , CH_4 и др., промышленной технологии очистки этих сред от углерода-14 в настоящее время не существует.

Указанные обстоятельства повысили относительную значимость углерода-14 в выбросах и сбросах, что отражено во включении углерода-14 в Распоряжение Правительства РФ от 08.07.2015 № 1316-р «Об утверждении перечня загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды».

В этих условиях диссертация Е.И. Назарова, имеющая целью совершенствование системы мониторинга текущих выбросов и ретроспективной оценки поступления ^{14}C в атмосферу при нормальной эксплуатации предприятий атомной отрасли, безусловно является актуальной.

Структура и основное содержание работы.

Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, заключения, списков терминов и определений, сокращений и обозначений и списка литературы. Работа изложена на 115 страницах текста, содержит 27 таблиц, 30 рисунков, 2 приложения. Список литературы включает 80 источников.

Во **введении** представлены обязательные для диссертации сведения об актуальности темы диссертационной работы, сформулированы цель и задачи исследований, отражены теоретическая и практическая значимость, научная новизна полученных результатов, представлены положения, выносимые на защиту.

Первая глава диссертации является литературным обзором, в котором на основе анализа более 70 публикаций диссертант продемонстрировал хорошее владение научно-технической информацией по теме исследований, а также обосновал актуальность исследований и их главное направление: мониторинг углерода в выбросах радиационных объектов в форме различных химических соединений.

Во **второй главе** диссертации описана разработка стенда, позволяющего проводить отбор органических и неорганических соединений углерода-14 путем барботажа газовой смеси через барботеры с жидкостью.

В **третьей главе** изложен метод, позволяющий впервые выполнить ретроспективную оценку выброса углерода-14 на всем жизненном цикле

радиационного объекта. В основе метода лежит достаточно широко применяемый метод анализа содержания углерода-14 в окружающей среде по годичным кольцам деревьев. Применение этого метода для решения задачи ретроспективной оценки выброса углерода-14 в результате деятельности АЭС является новым. Для этого метод модифицирован, обоснован процесс отбора проб и проведения измерений методом ускорительной масс-спектрометрии.

В четвертой главе диссертации представлены ретроспективные оценки годовых эффективных доз в результате выброса углерода-14 предприятиями атомной отрасли. Очень важным представляется вывод о значительном вкладе органических соединений углерода-14 в суммарную активность выброса. Не учет органических соединений газообразного углерода-14 может привести к неадекватной оценке годовых эффективных доз облучения населения. Поэтому рецензируемая работа, которая направлена на измерение и органических, и неорганических соединений углерода-14, является значительным шагом вперед в деле совершенствования контроля выбросов углерода-14 предприятиями атомной энергетики и промышленности.

Анализ положений на защиту

Диссертант выносит на защиту три положения:

1. Разработанный пробоотборный стенд обеспечивает отдельный отбор газообразного ^{14}C в форме органических и неорганических соединений. Доля регистрируемых органических соединений ^{14}C в выбросах исследовательского ядерного реактора составляет от 30 до 84 %.

2. Разработанные и используемые в работе приборные и методические подходы определения удельной активности и химических соединений ^{14}C позволили впервые выполнить ретроспективную оценку годового выброса радиоуглерода на протяжении всего жизненного цикла предприятия атомной отрасли.

3. Выполненный анализ показал, что при использовании подхода, учитывающего корзину питания региона, значения годовых эффективных доз от выброса радиоуглерода не превышают 10 мкЗв от прошедшей деятельности рассмотренных предприятий атомной отрасли.

Научная новизна полученных результатов

1. Новым является специальный пробоотборный стенд, позволяющий выполнять одновременный отдельный отбор $^{14}\text{CO}_2$, ^{14}CO и органических соединений ^{14}C . Возможность регулировки температурного режима каталитической установки позволяет производить отбор широкого спектра органических соединений ^{14}C .

2. Впервые предложен и реализован метод ретроспективной оценки выброса ^{14}C ядерными реакторами различного типа за любой период эксплуатации. Хотя метод основан на известном подходе к анализу содержания радиоуглерода в годичных кольцах древесной растительности, диссертантом разработан ряд новых элементов по выбору представительных

точек пробоотбора на территории потенциального воздействия радиационного объекта, учету метеорологических условий, формирующих загрязнение атмосферы; отбору различных химических соединений ^{14}C .

3. Впервые опробована ретроспективная оценка годовой эффективной дозы облучения населения от выброса ^{14}C за любой период эксплуатации ядерного реактора. Метод позволяет оценить дозу облучения с учетом реальной корзины питания исследуемого региона, метеорологических условий, формирующих загрязнение атмосферы, химических соединений газообразного ^{14}C .

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается использованием аттестованных и поверенных средств измерения, представительным объемом выполненных измерений, хорошей корреляцией результатов теоретических расчетов с результатами модельных экспериментов и с результатами измерения содержания углерода-14 в пробах природных материалов.

Научная и практическая значимость работы не вызывает сомнений, т.к. в ходе выполненной научно работы разработан метод оценки содержания углерода-14 в различных средах, в том числе в воздухе, в выбросах, а также в растительности (годовые кольца деревьев). Метод реализован в виде пробоотборного стенда и комплекса приборов для измерения активности углерода-14 в пробах, включая современный жидкостной сцинтилляционный спектрометр Quantulus-1220.

Научно-методическая разработка применена для оценки радиационного воздействия на население выброса углерода-14 в процессе эксплуатации ядерных реакторных установок, в том числе в период выполнения ремонтных работ по замене графитовой кладки активной зоны реакторов типа РБМК Курской АЭС.

Полнота представления основных результатов диссертации в рецензируемых научных изданиях. Основное содержание работы опубликовано в статье в рецензируемых научных журналах, определенных ВАК РФ и Аттестационным советом УрФУ: Известия вузов. Физика. – 2018; Instruments and Experimental Techniques. – 2021; Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedeniy, Yadernaya Energetika. – 2022 (Известия Высших учебных заведений, Ядерная энергетика – Россия, Обнинск); Atomic Energy. – 2023; Nuclear Engineering and Technology – 2023.

По мнению оппонента к основным публикациям следует приравнять аналог патента в области IT-технологий - Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668701 от 31.08.2023. Программное обеспечение для ретроспективной оценки годовых эффективных доз от выброса C-14 // Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2023668701. 2023. / Назаров Е.И., Екидин Ар.А.

К сожалению, конкретные данные об этом свидетельстве приведены только в автореферате диссертации, но в тексте диссертации отсутствуют.

Диссертанту также следует подумать над подачей заявки на патент по новым научным и методическим аспектам разработанной методологии пробоотбора сред, содержащих углерод-14, выбора географических точек отбора проб древесины и определения содержания углерода-14 в годичных кольцах. Материалы диссертации позволяют претендовать на патент в этой области.

Кроме того, результаты исследований были представлены на 11 международных и российских научных конференциях и опубликованы в сборниках докладов/тезисов докладов.

Содержание автореферата диссертации объективно раскрывает содержание диссертации.

В целом, диссертация выполнена на высоком научном и методическом уровне и решает ряд очень актуальных практических вопросов. Однако необходимо указать на **ряд недостатков**:

1. Существенной неточностью является интерпретация содержания углерода-14 в годовых кольцах деревьев в качестве величины, непосредственно коррелирующей с выбросом углерода-14 атомной станцией или другим предприятием атомной промышленности и энергетики. Это не совсем так. Усвоение углерода-14 и последующее отложение его в годичных кольцах происходит только в период вегетации и только в светлое время суток.

Как показано в таблице 3.4 диссертации, средняя температура в районе Курской АЭС (г. Курск) является положительной в течение 8 месяцев (с апреля по ноябрь). В районе Белоярской АЭС и Института реакторных материалов температура является положительной в течение 7 месяцев (с апреля по октябрь). Таким образом, в средней полосе России отложение углерода-14 в годичных кольцах формируется только в течение примерно половины года, с учетом малой скорости фотосинтеза в октябре и ноябре из-за низкой (хотя и положительной) температуры воздуха и малой продолжительности светового дня. Также не происходит усвоение углерода в темное время суток, что в период вегетации составляет примерно одну треть суток. Поэтому в оценки среднегодового выброса по содержанию углерода-14 в годичных кольцах деревьев нужно вносить соответствующие поправки, которые заслуживают отдельного исследования, поскольку важен учет солнечных и облачных дней, разной высоты солнца над горизонтом и других обстоятельств. Об этой поправке указано в таблице на с. 88, но в общем виде, а нужны более подробные пояснения.

Что интересно, в оценки средней годовой дозы облучения населения за счет потребления пищевых продуктов с повышенным содержанием углерода-14, никаких поправок вносить не следует: углерод-14 поступает во все растения, используемые в пищу, также только в светлое время суток и в период вегетации (точнее от посадки (сева) до сбора урожая), т.е. примерно в те же сроки, что и образование годичных колец деревьев.

2. На схеме расположения реакторов на промышленной площадке Белоярской АЭС (рис. 3.2 диссертации) отсутствует реактор БН-800. И вообще этот реактор не упоминается в диссертации. Хотя в диссертации на с. 82 указано, что реакторы на быстрых нейтронах имеют на порядок меньший показатель удельного выброса углерода-14 на единицу произведенной электроэнергии, но нужно учитывать, что суммарная электрическая мощность БН-600 и БН-800 равна 1400 МВт, а реакторов АМБ-100 и АМБ-200 – 300 МВт. С учетом этого, нет оснований не учитывать работу реактора БН-800. Возможно, что рост вклада углерода-14 после 2015 года в годичных кольцах на площадке Белоярской АЭС (рисунок 3.11, с. 77 диссертации) обусловлен вводом в эксплуатацию реактора БН-800 – по крайней мере такое предположение нельзя заведомо отвергать.

Указанные недостатки не снижают положительную оценку диссертационной работы Е.И. Назарова. Отмеченные недостатки скорее являются проблемами и направлениями для дальнейшей научно-исследовательской работы.

Заключение. На основании выполненного анализа можно утверждать, что диссертационная работа Е.И. Назарова представляет собой завершённую научно-квалификационную работу, в которой содержится решение актуальной научной и практической задачи, имеющей важное значение для обеспечения радиационной безопасности персонала и населения от выброса углерода-14 при нормальной эксплуатации предприятий атомной отрасли. По актуальности, объёму выполненных работ, методическому уровню, научной новизне и практической значимости полученных результатов настоящая работа полностью соответствует требованиям п. 9 Положения о присуждении ученых степеней в УрФУ. Евгений Игоревич Назаров заслуживает присуждения ученой степени кандидата технических наук по специальности «2.4.9 - Ядерные энергетические установки, топливный цикл, радиационная безопасность».

Официальный оппонент

Главный научный сотрудник лаборатории радиационной безопасности персонала отдела промышленной радиационной гигиены,
ФГБУ «Государственный научный центр Российской Федерации –
Федеральный медицинский биофизический центр имени А.И. Бурназяна»,
доктор технических наук, доцент
123098, г. Москва, ул. Живописная, д. 46, корп. 2, каб. 525.
Тел. +7 (499) 190-95-44.
E-mail: vnklochkov22@mail.ru

 В.Н. Клочков

Подпись главного научного сотрудника, д.т.н. Клочкова В.Н. заверяю:

Ученый секретарь
ФГБУ ГНЦ ФМБЦ им. А.И. Бурназяна,
доктор медицинских наук,

