

¹⁴C В ГОДИЧНЫХ КОЛЬЦАХ ДЕРЕВЬЕВ В РАЙОНЕ РАСПОЛОЖЕНИЯ ОБЪЕКТОВ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ

Е.И. Назаров^{*,}, А.В. Кружалов^{*}, М.Е. Васянович^{**}, А.А. Екидин^{**},
В.В. Кукарских^{***}, Е.В. Пархомчук^{****,*****}, А.В. Петрожицкий^{*****},
В.В. Пархомчук^{*****}**

** Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина*

620002, Екатеринбург, ул. Мира, 19

*** Институт промышленной экологии УрО РАН*

620219, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 20

**** Институт экологии растений и животных УрО РАН*

620144, Екатеринбург, ул. 8 Марта, 202

***** ЦКП «Ускорительная масс-спектрометрия НГУ-ННЦ» Новосибирский государственный университет*

630090, Новосибирск, ул. Пирогова, 1

****** Институт археологии и этнографии СО РАН*

630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 17

****** Институт ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН*

630090, Новосибирск, пр. Академика Лаврентьева, 11



Представлены результаты измерения концентрации ¹⁴C в годичных кольцах 10-ти сосен в районе расположения Белоярской АЭС (БелАЭС) и Института реакторных материалов (АО «ИРМ»), г. Заречный. Место отбора проб, расположенное в 1200 м в восточном направлении от АО «ИРМ», выбрано на основании многолетних наблюдений метеорологических параметров. Измерения выполнены с помощью ускорительного масс-спектрометра Института ядерной физики им. Г. И. Будкера, г. Новосибирск. Показано влияние эксплуатации ядерных установок на концентрацию ¹⁴C в атмосферном воздухе. Диапазон значений концентрации углерода-14 в образце составил от 116,0 ± 4,4 до 192,0 ± 8,5 рМС.

Ключевые слова: углерод-14, годичные кольца сосны, ускорительный масс-спектрометр, ядерный реактор, атомная электростанция.

ВВЕДЕНИЕ

Подтверждением достигнутого уровня безопасности работы любых ядерных установок являются результаты долговременных наблюдений радиэкологической обстановки в местах их размещения [1]. Для каждого типа реакторной установки характерен свой перечень радионуклидов, определяющих как суммарную активность выброса, так и

© *Е.И. Назаров, А.В. Кружалов, М.Е. Васянович, А.А. Екидин, В.В. Кукарских, Е.В. Пархомчук, А.В. Петрожицкий, В.В. Пархомчук, 2022*

формирующих основной вклад в радиационные нагрузки на население [2]. Одним из ключевых дозообразующих радионуклидов при облучении населения является ^{14}C , который присутствует в выбросах ядерных реакторов любого типа [3]. Российский перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды, содержит ^{14}C [4]. МАГАТЭ рассматривает ^{14}C как важный фактор радиационного воздействия на окружающую среду и человека при эксплуатации АЭС [5, 6].

В XX в. основным антропогенным источником ^{14}C были испытания ядерного оружия в период с 1945 по 1980 гг. Суммарная активность поступившего в атмосферу ^{14}C в тот период составила около $3,5 \cdot 10^8$ ГБк [7].

В настоящее время основными антропогенными источниками ^{14}C являются ядерные реакторы и заводы по переработке облученного топлива. Во время работы ядерного реактора ^{14}C , в основном, образуется в результате реакций нейтронной активации ядер различных химических элементов, присутствующих в конструкционных материалах, тепловыделяющих элементах, замедлителе и теплоносителе.

Основными механизмами образования ^{14}C в ядерных энергетических реакторах являются [6]

- а) реакция $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$ с очень высоким сечением захвата тепловых нейтронов – 1,82 барн (1 барн = $1 \cdot 10^{-24}$ см²);
- б) реакция $^{17}\text{O}(n, \alpha)^{14}\text{C}$ с высоким сечением захвата тепловых нейтронов (0,24 барн);
- в) реакция $^{13}\text{C}(n, \gamma)^{14}\text{C}$ с малым сечением ($0,9 \cdot 10^{-3}$ барн);
- г) тройное деление ядер топлива.

Подсчитано, что около $1,1 \cdot 10^5$ ГБк/г. выбрасывается в атмосферу в газообразной форме от всех действующих атомных электростанций по всему миру, тогда как около $3,7 \cdot 10^5$ ГБк/г. ^{14}C в газообразной и жидкой формах выбрасывается заводами по переработке отработавшего ядерного топлива [8].

Помимо техногенного поступления ^{14}C в окружающую среду существует естественный путь, основанный на поглощении атомами ^{14}N тепловых нейтронов, которые являются результатом взаимодействия космических лучей с веществами атмосферы: $^{14}\text{N}(n, p)^{14}\text{C}$. Ежегодно таким путем образуется около $1,4 \cdot 10^6$ ГБк радиоуглерода, а общее количество ^{14}C в атмосфере оценивается в $1,4 \cdot 10^8$ ГБк. Наибольшее количество ^{14}C находится в океанах – около $1,0 \cdot 10^{10}$ ГБк [6].

Длительный период в России выбросы ^{14}C не рассматривались с точки зрения обязательного нормирования и контроля. Ретроспективную оценку поступления радиоуглерода в атмосферу позволяет сделать изучение распределение активности ^{14}C в годичных кольцах деревьев, произрастающих в районах расположения ядерных реакторов. Предполагается, что ^{14}C поступает в атмосферу с выбросами ядерных реакторов, главным образом, в виде $^{14}\text{CO}_2$, встраивается в естественный углеродный цикл и поглощается растениями в процессе фотосинтеза. Предполагается, что в годичном кольце дерева будет наблюдаться тем больше ^{14}C , чем больше его поступило в атмосферу в год формирования данного кольца, т.е. концентрация ^{14}C в атмосфере в период вегетации древесных растений в течение года будет коррелировать с концентрацией ^{14}C в годичном кольце этого года.

Для проверки этих предположений был выбран район Среднего Урала, где длительный период функционируют ядерные реакторы различных типов Белоярской атомной электростанции (БелАЭС) и исследовательский реактор в АО «Институт реакторных материалов» (АО «ИРМ»).

Параметры вышеупомянутых реакторных установок представлены в табл. 1.

Таблица 1

Параметры ядерных реакторов [9]

Годы эксплуатации	АМБ-100 1964 – 1983	АМБ-200 1969 – 1990	БН-600 с 1981 г.	БН-800 с 2016 г.	ИВВ-2М с 1966 г.
Теплоноситель	Легкая вода	Легкая вода	Жидкий Na	Жидкий Na	Легкая вода
Замедлитель	Графит	Графит	–	–	Легкая вода
Электрическая мощность, МВт	102	160	560	820	15 (тепловая)

Количество образующегося ^{14}C в ядерных реакторах зависит от степени обогащения топлива, концентраций примесей азота в топливе и конструкционных материалах, а также от температуры тепловыделяющих сборок, теплоносителя и замедлителя.

Ядерные установки АМБ-100 и АМБ-200 являются предшественниками графитоводных реакторов РБМК, поэтому основными механизмами образования ^{14}C в них являются реакции «а» и «в». Поскольку БН-600 и БН-800 являются реакторами на быстрых нейтронах, в них нет замедлителя. Следовательно, значительными источниками образования ^{14}C будут кислород в топливе и примеси азота в топливе и оболочках твэлов, а основными механизмами образования ^{14}C – реакции «а» и «б». Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М является прототипом ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор). Он используется для наработки радиоизотопной продукции (^{192}Ir , ^{14}C , ^{177}Lu , ^{131}Cs) и для выполнения различных исследований в области материаловедения [10]. ^{14}C присутствует в атмосферных выбросах ИВВ-2М в основном за счет реакций «а», «б», а также как результат обращения с радиоизотопом ^{14}C , часть которого может попадать в систему вентиляции.

Представленные в статье исследования дополняют результаты работ по этой тематике в трудах зарубежных авторов. В работах [11 – 13] выполнен анализ концентрации ^{14}C в различных объектах окружающей среды в окрестности Игналинской АЭС (Литва) с двумя реакторами типа РБМК-1500. В работе [14] выполнено аналогичное исследование на АЭС Пакш (Венгрия), где эксплуатируются четыре реактора ВВЭР-440. Особенностью данной работы является изучение закономерностей распределения ^{14}C в древесных кольцах сосны, произрастающей в районе расположения комплекса различных ядерных реакторов.

ПРИБОРЫ И МЕТОДЫ

Для выполнения исследования было определено расположение критического участка местности, на котором реализуется максимальное радиационное воздействие от выбросов ядерных реакторов. Предполагается, что на критическом участке достигается максимальная объемная активность ^{14}C в воздухе. Расчет критического участка был выполнен, согласно [15], с использованием данных метеорологической станции Верхнее Дуброво (25 км от г. Заречный). На критическом участке в качестве объекта воздействия выбрана сосна обыкновенная (*Pinussylvestris* L.), наиболее представительный вид древесной растительности в возрасте от 40 до 70 лет. На рисунке 1 схематично представлены расположение источников выброса ^{14}C и место отбора кернов древесины, а также роза ветров с преобладающими западными и юго-западными ветрами.

Счетные образцы для определения содержания ^{14}C формировались путем отбора проб древесины в виде кернов диаметром 5 мм (рис. 2) с помощью бурава Пресслера на высоте примерно 130 см от поверхности почвы. Затем полученные керны были разделены на годовые кольца. Кольца одного возраста 10-ти разных особей

были объединены в одну пробу, соответствующую определенному году. Для анализа были выбраны 15 различных проб.



Рис. 1. Расположение ядерных реакторов и критического участка выброса



Рис. 2. Серы сосны обыкновенной

В качестве фоновых значений использовались данные об активности ^{14}C в годичных кольцах 113-летней сосны, выросшей в Академгородке г. Новосибирска. Это обусловлено двумя факторами: во-первых, г. Заречный и г. Новосибирск расположены примерно на одной широте ($55^{\circ}02'$ и $56^{\circ}48'$ с. ш. соответственно); во-вторых, г. Новосибирск находится на значительном расстоянии от действовавших и действующих объектов использования атомной энергии, т.е. не был подвержен воздействию антропогенных источников радиоуглерода, за исключением испытаний ядерного оружия. В 2009 г. удельная активность ^{14}C в наземных экосистемах в северном полушарии составляла 238 Бк/кг С, что близко к значениям до атмосферных ядерных испытаний – 227 Бк/кг С [16].

В ходе подготовки счетных образцов из годичных колец химическим способом выделялась целлюлоза, которая затем подвергалась полному разложению и превращению в графитоподобный углерод на абсорбционно-каталитической установке,

предназначенной для получения счетных образцов в виде УМС-мишеней [17]. Полученные мишени устанавливались в ускорительный масс-спектрометр, после чего проводились измерения концентрации ^{14}C .

В работе был выполнен анализ содержания ^{14}C в 30-ти счетных образцах (по два образца на один год) с помощью ускорительного масс-спектрометра. В отличие от других методов измерения ^{14}C [18], для проведения достоверного анализа на УМС достаточно образца древесины массой около 20 мг, что позволяет проводить анализ отдельных годовичных колец и даже сезонных частей кольца. Данный ускорительный масс-спектрометр был создан в 2011 г. Институтом ядерной физики им. Г.И. Будкера СО РАН в Новосибирске. Подробное описание работы устройства представлено в работе [19].

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения концентрации ^{14}C в годовичных кольцах десяти деревьев сосны обыкновенной, выросших на критическом участке местности, представлены на рис. 3.

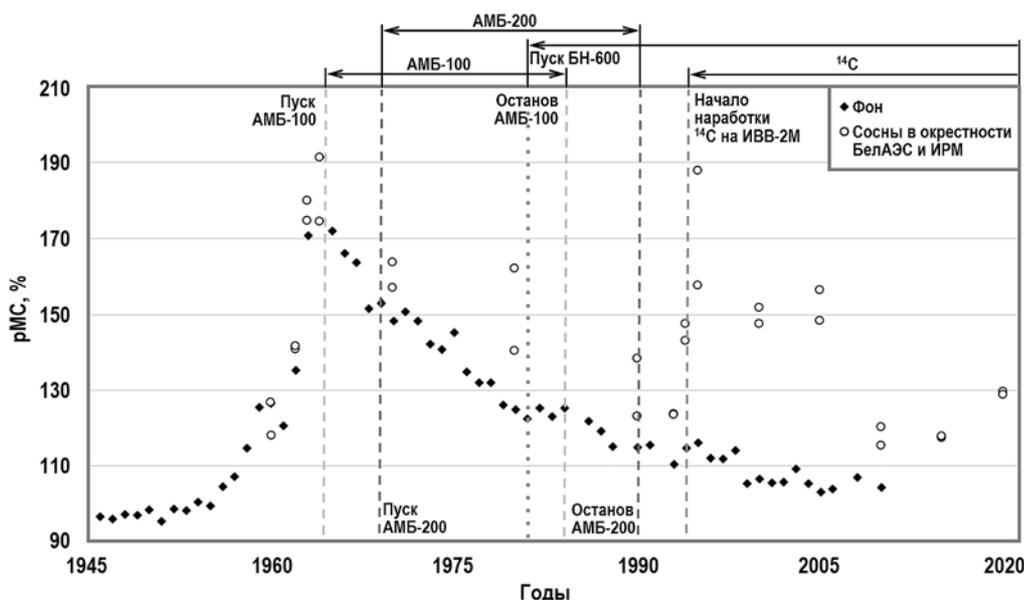


Рис. 3. Результаты измерения концентрации ^{14}C в годовичных кольцах сосен, выросших на критическом участке выброса ИВВ-2М и реакторов АМБ-100 и АМБ-200. Штриховыми линиями обозначены границы периодов эксплуатации реакторных установок, пунктирной — пуск БН-600

Единицы измерения ^{14}C – рМС (Percent Modern Carbon) были приняты во второй половине XX в. 100 рМС = 227 Бк/г углерода соответствует гипотетической удельной активности ^{14}C в атмосфере в 1950 г. без какого-либо человеческого воздействия [20]. На графике виден существенный рост концентрации ^{14}C в середине 1960-х гг., что объясняется интенсивным поступлением радиоуглерода в атмосферу в результате наземных испытаний ядерного оружия. Полученные результаты демонстрируют хорошую сходимость с литературными данными, характерными для всего северного полушария [21]. Максимальная концентрация ^{14}C составила $192,0 \pm 8,5$ рМС в 1964 г.

Из рисунка 3 видно, что после введения в эксплуатацию первого и второго энергоблоков Белоярской АЭС с реакторными установками АМБ-100 и АМБ-200 наблюдается рост концентрации ^{14}C в годовичных кольцах сосен. Снижение концентрации

радиоуглерода в атмосферном воздухе происходит вплоть до 1993 г. в результате прекращения эксплуатации уран-графитовых реакторов. Существенные расхождения в концентрации ^{14}C в течение одного года (на примере 1985 г.) можно объяснить неравномерностью поступления ^{14}C в окружающую среду при эксплуатации ядерных реакторов АМБ-100 и АМБ-200. Вероятно, негерметичность твэлов могла приводить к повышенному выбросу ^{14}C в атмосферный воздух.

Полученные данные косвенно подтверждают преимущества ядерных реакторов на быстрых нейтронах в сравнении с уран-графитовыми по формированию воздействия на окружающую среду от выбросов ^{14}C . Ввод в эксплуатацию в 1980 г. реактора БН-600 на быстрых нейтронах незначительно повлиял на концентрацию ^{14}C в атмосферном воздухе. В отличие от уран-графитовых ядерных установок реакторы на быстрых нейтронах имеют на порядок меньший показатель удельного выброса ^{14}C (количество выбрасываемого в атмосферу ^{14}C на единицу произведенной электроэнергии): $1,4 \cdot 10^{-2}$ и $1,6 \cdot 10^{-1}$ Гбк/ГВт·ч соответственно [3, 22].

После прекращения эксплуатации реакторных установок АМБ-100 и АМБ-200 основным технологическим процессом, в результате которого ^{14}C поступает в атмосферу, является процедура обращения с изотопной продукцией в АО «ИРМ», которая началась в 1994 г. Достоверные отличия в значениях концентрации ^{14}C в годичных кольцах сосны (особенно в 1995 г.), вероятно, связаны с разработкой методологии по обращению с ^{14}C в качестве исходного сырья для радиофармпрепарата. Последующее снижение концентрации ^{14}C в годичных кольцах связано с совершенствованием и оптимизацией данного технологического процесса.

ВЫВОДЫ

Представлены результаты измерения концентрации ^{14}C в годичных кольцах сосны с критического участка местности, расположенного вблизи Белоярской АЭС и АО «ИРМ». Измерения проводились с помощью уникальной научной установки «Ускорительный масс-спектрометр ИЯФ СО РАН», г. Новосибирск. В качестве объекта сравнения использованы результаты наблюдений активности ^{14}C в годичных кольцах 113-летней сосны, растущей вне зоны влияния действующих ядерных реакторов и деятельности по обращению радиоуглеродом.

В исследованных образцах сосны концентрация ^{14}C в годичных кольцах находится в диапазоне от $116,0 \pm 4,4$ до $192,0 \pm 8,5$ рМС. Датирование годовых колец сосны позволило ретроспективно восстановить изменения уровней воздействия выбросов ^{14}C в период с 1964 г. по текущее время. На исследуемом критическом участке местности воздействие ^{14}C значительно превышало воздействие на фоновом участке сравнения (год к году).

Дополнительное антропогенное поступление ^{14}C в древесину связано с эксплуатацией ядерных установок АМБ-100 и АМБ-200. После вывода из эксплуатации вышеупомянутых реакторов, основным источником поступления ^{14}C в атмосферу стала деятельность АО «ИРМ» при обращении с изотопной продукцией и эксплуатацией ядерного реактора ИВВ-2М. Эксплуатация ядерного реактора БН-600 не вносит существенного вклада в активность ^{14}C в древесине.

Метод ускорительной масс-спектрометрии, использованный в работе для измерения концентрации ^{14}C , является наиболее чувствительным среди всех доступных на сегодня методов измерения радиоуглерода. Применение этого метода для решения задач атомной отрасли позволит получить новые прецизионные данные о содержании ^{14}C в компонентах окружающей среды для ретроспективной оценки радиационного воздействия объектов использования атомной энергии.

Литература

1. Мониторинг окружающей среды и источников для целей радиационной защиты – Серия норм безопасности МАГАТЭ №. RS-G-1.8. – Вена, Австрия: МАГАТЭ, 2016. – 168 с. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216r_web.pdf (дата доступа 07.09.2021).
2. Екидин А.А., Жуковский М.В., Васянович М.Е. Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС. // Атомная энергия. – 2016. – Т. 120. – Вып. 2. – С. 106-108. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/486/465> (дата доступа 07.09.2021). DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0107-x>.
3. Назаров Е.И., Екидин А.А., Васильев А.В. Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС. // Известия высших учебных заведений. Физика. – 2018. – Т. 61. – № 12-2 (732). – С. 67-73.
4. Перечень загрязняющих веществ, в отношении которых применяются меры государственного регулирования в области охраны окружающей среды. Утв. распоряжением Правительства РФ от 08.07.2015 № 1316-р.
5. INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors. – Vienna: IAEA (Nuclear Energy Series No. NG-T-3.15), 2016. – 94 p. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1733_web.pdf (дата доступа 07.09.2021).
6. Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14. – Vienna: IAEA (Technical Reports Series No. 421), 2004. – 109 p. Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS421_web.pdf (дата доступа 07.09.2021).
7. Василенко И.Я., Осипов В.А., Рублевский В.П. Радиоактивный углерод. // Природа. – 1992. – № 12. – С. 59-65.
8. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol. I. UNSCEAR, 2000. – 654 p. Электронный ресурс: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf (дата доступа 07.09.2021).
9. The Power Reactor Information System (PRIS) Official Site of the International Atomic Energy Agency. Электронный ресурс: <https://www.iaea.org/PRIS> (дата доступа 07.09.2021).
10. Русских И.М. Исследовательский ядерный реактор ИВВ-2М. // Атомная энергия. – 2017. – Т. 121. – Вып. 4. – С. 183-186. Электронный ресурс: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/450/442> (дата доступа 07.09.2021).
11. Magnusson A., Stenstrom K., Adliene D. et al. Carbon-14 Levels in the Vicinity of the Lithuanian Nuclear Power Plant Ignalina. // Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms. – 2007. – Vol. 259. – Iss. 1. – PP. 530-535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.01.197>.
12. Mazeika J., Petrosius R., Pukiene R. Carbon-14 in Tree Rings and Other Terrestrial Samples in the Vicinity of Ignalina Nuclear Power Plant, Lithuania. // Journal of Environmental Radioactivity. – 2008. – Vol. 99. – Iss. 2. – PP. 238-247. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.07.011>.
13. Ezherinskis Zh., Shapolaite J., Pabedinskas A. et al. Annual Variations of ¹⁴C Concentration in the Tree Rings in the Vicinity of Ignalina Nuclear Power Plant. // Radiocarbon. – 2018. – Vol. 60. – No. 4. – PP. 1227-1236. DOI: <https://doi.org/10.1017/RDC.2018.44>.
14. Janovics R., Kern, Z., Guttler D. et al. Radiocarbon Impact on a Nearby Tree of a Light-Water VVER-Type Nuclear Power Plant, Paks, Hungary. // Radiocarbon. – 2013. – Vol. 55. – No. 2. – PP. 826-832. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0033822200057982>.
15. РБ-106-15. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установле-

ния нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. – М.: Ростехнадзор, 2015.

16. Carbon-14 and the Environment. // IRSN Radionuclide Fact Sheet. – Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire. – France, 2010. – 19 p. Электронный ресурс: https://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/radionuclides-sheets/environment/Documents/Carbone_UK.pdf (дата доступа 07.09.2021).

17. *Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A. et al.* Novel Simplified Absorption-Catalytic Method of Sample Preparation for AMS Analysis Designed at the Laboratory of Radiocarbon Methods of Analysis (LRMA) in Novosibirsk Akademgorodok. // International Journal of Mass Spectrometry. – 2018. – Vol. 433. – PP. 11-18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2018.08.003>.

18. Назаров Е.И., Кружалов А.В., Екидин А.А. и др. Приборы и методы измерения ^{14}C (обзор). // Приборы и техника эксперимента. – 2021. – № 6. – С. 8-14. DOI: <https://doi.org/10.31857/S0032816221060185>.

19. Алиновский Н.И., Гончаров А.Д., Ключев В.Ф. и др. Ускорительный масс-спектрометр СО РАН. // Журнал технической физики. – 2009. – Т. 79. – № 9. – С. 107-111.

20. *Stenstrom K., Skog G., Georgiadou E., Genberg J. & Mellström A.* A Guide to Radiocarbon Units and Calculations. // Lund University, Department of Physics, Division of Nuclear Physics Internal Report LUNFD6 (NFFR-3111). – 2011. – PP. 1-17. Электронный ресурс:

<https://www.his.ch.ntu.edu.tw/AMS/A%20guide%20to%20radiocarbon%20units%20and%20calculations.pdf> (дата доступа 07.09.2021).

21. *Levin I., Kromer B., Schoch-Fischer H. et al.* $\delta^{14}\text{C}_2$ Record from Vermunt. In Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A, 1994. Электронный ресурс: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/cent-verm.html> (дата доступа 07.09.2021).

22. Setting Authorized Limits for Radioactive Discharges: Practical Issues to Consider. – Vienna: IAEA, 2010. – 80 p (IAEA-TECDOC-1638). Электронный ресурс: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1638_web.pdf (дата доступа 07.09.2021).

Поступила в редакцию 10.09.2021 г.

Авторы

Назаров Евгений Игоревич, м.н.с.

E-mail: e.i.nazarov@urfu.ru

Кружалов Александр Васильевич, профессор, д.ф.-м.н.

E-mail: a.v.kruzhlov@urfu.ru

Васянович Максим Евгеньевич, н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: vme@ecko.uran.ru

Екидин Алексей Акимович, в.н.с., к.ф.-м.н.

E-mail: ekidin@ecko.uran.ru

Кукарских Владимир Витальевич, с.н.с., к.б.н.

E-mail: voloduke@mail.ru

Пархомчук Екатерина Васильевна, с.н.с., к.х.н.

E-mail: ekaterina@catalysis.ru

Петрожицкий Алексей Валентинович, н.с.

E-mail: a.v.petrojzitsky@inp.nsk.su

Пархомчук Василий Васильевич, глав.н.с., д.ф.-м.н.

E-mail: Parkhomchuk@inp.nsk.su

UDC 621.039.58

¹⁴C IN TREE RINGS IN THE VICINITY OF THE NUCLEAR FACILITY DEPLOYMENT AREAS

Nazarov E.I.*,**, Kruzhalov A.V.*, Vasyanovich M.E.***, Ekidin A.A.**,
Kukarskikh V.V.***, Parkhomchuk E.V.****,*****, Petrozhitsky A.V.*****,
Parkhomchuk V.V.*****

* Ural Federal University n.a. the First President of Russia B.N. Yeltsin
19 Mira Str., 620002 Yekaterinburg, Russia

** Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the RAS
20 Sofii Kovalevskoy Str., 620219 Yekaterinburg, Russia

*** Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the RAS
202 Vos'mogo Marta Str., 620144 Yekaterinburg, Russia

**** Accelerator Mass Spectrometry NSU-NSC TsKP Novosibirsk State University
1 Pirogova Str., 1630090 Novosibirsk, Russia

***** Institute of Archeology and Ethnography SB RAS
17 Akademika Lavrentieva Ave., 630090 Novosibirsk, Russia

***** Institute of Nuclear Physics. G.I. Budker SB RAS
11 Akademika Lavrentieva Ave., 630090 Novosibirsk, Russia

ABSTRACT

¹⁴C is naturally and artificially occurred radionuclide presented in atmosphere. ¹⁴C is produced during the operation of a nuclear reactor of any type, enters the atmosphere and became a part of carbon cycle. The article presents the results of measuring the concentration of ¹⁴C in the tree rings of 10 pines in the area of the Beloyarsk NPP (BelNPP) and the Institute of Nuclear Materials (INM), Zarechny. The sampling site, located 1200 m east of the INM, was selected based on long-term observations of meteorological parameters. The measurements were carried out using the accelerator mass spectrometer of the Institute of Nuclear Physics G.I. Budker, Novosibirsk. The influence of the operation of nuclear installations on the concentration of ¹⁴C in the atmospheric air is demonstrated. The range of values for the concentration of carbon-14 in the sample ranged from 116.0 ± 4.4 to 192.0 ± 8.5 pMC.

Key words: carbon-14, pine tree rings, accelerator mass spectrometer, nuclear reactor, nuclear power plant.

REFERENCES

1. *Environmental and Source Monitoring for Purposes of Radiation Protection*. – IAEA Safety Standards Series No. RS-G-1.8. International Atomic Energy Agency. Vienna, Austria. IAEA, 2005, 136 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1216_web.pdf (accessed Sep. 07, 2021).
2. Ekidin A.A., Zhukovsky M.V., Vasyanovich M.E. Identification of the main dose-forming radionuclides in NPP discharges. *Atomnaya Energiya*. 2016, v. 120, iss. 2, pp. 106-108. Available at: <https://j-atomicenergy.ru/index.php/ae/article/view/486/465> (accessed Sep. 07, 2021); DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-016-0107-x> (in Russian).
3. Nazarov E.I., Ekidin A.A., Vasiljev A.V. Assessment of the atmospheric carbon-14 caused by NPP discharges. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenij. Fizika*. 2018, v. 61, no. 12-2, pp. 67-73 (in Russian).
4. *The List of Pollutants in Relation to which Measures of State Regulation in the Field of Environmental Protection are Applied*. Approved by the Order of the Government of the Russian Federation of 08.07.2015 No. 1316-p (in Russian).

5. *INPRO Methodology for Sustainability Assessment of Nuclear Energy Systems: Environmental Impact of Stressors*. Vienna. IAEA (Nuclear Energy Series No. NG-T-3.15), 2016, 94 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1733_web.pdf (accessed Sep. 07, 2021).
6. *Management of Waste Containing Tritium and Carbon-14*. Vienna. IAEA (Technical Reports Series No. 421), 2004, 109 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TRS421_web.pdf (accessed Sep. 07, 2021).
7. Vasilenko I.Ya., Osipov V.A., Rublevsky V.P. Radioactive Carbon. *Priroda*. 1992, no. 12, pp. 59-65. Available at: <http://evolution.powernet.ru/library/vasilen.htm> (accessed Sep. 07, 2021) (in Russian).
8. Sources and Effects of Ionizing Radiation. Report to the General Assembly with Scientific Annexes. Vol I. UNSCEAR, 2000, 654 p. Available at: https://www.unscear.org/docs/publications/2000/UNSCEAR_2000_Report_Vol.I.pdf (accessed Sep. 07, 2021).
9. The Power Reactor Information System (PRIS) Official Site of the International Atomic Energy Agency. Available at: <https://www.iaea.org/PRIS> (accessed Sep. 07, 2021).
10. Russkikh I.M. IVV-2M Nuclear Research Reactor. *Atomic Energy*. 2017, v. 121, iss. 4, pp. 235-239; DOI: <https://doi.org/10.1007/s10512-017-0190-7>.
11. Magnusson A., Stenstrom K., Adliene D. et al. Carbon-14 Levels in the Vicinity of the Lithuanian Nuclear Power Plant Ignalina. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 2007, v. 259, iss. 1, pp. 530-535. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.nimb.2007.01.197>.
12. Mazeika J., Petrosius R., Pukiene R. Carbon-14 in Tree Rings and Other Terrestrial Samples in the Vicinity of Ignalina Nuclear Power Plant, Lithuania. *Journal of Environmental Radioactivity*. 2008, v. 99, iss. 2, pp. 238-247; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvrad.2007.07.011>.
13. Ezherinskis Zh., Shapolaite J., Pabedinskas A. et al. Annual Variations of ^{14}C Concentration in the Tree Rings in the Vicinity of Ignalina Nuclear Power Plant. *Radiocarbon*. 2018, v. 60, no. 4, pp. 1227-1236; DOI: <https://doi.org/10.1017/RDC.2018.44>.
14. Janovics R., Kern, Z., Guttler D. et al. Radiocarbon Impact on a Nearby Tree of a Light-Water VVER-Type Nuclear Power Plant, Paks, Hungary. *Radiocarbon*. 2013, v. 55, no. 2, pp. 826-832; DOI: <https://doi.org/10.1017/S0033822200057982>.
15. RB-106-15. *Safety Guide for the Use of Atomic Energy. Recommended Methods for Calculating the Parameters Necessary for the Development and Establishment of Standards for Maximum Permissible Emissions of Radioactive Substances into the Atmospheric Air*. Moscow. Rostekhnadzor Publ., 2015 (in Russian).
16. Carbon-14 and the Environment. *IRSN Radionuclide Fact Sheet*. Institut de Radioprotection et de Surete Nucleaire. France, 2010, 19 p. Available at: https://www.irsn.fr/EN/Research/publications-documentation/radionuclides-sheets/environment/Documents/Carbone_UK.pdf (accessed Sep. 07, 2021).
17. Lysikov A.I., Kalinkin P.N., Sashkina K.A. et al. Novel Simplified Absorption-Catalytic Method of Sample Preparation for AMS Analysis Designed at the Laboratory of Radiocarbon Methods of Analysis (LRMA) in Novosibirsk Akademgorodok. *International Journal of Mass Spectrometry*. 2018, v. 433, pp. 11-18; DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijms.2018.08.003>.
18. Nazarov E.I., Kruzhalov A.V., Ekidin A.A. et al. Instruments and Methods for Measuring ^{14}C (Review). *Pribory i Tekhnika Eksperimenta*. 2021, v. 64, no. 6, pp. 790-795. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0020441221060166> (in Russian).
19. Alinovskiy N.I., Goncharov A.D., Klyuev V.F. et al. Accelerator Mass Spectrometer SB RAS. *Zhurnal Tehnicheskoy Fiziki*. 2009, v. 79, no. 9, pp. 107-111. Available at: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/9798> (accessed Sep. 07, 2021). DOI: <https://doi.org/10.1134/S1063784209090151> (in Russian).
20. Stenstrom K., Skog G., Georgiadou E., Genberg J. & Mellstrom A. A Guide to Radiocarbon Units and Calculations. *Lund University, Department of Physics, Division of*

Nuclear Physics Internal Report LUNFD6 (NFFR-3111). 2011, pp. 1-17. Available at: <https://www.his.ch.ntu.edu.tw/AMS/A%20guide%20to%20radiocarbon%20units%20and%20calculations.pdf> (accessed Sep. 07, 2021).

21. Levin I., Kromer B., Schoch-Fischer H. et al. $\delta^{14}\text{C}_0$ Record from Vermunt. In *Trends: A Compendium of Data on Global Change. Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy, Oak Ridge, Tenn., U.S.A, 1994*. Available at: <https://cdiac.ess-dive.lbl.gov/trends/co2/cent-verm.html> (accessed Sep. 07, 2021).

22. *Setting Authorized Limits for Radioactive Discharges: Practical Issues to Consider*. IAEA-TECDOC-1638, International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2010, 80 p. Available at: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/te_1638_web.pdf (accessed Sep. 07, 2021).

Authors

Nazarov Evgeny Igorevich, Junior Researcher

E-mail: e.i.nazarov@urfu.ru

Kruzhalov Aleksandr Vasilievich, Professor, Dr.Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: a.v.kruzhalov@urfu.ru

Vasyanovich Maksim Evgenievich, Researcher, Cand.Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: vme@ecko.uran.ru

Ekidin Aleksey Akimovich, Leading Researcher, Cand.Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: ekidin@ecko.uran.ru

Kukarskikh Vladimir Vitalievich, Senior Researcher, Cand.Sci. (Biology)

E-mail: voloduke@mail.ru

Parkhomchuk Ekaterina Vasilievna, Senior Researcher, Cand.Sci. (Chemistry)

E-mail: ekaterina@catalysis.ru

Petrozhitsky Aleksey Valentinovich, Researcher

E-mail: a.v.petrozhitsky@inp.nsk.su

Parkhomchuk Vasily Vasilievich, Chief Researcher, Dr.Sci. (Phys.-Math.)

E-mail: Parkhomchuk@inp.nsk.su