

РАДИОУГЛЕРОДНЫЙ СЛЕД БИЛИБИНСКОЙ АЭС

А. А. Екидин¹, Е. И. Назаров¹, М. Е. Васянович¹, В. В. Кукарских², О. В. Ершова³,
Е. В. Пархомчук⁴

¹ Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (Екатеринбург, Российская Федерация)

² Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН (Екатеринбург, Российская Федерация)

³ Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН (Новосибирск, Российская Федерация)

⁴ Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (Новосибирск, Российская Федерация)

Статья поступила в редакцию 18 ноября 2025 г.

Для цитирования

Екидин А. А., Назаров Е. И., Васянович М. Е. и др. Радиоуглеродный след Билибинской АЭС // Арктика: экология и экономика. — 2026. — Т. 16, № 2. — С. 238—249. — DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-238-249.

Цель работы — оценка накопления ¹⁴C в древесной растительности от выбросов Билибинской АЭС за весь период эксплуатации. Измерения ¹⁴C проведены методом ускорительной масс-спектрометрии. Методический подход исследования позволяет проследить динамику накопления ¹⁴C в древесных кольцах лиственницы за 1974–2022 гг. Полученные результаты находятся в диапазоне от 233,91±1,16 до 315,7±1,75 Бк/кг С. Наибольший вклад выбросов Билибинской АЭС в содержание ¹⁴C составляет 13,9±1,2 Бк/кг С, он установлен в годовых кольцах деревьев, сформированных в 2020 г. В рассматриваемом секторе преимущественного направления ветра за 48 лет эксплуатации реакторных установок ЭГП-6 накоплено 4,2±0,6 МБк ¹⁴C, что составляет не более 3,56·10⁻⁶% суммарного выброса ¹⁴C Билибинской АЭС за данный период. С учетом завершения эксплуатации энергоблоков ЭГП-6 полученные уникальные результаты могут быть использованы в качестве индикатора безопасности на всех этапах вывода из эксплуатации Билибинской АЭС.

Ключевые слова: Билибинская АЭС, выброс, углерод-14, накопление радионуклидов, годовые кольца, лиственница, запас древесины.

Введение

В последнее время уделяется повышенное внимание не только выбросам обычного углерода [1], но и его радиоактивного радионуклида ¹⁴C. Активное развитие арктических регионов предопределяет бережное отношение к местным природным объектам, для которых характерна особо высокая чувствительность к внешним параметрам воздействия на сложившиеся экосистемы [2]. Одним из таких факторов является ¹⁴C, который может одновременно быть и удобным маркером.

Строительство АЭС в поселке Билибино на Чукотке было начато в 1966 г. и предусматривало сооружение четырех энергоблоков с графито-водными

реакторными установками ЭГП-6 мощностью по 12 МВт каждый. Выбор типа реакторной установки был обусловлен опытом эксплуатации атомных станций с аналогичными реакторными установками АМ (Обнинская АЭС) и АМБ-100, АМБ-200 (Белоярская АЭС), а также промышленных уран-графитовых реакторных установок. С 1974 по 1977 гг. были последовательно введены в эксплуатацию все четыре энергоблока. Один энергоблок был остановлен в 2019 г. В декабре 2025 г. были остановлены оставшиеся три энергоблока.

Атомные станции с графито-водными реакторами, к которым относится Билибинская АЭС, характеризуются наибольшим значением нормализованного показателя выброса ¹⁴C на единицу произведенной электроэнергии (0,148 ГБк/ГВт·ч) среди эксплуатируемых в России АЭС [3]. При этом актуаль-

© Екидин А. А., Назаров Е. И., Васянович М. Е., Кукарских В. В., Ершова О. В., Пархомчук Е. В., 2026

ные оценки облучения населения от выбросов ^{14}C при нормальной эксплуатации АЭС с реакторными установками РБМК-1000 и ЭГП-6 показали малые значения годовой эффективной дозы, существенно меньшие установленного минимально значимого уровня (10 мкЗв/год) [4]. Облучение населения от выбросов энергоблоков Билибинской АЭС находится в диапазоне от 1,4 мкЗв (1998 г.) до 4,6 мкЗв (2020 г.) [5].

В графито-водных ядерных реакторах радиоуглерод главным образом образуется в результате [6] активации газообразного азота ^{14}N , активации примесных элементов исходного графита. Большая часть образовавшегося ^{14}C остается в графите во время работы реактора и не выбрасывается в атмосферу. Основная часть (~70—90%) накопленного в графите ^{14}C образовалась из газообразного азота по реакции $^{14}\text{N}(n,p)^{14}\text{C}$ [6]. Существенно меньший вклад в образование ^{14}C вносит реакция $^{13}\text{C}(n,\gamma)^{14}\text{C}$.

В связи с выработкой ресурса в обозримой перспективе будет производиться вывод из эксплуатации всех энергоблоков Билибинской АЭС. Кратно увеличится поступление углерода-14 в атмосферный воздух при извлечении облученной графитовой кладки [7]. Предварительные оценки показывают, что суммарная активность графитовых отходов на 95% определяется наличием ^{14}C [8], при фиксации в пункте финальной изоляции они формируют радиоактивные отходы 2-го класса [9; 10]

В отличие от большинства радионуклидов, выбрасываемых при нормальной эксплуатации АЭС, ^{14}C относится к группе долгоживущих, которые после выброса циркулируют в пределах биосферы и продолжают вносить свой вклад в облучение населения в течение десятилетий, хотя и в крайне малых индивидуальных дозах. Облучение населения в результате годового выброса глобально циркулирующих радионуклидов (^3H , ^{14}C , ^{85}Kr , ^{129}I) со временем будет медленно увеличиваться [11]. Как и любой изотоп углерода, ^{14}C является биогенным макротрофным элементом, участвующим в биогеохимическом цикле обмена между живыми организмами и абиотической средой. Вследствие этого сформированный в период эксплуатации АЭС локальный участок повышенного содержания ^{14}C в растительности будет функционировать как площадной источник ^{14}C в течение длительного периода даже после остановки реакторов и выгрузки топлива из активной зоны.

Поскольку обязательный мониторинг ^{14}C в выбросах АЭС в России осуществляется менее 10 лет, оценить активность ^{14}C , поступившего в атмосферу от прошедшей эксплуатации реакторных установок, практически невозможно. Отсутствие инструментальных измерений выбросов ^{14}C в ранние годы эксплуатации ядерных реакторов и объектов использования атомной энергии не позволяет адекватно оценить выбросы ^{14}C , а также последствия таких выбросов для окружающей среды и человека.

Выброс радиоуглерода в процессе эксплуатации атомных электростанций может привести к локальному увеличению его содержания в атмосфере. Изменения объемной активности ^{14}C в атмосфере можно оценить по его содержанию в годичных кольцах деревьев, произрастающих в районе потенциального воздействия [12]. В процессе фотосинтеза деревья поглощают углекислый газ, в том числе $^{14}\text{CO}_2$. Фактическое соотношение изотопов радиоуглерода в окружающем воздухе сохраняется в органических веществах древесины. В отличие от других соединений (смола, воски и т. д.) целлюлоза не мигрирует в тканях дерева после формирования. Таким образом, в целлюлозе годичных колец сохраняются удельные активности ^{14}C , пропорциональные объемным активностям окружающего атмосферного ^{14}C (в виде $^{14}\text{CO}_2$).

Техногенный вклад от выбросов радиоуглерода наблюдался в районе следующих АЭС: Игналинской (Литва) [13; 14], Кршко (Словения) [15], Циньшань (Китай) [16], Богунице (Словения) [17], имени адмирала Алваро Алберто (Бразилия) [18], Пакш (Венгрия) [19], Ханул, Вольсон, Ханбит, Кори (Южная Корея) [20], Чернаводэ (Румыния) [21], Пикеринг (Канада) [22] и др. В нашей стране превышение углерода-14 над фоновой составляющей в годичных кольцах деревьев зафиксировано около Белоярской [12], Билибинской [5] и Курской [7] АЭС.

Цель настоящей работы — оценка загрязнения древесной растительности ^{14}C в условиях Крайнего Севера на примере выбросов Билибинской АЭС за весь период ее эксплуатации.

Методы и материалы

При планировании работ выбор вида древесной растительности и местоположения отбора проб для достижения целей исследования производился с учетом сведений о лесном фонде и метеорологических данных многолетних наблюдений [5]. Дальневосточный федеральный округ (ДФО), где расположена Билибинская АЭС, — крупнейший по площади лесной регион России. В лесном фонде ДФО преобладают хвойные леса, среди которых лиственничники занимают около 3/4 площади, покрытой лесом, и 84,8% площади хвойных [23]. Общий запас древесины лиственницы (61,2%) значительно преобладает над запасом всех других пород ДФО — хвойных, твердо- и мягколиственных. Из общего запаса древесины ДФО на Чукотский автономный округ (АО) приходится 0,4%. Основным лесообразующим видом на Чукотке является лиственница Каяндера (*Larix cajanderi* Mayr) [24]. Средний запас лиственничных лесов в Чукотском АО составляет 27 м³/га [23]. Стволы неровные, часто разветвленные или усохшие в верхней части. Диаметр на высоте 1,3 м от основания ствола достигает 50 см [24].

Отбор годичных колец лиственницы Каяндера осуществлялся на участке с наибольшим ожидаемым поступлением углерода-14 от выбросов Били-

бинской АЭС. Этот участок, находящийся на расстоянии 1,8 км к юго-юго-западу от вентиляционных труб станции, был определен с учетом многолетних метеорологических параметров [5]. Отбор древесных проб (кernов) осуществлялся на высоте примерно 130 см от поверхности почвы с помощью бурава Пресслера. Всего на участке было отобрано 10 kernов. После построения индивидуальных древесно-кольцевых хронологий и перекрестной датировки отобранные kernы разделялись на годовичные кольца. Кольца одного года образования объединяли в одну пробу, соответствующую календарному году. Далее проводилась обработка образцов древесины на оборудовании Центра коллективного пользования (ЦКП) «Геохронология кайнозоя» Института археологии и этнографии Сибирского отделения РАН: из годовичных колец химическим способом выделялась целлюлоза, очищалась от лигнина, смол и других примесей. Затем образцы целлюлозы передавались в ЦКП «Ускорительная масс-спектрометрия» Новосибирского государственного университета — Новосибирского научного центра, где подвергались полному сжиганию и превращению в графитоподобный углерод на графитизаторе AGE-3 (Ionplus, Швейцария), предназначенном для получения мишеней для ускорительного масс-спектрометра (УМС) [5; 25; 26]. Измерение содержания ^{14}C в полученных образцах проводилось с помощью MICADAS-28 (Ionplus, Швейцария) [26; 27]. Использование УМС позволяет выполнять прецизионную оценку содержания ^{14}C в исследуемых образцах [28]. Инструментальная погрешность составляла не более 1,8 Бк/кг С. Минимальная требуемая масса образца — 20—50 мг.

Древесная растительность всегда содержит ^{14}C , поглощаемый из атмосферного воздуха. При основном пути поступления радиоуглерода в древесину из приземного слоя атмосферы в результате фотосинтеза отношение радиоактивного изотопа углерода ^{14}C к стабильному ^{12}C остается равным такому отношению в атмосферном воздухе. Техногенный вклад в нормализованную активность ^{14}C к массе стабильного углерода в каждом годовичном кольце древесины определяется разницей между измеренной и фоновой составляющими:

$$\begin{aligned} \text{NA}_{\text{Larix},^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x) &= \\ &= \text{NA}_{\text{Larix},^{14}\text{C},\bar{j}}(x) - \text{NA}_{\text{bcg},^{14}\text{C},\bar{j}} \end{aligned} \quad (1)$$

где $\text{NA}_{\text{Larix},^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x)$ — вклад выброса ^{14}C Билибинской АЭС в нормализованную активность образца древесины за j -й год вегетации, Бк/кг С; $\text{NA}_{\text{Larix},^{14}\text{C},\bar{j}}(x)$ — результат измерения нормализованной активности ^{14}C за j -й год вегетации в образце древесного кольца лиственницы на расстоянии x от источника выброса, Бк/кг С; x — расстояние от источника выброса ^{14}C до локального участка отбора образцов древесной растительности, км;

$\text{NA}_{\text{bcg},^{14}\text{C},j}$ — средняя фоновая нормализованная активность ^{14}C в приземном слое атмосферы в период j -го года вегетации, Бк/кг С.

В качестве фоновых значений $\text{NA}_{\text{bcg},^{14}\text{C},j}$ использовались сведения о глобальном содержании $^{14}\text{CO}_2$ в атмосфере по данным 23 наблюдательных станций, расположенных в северном и южном полушариях Земли [5]. Период вегетации для района расположения Билибинской АЭС был принят равным июню-июлю каждого рассматриваемого года.

Для оценки запаса ^{14}C в древесине лиственниц зоны воздействия выбросов реакторных установок ЭГП-6 необходимо последовательно определить:

- площадь зоны воздействия выбросов ^{14}C при эксплуатации Билибинской АЭС, га;
- запас древесины лиственниц на установленной площади воздействия, $\text{м}^3/\text{га}$;
- содержание ^{14}C в каждом годовом кольце лиственниц на установленной площади воздействия с учетом удаления от источника выброса, Бк/кг С;
- распределение содержания ^{14}C в древесине лиственниц при удалении от источника в выбранном румбе направления ветра, Бк/кг С;
- содержание стабильного углерода в древесине, кг С/ м^3 .

Для скрининговой оценки площади ареала, в котором может быть идентифицирован ^{14}C в древесной растительности от выбросов Билибинской АЭС, целесообразно воспользоваться подходом Научного комитета по действию атомной радиации (НЦДАР) ООН к определению объемной активности радионуклидов $A_{\text{p.n.}}(x)$ в приземном слое атмосферы (Бк/ м^3) на расстоянии более 1 км по ветру от источника выброса [11] в виде выражения

$$A_{\text{p.n.}}(x) = F_1 Q x^{-n}, \quad (2)$$

где F_1 — среднегодовой коэффициент разбавления на расстоянии 1 км, $\text{с}/\text{м}^3$; Q — интенсивность выброса, Бк/с; x — расстояние по доминирующему направлению ветра от источника выброса ^{14}C , км; n — индекс, определяемый эмпирическим путем.

В районе расположения Билибинской АЭС преобладают ветра северных румбов, дующих в направлении сектора между румбами от юго-юго-запад и юго-юго-восток. НЦДАР ООН считает наилучшим приближением для F_1 значение $5,3 \cdot 10^{-7} \text{ с}/\text{м}^3$ при значении n в случае ^{14}C , равном 1,4 [11]. С учетом данных рекомендаций выражение (2) примет вид

$$A_{\text{air},^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x) = 5,3 \cdot 10^{-7} Q_j x^{-1,4}, \quad (3)$$

где $A_{\text{air},^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x)$ — средняя объемная активность ^{14}C в атмосферном воздухе на расстоянии более 1 км по ветру от Билибинской АЭС, обусловленная эксплуатацией реакторных установок ЭГП-6 за j -й год вегетации, Бк/ м^3 ; Q_j — средняя интенсивность выброса за j -й год вегетации, Бк/с.

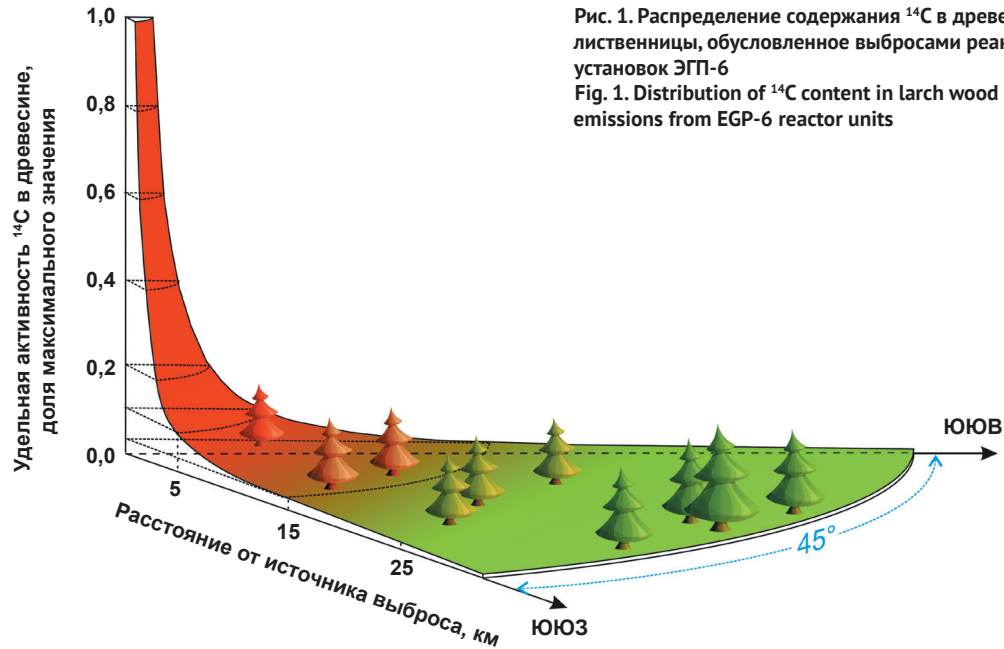


Рис. 1. Распределение содержания ^{14}C в древесине лиственницы, обусловленное выбросами реакторных установок ЭГП-6
 Fig. 1. Distribution of ^{14}C content in larch wood caused by emissions from EGP-6 reactor units

Если консервативно принять условие постоянной интенсивности выброса ^{14}C на протяжении календарного года, то значение $A_{air,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x)$ будет соответствовать средней по j -му году объемной активности ^{14}C в атмосферном воздухе на различных расстояниях в румбе с преобладающим направлением ветра. Консервативная оценка содержания ^{14}C в кольце древесины лиственницы, сформированном за j -й год вегетации, $A_{air,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x)$, выраженная в Бк/кг, основана на соотношении, связывающем искомую величину со средним значением объемной активности ^{14}C (Бк/м³) в атмосферном воздухе [11]:

$$A_{Lairx,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x) = A_{air,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x) \frac{S_{Lairx}}{S_{air}}, \quad (4)$$

где S_{Lairx} — содержание стабильного углерода в древесине лиственницы, г С/кг; $S_{air} = 0,2$ — содержание стабильного углерода в атмосферном воздухе, г С/м³.

Выражение (4) позволяет рассчитанные значения $A_{air,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x)$ использовать для оценки нормализованной активности ^{14}C в образце древесного кольца лиственницы $NA_{Lairx,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x)$ за j -й год вегетации на любом расстоянии x от источника выброса:

$$\begin{aligned} NA_{Lairx,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x) &= \frac{A_{Lairx,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x)}{S_{Lairx}} = \\ &= \frac{A_{air,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x)}{S_{air}} = \frac{5,3 \cdot 10^{-7} Q_j x^{-1,4}}{0,2}. \end{aligned} \quad (5)$$

Численное значение S_{Lairx} получено на основании диапазона значений конверсионных коэффициентов (т С/м³ древесины) для расчета запаса углерода в биомассе древостоя по объемному запасу древе-

сины лесного насаждения и плотности лиственницы. Диапазон значений конверсионного коэффициента для лиственницы зоны средневозрастной северной тайги составляет 497 кг С/м³ древесины¹. Плотность древесины лиственницы ρ_{Lairx} принята равной 660 кг/м³ [29]. Установленные исходные данные позволяют оценить численное значение S_{Lairx} равным 753 г С/кг.

Применение ограничения в виде условия достоверного определения ^{14}C в древесине лиственниц от выбросов Билибинской АЭС на уровне 0,01 максимального позволяет определить расстояние по направлению ветра, ограничивающее ареал оценки запаса ^{14}C в лиственничных лесах, сформированный эксплуатацией реакторных установок ЭГП-6.

$$\frac{A_{air,^{14}\text{C}}(x)}{\max A_{air,^{14}\text{C}}} \leq 0,01. \quad (6)$$

Согласно выражению (3) и с учетом выражения (4) определено расстояние от источника выброса в секторе доминирующих направлений ветра, при котором выполняется условие выражения (6), равное 27 км. На удалении 5 км от источника выброса обнаруживаемое содержание ^{14}C в древесине лиственницы будет на уровне 10% максимального значения активности, установленного в образцах деревьев участка максимального воздействия (рис. 1).

Площадь участка произрастания лиственниц, ограниченного условием (6), будет соответствовать сектору, равному 1/8 (два из 16 румбов) пло-

¹ Приказ Минприроды России «Об утверждении методик количественного определения объемов выбросов парниковых газов и поглощения парниковых газов» от 27 мая 2022 г. № 371.

щади окружности радиусом 27 км, что составляет 286,3 км², или 28 627 га. С учетом плотности произрастания лиственницы в Чукотском АО (запас лиственничных лесов — 27 м³/га) функция распределения суммарного объема древесины при удалении от источника выброса описывается простой зависимостью

$$V_{wood}(x) = 100 \cdot 27 \frac{1}{8} \pi x^2, \quad (7)$$

где 100 — коэффициент пропорциональности, 1 га = 0,01 км²; 27 — средний запас лиственничных лесов в Чукотском АО, м³/га; 1/8 — доля рассматриваемого сектора в площади окружности радиусом x . На всей площади выделенного сектора при $x = 27$ км находится ~773 тыс. м³ лиственничной древесины. Рассчитанный объем лиственничной древесины будет содержать от $2,94 \cdot 10^8$ до $3,98 \cdot 10^8$ кг стабильного углерода.

В рамках скрининговой оценки запаса ¹⁴C в выбранном виде древесной растительности достаточно провести отбор образцов древесных колец на локальном участке вблизи критической точки ($x = x_1$). Для оценки запаса ¹⁴C в древесине лиственниц, сформированного за период T лет воздействия выбросов АЭС, целесообразно выделить две условные зоны:

- ближняя зона воздействия — сектор между румбами преимущественного направления ветра в радиусе, равном расстоянию от источника выброса до локального участка с максимальным воздействием выброса (критическая точка) $[0; x_1]$;
- основная зона воздействия — часть сектора между румбами преимущественного направления ветра на расстоянии от критической точки до 27 км от Билибинской АЭС $[x_1; 27]$.

В ближней зоне результат оценки вклада выброса ¹⁴C Билибинской АЭС в активность древесины за j -й год вегетации $NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(0; x_1)$ принимает максимальное значение и соответствует содержанию техногенного ¹⁴C в кольцах j -го года любой лиственницы, произрастающей на участке от источника выброса до границы ближней зоны. В зоне основного воздействия активность ¹⁴C в древесине снижается при удалении от источника согласно выражению (5).

Среднее нормализованное содержание ¹⁴C во всем объеме древесины лиственницы за рассматриваемый период воздействия (T лет эксплуатации) на любом расстоянии x от источника выбросов АЭС $NA_{Lairx, 14C}^{NPP}(x)$ (Бк/кг С) будет определяться выражением

$$NA_{Lairx, 14C}^{NPP}(x) = \frac{1}{T} \sum_0^T NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x). \quad (8)$$

Используя выражение (5) и экспериментальные значения $NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1)$ в образцах древесных колец в критической точке на определенном расстоянии x_1 от источника выброса, можно оценить сред-

нюю интенсивность выброса ¹⁴C (Бк/с) за любой рассматриваемый j -й год вегетации:

$$Q_j = \frac{S_{air}}{5,3 \cdot 10^{-7} x_1^{-1,4}} NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1), \quad (9)$$

где x_1 — фиксированное ($x_1 = const$) расстояние от источника выброса ¹⁴C до участка расположения критической точки, км.

Расчет интенсивности выброса ¹⁴C Q_i (Бк/с) за любой рассматриваемый j -й год необходим для оценок нормализованной активности $NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1; 27)$ на любом другом удалении ($x > x_1$) древесной растительности от источника выброса в основной зоне воздействия.

$$NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1; 27) = \frac{x_1^{-1,4}}{x_1^{-1,4}} NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1). \quad (10)$$

Для расчета средней интенсивности выброса ¹⁴C Q_T (Бк/с) за выбранный период, позволяющей выполнить оценку нормализованной активности ¹⁴C в древесине, используется подобное (9) выражение

$$Q_T = \frac{S_{air}}{5,3 \cdot 10^{-7} x_1^{-1,4}} \frac{1}{T} \sum_0^T NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1). \quad (11)$$

Сформированная за период эксплуатации АЭС T нормализованная активность в основной зоне воздействия $[x_1; 27]$ будет определяться выражением

$$NA_{Lairx, 14C, T}^{NPP}(x_1; 27) = \frac{x_1^{-1,4}}{x_1^{-1,4}} \frac{1}{T} \sum_0^T NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1). \quad (12)$$

На основе принятого условного зонирования запас ¹⁴C (Бк) $SUP_{NPP, 14C, T}(0; x_1)$ в древесине за период эксплуатации ($T = 48$ лет) Билибинской АЭС на площади ближней зоны ($x_1 = 1,8$ км) от источника выброса с учетом выражений (7) и (8) будет определяться выражением

$$SUP_{NPP, 14C, T}(0; x_1) = V_{wood}(0; x_1) \rho_{Lairx} \times S_{Lairx} \frac{1}{T} 10^{-3} \sum_0^T NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1), \quad (13)$$

где $V_{wood}(0; x_1) = 100 \cdot 27 \frac{1}{8} \pi x_1^2$ — объем древесины лиственницы в ближней зоне установленной площади воздействия, определяемый выражением (7) в секторе на расстоянии от 0 до x_1 км от источника выброса, м³; S_{Lairx} — нормализованная масса стабильного углерода в древесине, 753 г С/кг; 10^{-3} — коэффициент пропорциональности для S_{Lairx} , 1 г С/кг = 0,001 кг С/кг; ρ_{Lairx} — плотность древесины лиственницы, принятая равной 660 кг/м³.

При принятых условиях зонирования нормализованная активность ¹⁴C в древесине лиственниц, произрастающих в основной зоне воздействия $[x_1; 27]$, относительно максимального значения

$NA_{Lairx, 14C, j}^{NPP}(x_1)$ будет уменьшаться независимо от

интенсивности выброса обратно пропорционально удалению от источника выброса по закономерности $x^{-1,4}$, где x принимает значение от x_1 до 27 км от Билибинской АЭС. Для оценки запаса ^{14}C в основной зоне целесообразно воспользоваться способом расчета объема фигуры вращения вокруг вертикальной оси, общий вид которого имеет вид

$$V_{rot} = \text{const } 2\pi \int_a^b xy dx. \quad (14)$$

В рассматриваемой ситуации $y = x^{-1,4}$, поэтому итоговое подынтегральное выражение (xy) преобразуется в $x^{-0,6}$. Для учета снижения активности ^{14}C в отдельном рассматриваемом секторе фигуры вращения, ограниченного углом 45° (см. рис. 1) на ограниченном участке $[x_1; 27]$, используется $1/8$ значения определенного интеграла

$$V_{rot} = \text{const } \frac{1}{8} 2\pi \int_{x_1}^{27} x^{-0,6} dx. \quad (15)$$

Итоговое выражение для оценки запаса ^{14}C $\text{SUP}_{\text{NPP},^{14}\text{C},T}(x_1; 27)$ (Бк) в древесине за период эксплуатации ($T = 48$ лет) Билибинской АЭС на площади основной зоны воздействия будет определяться выражением

$$\begin{aligned} \text{SUP}_{\text{NPP},^{14}\text{C},T}(0; Tx_1) &= \\ &= V_{wood}(x_1; 27) \rho_{Larix} S_{Larix} \frac{10^{-3}}{x_1^{-1,4}} \times \\ &\times \frac{\sum_0^T \text{NA}_{Larix,^{14}\text{C},j}^{\text{NPP}}(x_1)}{T} \frac{\pi}{4} \int_{x_1}^{27} x^{-0,6} dx, \end{aligned} \quad (16)$$

где $V_{wood}(x_1; 27)$ — объем древесины лиственницы на площади зоны основного воздействия в выбранном секторе на расстоянии от x_1 до 27 км от источника выброса (м^3) определяется выражением

$$V_{wood}(x_1; 27) = 100 \cdot 27 \frac{1}{8} \pi (27^2 - x_1^2). \quad (17)$$

Общий запас ^{14}C (Бк) в древесине за период эксплуатации $T = 48$ лет Билибинской АЭС на всей рассматриваемой площади воздействия определяется суммой

$$\begin{aligned} \text{SUP}_{\text{NPP},^{14}\text{C}}(0; 27) &= \\ &= \text{SUP}_{\text{NPP},^{14}\text{C}}(0; x_1) + \text{SUP}_{\text{NPP},^{14}\text{C}}(x_1; 27), \end{aligned} \quad (18)$$

где $\text{SUP}_{\text{NPP},^{14}\text{C}}(0; x_1)$ — результат расчета по выражению (13), Бк; $\text{SUP}_{\text{NPP},^{14}\text{C}}(x_1; 27)$ — результат расчета по выражению (16), Бк.

Оценка запаса в рамках данной работы выполняется только в заданном секторе двух румбов с преобладающим направлением ветра. Для оценки запаса в других секторах достаточно полученные результаты для румбов ЮЮЗ и ЮЮВ скорректиро-

вать на вероятность направления ветра в другом выбранном направлении.

Результаты исследования

Техногенный вклад в содержание ^{14}C в годичных кольцах древесины вблизи станции оценивается с момента ввода в эксплуатацию энергоблоков Билибинской АЭС (1974 г.) и до момента отбора ядерной древесины лиственницы в рамках исследования (2022 г.). В табл. 1 представлены результаты измерения ^{14}C в годичных кольцах лиственницы Каяндера $\text{NA}_{Larix,^{14}\text{C},j}$ и средние фоновые содержания ^{14}C в приземном слое атмосферы северного полушария $\text{NA}_{bcg,^{14}\text{C},j}$, Бк/кг С. Выбор годичных колец для измерения производился с переменным временным шагом, исходя из возможного режима эксплуатации станции. Для периода штатной работы АЭС (1974—2010 гг.), когда значительных колебаний выбросов ^{14}C не предполагалось, шаг отбора составил 4 года.

Таблица 1. Удельная активность ^{14}C в годичных кольцах лиственницы Каяндера и в приземном слое атмосферы района расположения Билибинской АЭС

Table 1. Specific activity of ^{14}C in the annual rings of Cajander larch and in the ground layer of the atmosphere in the area of the Bilibino NPP

Год	Удельная активность ^{14}C , Бк/кг С	
	В годичных кольцах лиственницы	Фон
1974	315,77±1,75	316,15±2,17
1978	305,44±1,50	296,63±0,88
1982	290,30±1,43	281,14±1,02
1986	277,37±1,38	268,85±0,36
1990	268,33±1,29	260,26±0,25
1994	262,09±1,31	253,57±0,14
1998	252,69±1,26	248,53±0,18
2002	253,28±1,27	243,58±0,25
2006	248,62±1,24	238,81±0,09
2010	241,44±1,22	234,99±0,09
2012	239,70±1,20	232,76±0,14
2013	241,23±1,22	231,65±0,14
2015	242,45±1,23	229,57±0,11
2016	241,71±1,18	228,76±0,14
2018	239,24±1,17	227,49±0,14
2020	240,03±1,19	226,14±0,18
2022	233,91±1,16	225,23±0,32

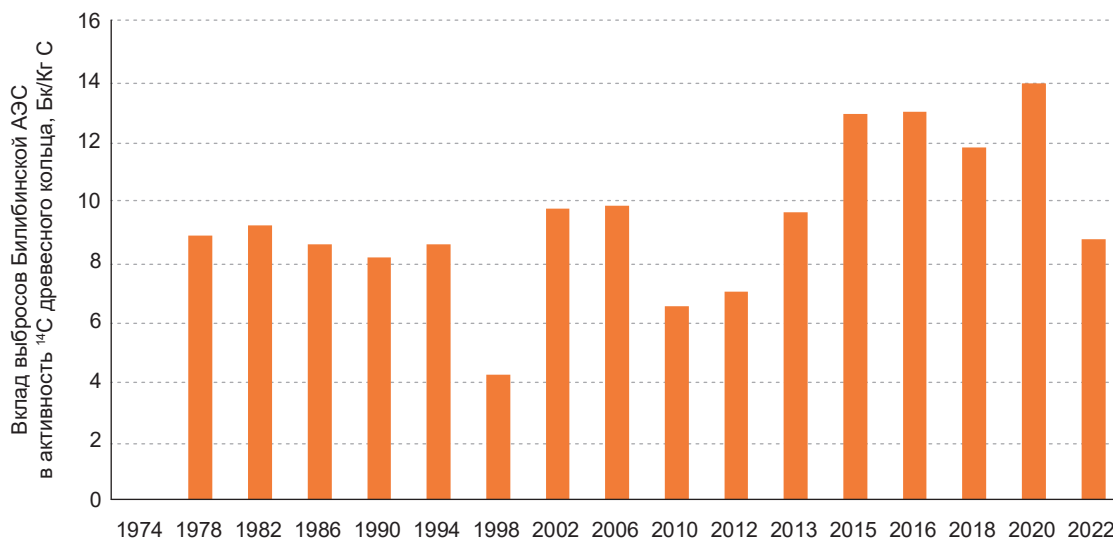


Рис. 2. Содержание ¹⁴C в древесных кольцах лиственницы, обусловленное выбросами реакторных установок ЭГП-6, Бк/кг С
 Fig. 2. Content of ¹⁴C in larch tree rings caused by emissions from the EGP-6 reactor units, Bq/kg C

Начиная с 2012 г. в связи с проведением работ на графитовой кладке, потенциально сопровождавшихся повышенной выбросом радиоуглерода, шаг составил 1—2 года. С использованием выражения (1) и данных табл. 1 был определен вклад выбросов Билибинской АЭС в содержание ¹⁴C в древесине лиственницы за *j*-й год вегетации в ближней зоне воздействия $NA_{Lairx,^{14}C,j}(0; 1,8)$, принимаемой в качестве максимальной достижимой активности для применения в последующих расчетах. Расчетная объемная активность согласно методике НКДАР ООН по формуле (2) для критической точки местности составила $2,12 \cdot 10^{-6}$ Бк/м³, что сопоставимо с объемной активностью, рассчитанной по методике ПДВ-АЭС-2016, — $2,72 \cdot 10^{-6}$ Бк/м³ [4].

В зависимости от рассматриваемого года удельная активность техногенного ¹⁴C в отобранных образцах находится в диапазоне от 4,2 до 13,9 Бк/кг С. Визуализация результатов расчета $NA_{Lairx,^{14}C,j}(0; 1,8)$ представлена на рис. 2.

Наибольший техногенный вклад в содержание ¹⁴C в годичных кольцах лиственницы от выбросов Билибинской АЭС наблюдался с 2013 по 2020 гг. и составил 11,8—13,9 Бк/кг С. Значение абсолютной неопределенности оценки техногенного вклада $NA_{Lairx,^{14}C,j}^{NPP}(0; 1,8)$ от 1,2 до 1,8 Бк/кг С. Значение относительной неопределенности оценки вклада выбросов энергоблоков ЭГП-6 в активность ¹⁴C в древесных кольцах обратно пропорционально рассчитанной величине $NA_{Lairx,^{14}C,j}^{NPP}(0; 1,8)$ и находится в диапазоне от 8,7% (для 13,9 Бк/кг С) до 30,6% (для 4,2 Бк/кг С) от абсолютной неопределенности. В табл. 2 приведены максимальные значения превышения содержания ¹⁴C в годичных кольцах деревьев над фоновыми уровнями по данным зарубежных исследований.

Согласно данным табл. 2, техногенный вклад ¹⁴C от выбросов Билибинской АЭС сопоставим по порядку величины с другими атомными станциями, однако среди рассмотренных является минимальным. Это, вероятно, обусловлено коротким вегетационным периодом в регионе расположения АЭС.

Ввиду того, что измерение ¹⁴C в годичных кольцах лиственницы проводилось с определенным шагом, значения удельной активности в не проанализированных образцах консервативно принимались равными значениям, полученным для ближайшего последующего года измерений. Такое условие обосновано тем, что подготовка счетного образца из объединенной пробы последовательно расположенных готовых колец позволяет провести измерение содержания ¹⁴C, усредненное по отобранным кольцам. Так, за все годы с 1975-го по 1978-й значения $NA_{Lairx,^{14}C,j}^{NPP}$, где *j* принимает значения от 1974 до 1978 гг., принимаются равными $NA_{Lairx,^{14}C,1978}^{NPP}$. Вклад выбросов за 1974 г. принимается равным нулю. И аналогично далее:

- в период с 1979 по 1982 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,1982}^{NPP}$;
- в период с 1983 по 1986 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,1986}^{NPP}$;
- в период с 1987 по 1990 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,1990}^{NPP}$;
- в период с 1991 по 1994 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,1994}^{NPP}$;
- в период с 1995 по 1998 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,1998}^{NPP}$;
- в период с 1999 по 2002 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,2002}^{NPP}$;
- в период с 2003 по 2006 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,2006}^{NPP}$;
- в период с 2007 по 2010 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,2010}^{NPP}$;
- в период с 2011 по 2012 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,2012}^{NPP}$;
- в период с 2014 по 2015 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,2015}^{NPP}$;
- в период с 2017 по 2018 гг. — $NA_{Lairx,^{14}C,2018}^{NPP}$;

Таблица 2. Сравнение наибольшего техногенного вклада от эксплуатации различных АЭС в содержание ^{14}C в годичных кольцах деревьев
Table 2. Comparison of the largest anthropogenic contribution from the operation of various nuclear power plants to the content of ^{14}C in tree rings

АЭС	Наибольший техногенный вклад от выброса ^{14}C , Бк/кг С	Ссылка
Игналинская	31,6	[13; 14]
Кршко	69,6	[15]
Циньшань	62,4	[16]
Имени адмирала Алваро Алберто	58,0	[18]
Пакш	29,4	[19]
Ханул	93,1	[20]
Вольсон	266,1	[20]
Ханбит	49,7	[20]
Кори	57,8	[20]
Чернаводэ	85,0	[21]
Курская	94,0	[7]
Билибинская	13,9	[5]

- в период с 2019 по 2020 гг. — $NA_{Larix,^{14}\text{C},2020}^{\text{NPP}}$;
 - в период с 2021 по 2022 гг. — $NA_{Larix,^{14}\text{C},2022}^{\text{NPP}}$.
- При принятых условиях среднее значение содержания ^{14}C в древесине лиственницы ближней зоны $NA_{Larix,^{14}\text{C}}^{\text{NPP}}(0; 1,8)$ с учетом активности колец за каждый год вегетации согласно выражению (8) составляет $8,65 \pm 1,19$ Бк/кг С.

Оценка запаса ^{14}C в древесине лиственницы ближней зоны воздействия выбросов Билибинской АЭС выполнена согласно выражению (13). Объем древесины лиственницы в ближней зоне $V_{wood}(0; 1,8)$ определяется по выражению (7) при $x = 1,8$ км. Средний запас лиственничных лесов в Чукотском АО принимается равным $27 \text{ м}^3/\text{га}$, и в рассматриваемом секторе двух румбов ЮЮЗ и ЮЮВ объем древесины лиственницы оценивается в размере $3,4$ тыс. м^3 . Если плотность древесины лиственницы равна $660 \text{ кг}/\text{м}^3$, а значение $S_{Larix} = 753 \text{ г С}/\text{кг}$, запас ^{14}C в древесине лиственницы ближней зоны $SUP_{\text{NPP},^{14}\text{C}}(0; 1,8)$, сформированный выбросами Билибинской АЭС, согласно выражению (13) составляет $14,8 \pm 2,0$ кБк.

Оценка запаса ^{14}C в древесине лиственницы основной зоны воздействия выбросов Билибинской АЭС выполнена согласно выражению (16). Объем древесины лиственницы в основной зоне воздействия $V_{wood}(1,8; 27)$, равный $\sim 769,1$ тыс. м^3 , определен по выражению (17). В этом объеме древесины лиственницы основной зоны воздействия за период эксплуатации $T = 48$ лет накоплено $4,2 \pm 0,6$ МБк радиоуглерода.

В рассмотренном секторе на площади $\sim 2,3 \cdot 10^5 \text{ км}^2$ за 48 лет эксплуатации реакторных установок ЭГП-6 накоплено $4,2 \pm 0,6$ МБк ^{14}C . Распределение запаса ^{14}C в древесине лиственницы в секторе преимущественного направления ветра между ближней зоной и основной зоной воздействия выбросов Билибинской АЭС составило $0,35\%$ и $99,65\%$ соответственно.

Согласно результатам регулярных радиационно-технических обследований источников выброса энергоблоков ЭГП-6, среднегодовой выброс ^{14}C Билибинской АЭС составляет $2,46$ ТБк/год [4]. При таких уровнях воздействия радиоуглерода за 48 лет эксплуатации в атмосферу поступило $118,1$ ТБк ^{14}C . В древесине лиственницы на площади выбранного сектора накоплено не более $3,56 \cdot 10^{-6}\%$ суммарного выброса ^{14}C .

Заключение

В данной работе выполнен анализ содержания ^{14}C в годичных кольцах наиболее представительного вида древесной растительности — лиственницы Каяндера в районе расположения Билибинской АЭС. Результаты измерений с помощью ускорительной масс-спектрометрии показали в каждом из образцов техногенный вклад в удельную активность ^{14}C , который обусловлен работой четырех графито-водных реакторов ЭГП-6 в период с 1974 по 2022 гг. и находится в диапазоне от $4,2$ до $13,9$ Бк на один килограмм стабильного углерода (от 2% до 6% от фонового содержания).

Анализ метеорологических данных района расположения Билибинской АЭС и характеристики ее источников выбросов ^{14}C позволили обосновать выбор секторов основного направления ветра и площадь ареала произрастания лиственниц Каяндера, на которой формируется наибольшее значение объемной активности ^{14}C в вегетационный период.

Запас древесины лиственницы на площади 286 км^2 максимального воздействия выбросов Билибинской АЭС в направлении двух румбов ЮЮЗ и ЮЮВ составляет около 773 тыс. м^3 . За 48 лет эксплуатации реакторных установок ЭГП-6 в указанном объеме древесины накоплено $4,2 \pm 0,6 \text{ МБк } ^{14}\text{C}$.

Полученное скрининговое значение накопленной активности в древесине составляет не более $3,56 \cdot 10^{-6}\%$ суммарного выброса ^{14}C Билибинской АЭС с 1974 по 2022 г. С учетом запланированного завершения эксплуатации энергоблоков ЭГП-6 в 2025 г. представленное скрининговое значение запаса радиоуглерода в древесине лиственницы может быть использовано в качестве базовой линии для сравнения выбросов радиоуглерода на всех этапах вывода из эксплуатации Билибинской АЭС.

Применение ускорительной масс-спектрометрии для измерения содержания углерода-14 в природных компонентах арктического региона позволяет проводить комплексную оценку техногенного воздействия данного радионуклида на уникальные экосистемы Крайнего Севера, обусловленного как текущей деятельностью атомной энергетики, так и последствиями ядерных испытаний второй половины XX в.

Финансирование

Исследование выполнено за счет субсидий Минобрнауки РФ на выполнение научной темы FUMN-2024-0001.

Литература/References

1. Антонов К. Л., Поддубный В. А., Маркелов Ю. И. и др. Некоторые итоги мониторинга парниковых газов в арктическом регионе России // Арктика: экология и экономика. — 2018. — № 1 (29). — С. 56—67. — DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67.

Antonov K. L., Poddubny V. A., Markelov Yu. I. et al. Some results of monitoring greenhouse gases in the Arctic region of Russia. Arctic: Ecology and Economy, 2018, no. 1 (29), pp. 56—67. DOI: 10.25283/2223-4594-2018-1-56-67. (In Russian).

2. Тишков А. А. «Арктический вектор» в сохранении наземных экосистем и биоразнообразия // Арктика: экология и экономика. — 2012. — № 2 (6). — С. 28—43.

Tishkov A. A. "Arctic vector" in the conservation of terrestrial ecosystems and biodiversity. Arctic: Ecology and Economy, 2012, no. 2 (6), pp. 28—43. (In Russian).

3. Назаров Е. И., Екидин А. А., Васильев А. В. Оценка поступления углерода-14 в атмосферу, обусловленного выбросами АЭС // Изв. вузов. Физика. — 2018. — Т. 61, № 12-2 (732). — С. 67—73.

Nazarov E. I., Ekidin A. A., Vasiliev A. V. Assessment of carbon-14 emissions into the atmosphere due to NPP emissions. Izvestiya vuzov. Fizika, 2018, vol. 61, no. 12-2 (732), pp. 67—73. (In Russian).

4. Крышев А. И., Крышев И. И., Васянович М. Е. и др. Оценка дозы облучения населения от выброса ^{14}C АЭС с РБМК-1000 и ЭГП-6 // Атом. энергия. — 2020. — Т. 128, № 1. — С. 46—52.

Kryshch A. I., Kryshch I. I., Vasyanovich M. E. et al. Population Irradiation Dose Assessment for ^{14}C Emissions from NPP with RBMK-1000 and EGP-6 Reactors. Atomic Energy, 2020, vol. 128, no. 1, pp. 53—59. DOI: 10.1007/s10512-020-00650-2.

5. Назаров Е. И. Методология ретроспективной оценки радиационного воздействия от выброса углерода-14 (на примере Билибинской АЭС) // Траектория исследований — человек, природа, технологии. — 2025. — № 2 (14). — С. 2—14. — DOI: 10.56564/27825264_2025_2_2.

Nazarov E. I. Methodology of retrospective assessment of radiation impact from carbon-14 emission (using the Bilibino NPP as an example). Traektoriya issledovaniy — chelovek, priroda, tekhnologii, 2025, no. 2 (14), pp. 2—14. DOI: 10.56564/27825264_2025_2_2. (In Russian).

6. Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И. и др. Особенности пространственного распределения радионуклидов активационного происхождения в облученном графите // Изв. вузов. Физика. — 2022. — Т. 65, № 5 (774). — С. 63—72. — DOI: 10.17223/00213411/65/5/63.

Pavliuk A. O., Kotlyarevsky S. G., Kan R. I. et al. Activation Product Distribution in Irradiated Graphite. Russian Physics J., 2022, vol. 65, no. 5, pp. 830—839. DOI: 10.1007/s11182-022-02704-3.

7. Назаров Е. И., Кружалов А. В., Васянович М. Е. и др. ^{14}C в tree rings in the vicinity of the RBMK reactor Nuclear power plant. Radiocarbon, 2023, vol. 65, no. 6, pp. 1343—1350. DOI: 10.1017/rdc.2023.125.

8. Дорофеев А. Н., Комаров Е. А., Захарова Е. В. и др. К вопросу захоронения реакторного графита // Радиоактив. отходы. — 2019. — № 2 (7). — С. 18—30. — DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30.

Dorofeev A. N., Komarov E. A., Zakharova E. V. et al. On the issue of disposal of reactor graphite. Radioaktivnye otkhody, 2019, no. 2 (7), pp. 18—30. DOI: 10.25283/2587-9707-2019-2-18-30. (In Russian).

9. Белкин Д. Ю., Иванов И. А., Тананаев И. Г. Концепция по выводу из эксплуатации промышленных уран-графитовых реакторов (ПО «Маяк», Челябинская область) // Вестн. Дальневост. отделения Рос. акад. наук. — 2016. — № 3 (187). — С. 58—65.

Belkin D. Yu., Ivanov I. A., Tananaev I. G. Concept for decommissioning of industrial uranium-graphite reactors (PO Mayak, Chelyabinsk region). Vestnik

- Dal'nevostochnogo otdeleniya Rossiiskoi akademii nauk, 2016, no. 3 (187), pp. 58—65. (In Russian).
10. Павлюк А. О., Котляревский С. Г., Кан Р. И. и др. Анализ динамики выхода радионуклидов ^{14}C и ^{36}Cl из облученного графита РБМК-1000 в водных средах // Радиоактив. отходы. — 2022. — № 2 (19). — С. 35—48. — DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-35-48.
- Pavlyuk A. O., Kotlyarevsky S. G., Kan R. I. et al. Analysis of the dynamics of the release of radionuclides ^{14}C and ^{36}Cl from irradiated RBMK-1000 graphite in aqueous environments. *Radioaktivnye otkhody*, 2022, no. 2 (19), pp. 35—48. DOI: 10.25283/2587-9707-2022-2-35-48. (In Russian).
11. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. Sources, Effects and Risks of Ionizing Radiation. UNSCEAR 2016 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. UNITED NATIONS, New York, 2017.
12. Назаров Е. И., Кружалов А. В., Васянович М. Е. и др. ^{14}C в годичных кольцах деревьев в районе расположения объектов использования атомной энергии // Изв. высш. учеб. заведений. Ядер. энергетика. — 2022. — № 1. — С. 107—117. — DOI: 10.26583/пре.2022.1.09.
- Nazarov E. I., Kruzhalov A. V., Vasyanovich M. E. et al. ^{14}C in tree rings in the vicinity of the nuclear facility deployment areas. *Nuclear Energy and Technology*, 2022, vol. 8, no. 3, pp. 173—177. DOI: 10.3897/nucet.8.93905.
13. Mazeika J., Petrosius R., Pukiene R. Carbon-14 in tree rings and other terrestrial samples in the vicinity of Ignalina Nuclear Power Plant, Lithuania. *J. of Environmental Radioactivity*, 2008, vol. 99, no. 2, pp. 238—247. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.07.011.
14. Ežerinskis Ž., Šapolaitė 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, vol. 60, no. 4, pp. 1227—1236. DOI: 10.1017/RDC.2018.44.
15. Šturm M., Vreča P., Bronić I. K. Carbon isotopic composition ($\delta^{13}\text{C}$ and ^{14}C activity) of plant samples in the vicinity of the Slovene nuclear power plant. *J. of Environmental Radioactivity*, 2012, vol. 110, pp. 24—29. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2012.01.021.
16. Wang Z., Xiang Y., Guo Q. ^{14}C levels in tree rings located near Qinshan nuclear power plant, China. *Radiocarbon*, 2012, vol. 54, no. 2, pp. 195—202. DOI: 10.2458/azu_js_rc.v54i2.15869.
17. Povinec P. P., Kontul' I., Jeřkovský M. et al. Long-term radiocarbon variation studies in the air and tree rings of Slovakia. *J. of Environmental Radioactivity*, 2024, vol. 274, p. 107401. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2024.107401.
18. Dias C. M., Santos R. V., Stenström K. et al. ^{14}C content in vegetation in the vicinities of Brazilian nuclear power reactors. *J. of Environmental Radioactivity*, 2008, vol. 99, pp. 1095—1101. DOI: 10.1016/j.jenvrad.2007.12.025.
19. Janovics R., Kern Z., Güttler 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: 10.1017/S0033822200057982.
20. Lee J. H., Kim C. H., Kang J. et al. Radiocarbon Data from the Vicinity of Four South Korean Nuclear Power Plants in 2013—2014. *Radiocarbon*, 2017, vol. 59, no. 3, pp. 973—984. DOI: 10.1017/RDC.2017.42.
21. Magnusson A., Stenström K., Skog G. et al. Levels of ^{14}C in the terrestrial environment in the vicinity of two European nuclear power plants. *Radiocarbon*, 2004, vol. 46, no. 2, pp. 863—868. DOI: 10.1017/S003382220003589X.
22. Milton G. M., Kramer S. J., Brown R. M. et al. Radiocarbon dispersion around Canadian nuclear facilities. *Radiocarbon*, 1995, vol. 37, no. 2, pp. 485—496. DOI: 10.1017/S0033822200030964.
23. Современное состояние лесов российского Дальнего Востока и перспективы их использования / Под ред. А. П. Ковалева. — Хабаровск, 2009. — 470 с. The current state of forests in the Russian Far East and prospects for their use. Ed. by A. P. Kovalev. Khabarovsk, 2009, 470 p. (In Russian).
24. Николин Е. Г. Высотный предел распространения лиственницы Каяндера в отрогах Чуванского хребта (бассейн реки озерное Горло, Чукотка) // Сибир. лесной журн. — 2022. — № 4. — С. 57—62. — DOI: 10.15372/SJFS20220406.
- Nikolin E. G. Altitudinal limit of distribution of Cajander larch in the spurs of the Chuvansky ridge (Ozernoe Gorlo River basin, Chukotka). *Sibirskii lesnoi zhurnal*, 2022, no. 4, pp. 57—62. DOI: 10.15372/SJFS20220406. (In Russian).
25. Wacker L., Nemes M., Bourquin J. A revolutionary graphitisation system: Fully automated, compact and simple. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, 2010, vol. 268, pp. 931—934. DOI: 10.1016/j.nimb.2009.10.067.
26. 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: 10.31857/S0032816221060185.
- Nazarov E. I., Kruzhalov A. V., Ekinin A. A. et al. Instruments and Methods for Measuring ^{14}C (a Review). *Instruments and Experimental Techniques*, 2021, vol. 64, no. 6, pp. 790—795. DOI: 10.1134/S0020441221060166.
27. Synal H.-A., Stocker M., Suter M. MICADAS: A new compact radiocarbon AMS system. *Nucl. Instruments Methods Phys. Res. Sect. B Beam Interact. with Mater. Atoms*, 2007, vol. 259, pp. 7—13. DOI: 10.1016/j.nimb.2007.01.138.
28. Ершова О. В., Пархомчук Е. В. Методические особенности пробоподготовки целлюлозосодержащего материала для радиоуглеродного датирования // Труды VII (XXIII) Всероссийского археологического съезда: Материалы съезда. В 3 т. Красноярск, 06—

10 октября 2025 года. — Красноярск: Сиб. федер. ун-т, 2025. — С. 263—266.

Ershova O. V., Parkhomchuk E. V. Methodological features of sample preparation of cellulose-containing material for radiocarbon dating. Proceedings of the VII (XXIII) All-Russian Archaeological Congress: Proceedings of the Congress. In 3 vol., Krasnoyarsk, October, 06—10, 2025. Krasnoyarsk, Siberian Federal Univ., 2025, pp. 263—266. (In Russian).

29. Чубинский А. Н., Чубинский М. А., Варанкина Г. С. и др. Исследование физико-меха-

нических свойств древесины лиственницы сибирской // Системы. Методы. Технологии. — 2020. — № 4 (48). — С. 168—174. — DOI: 10.18324/2077-5415-2020-4-168-174.

Chubinsky A. N., Chubinsky M. A., Varankina G. S. et al. Study of physical and mechanical properties of Siberian larch wood. Sistemy. Metody. Tekhnologii, 2020, no. 4 (48), pp. 168—174. DOI: 10.18324/2077-5415-2020-4-168-174. (In Russian).

Информация об авторах

Екидин Алексей Акимович, кандидат физико-математических наук, ведущий научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620219, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: ekidin@mail.ru.

Назаров Евгений Игоревич, кандидат технических наук, научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620219, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: nei@esko.uran.ru.

Васянович Максим Евгеньевич, кандидат физико-математических наук, научный сотрудник, Институт промышленной экологии Уральского отделения РАН (620219, Россия, Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, д. 20), e-mail: vme@esko.uran.ru.

Кунарских Владимир Витальевич, кандидат биологических наук, старший научный сотрудник, Институт экологии растений и животных Уральского отделения РАН (620144, Россия, Екатеринбург, ул. 8 Марта, д. 202), e-mail: voloduke@mail.ru.

Ершова Олеся Валерьевна, младший научный сотрудник, Институт археологии и этнографии Сибирского отделения РАН (630090, Новосибирск, просп. академика Лаврентьева, д. 17), e-mail: ersholesya198q@gmail.com.

Пархомчук Екатерина Васильевна, кандидат химических наук, директор Центра коллективного пользования «Ускорительная масс-спектрометрия НГУ-ННЦ», Новосибирский национальный исследовательский государственный университет (630090, Новосибирск, ул. Пирогова, д. 2), e-mail: e.parkhomchuk@g.nsu.ru.

RADIOCARBON TRACE OF THE BILIBINO NUCLEAR POWER PLANT

Ekidin, A. A.¹, Nazarov, E. I.¹, Vasyanovich, M. E.¹, Kukarskikh, V. V.², Ershova, O. V.³, Parkhomchuk, E. V.⁴

¹ Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russian Federation)

² Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (Ekaterinburg, Russian Federation)

³ Institute of Archaeology and Ethnography Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (Novosibirsk, Russian Federation)

⁴ Novosibirsk National Research State University (Novosibirsk, Russian Federation)

The article was received on November 18, 2025

For citing

Ekidin A. A., Nazarov E. I., Vasyanovich M. E., Kukarskikh V. V., Ershova O. V., Parkhomchuk E. V. Radiocarbon trace of the Bilibino NPP. Arctic: Ecology and Economy, 2026, vol. 16, no. 2, pp. 238—249. DOI: 10.25283/2223-4594-2026-2-238-249. (In Russian).

Abstract

The study is aimed at assessing the accumulation of ¹⁴C in tree vegetation from Bilibino NPP emissions over the entire operating period. The researchers carried out ¹⁴C measurements using accelerator mass spectrometry (AMS). The methodological approach used in the study allows tracing the dynamics of ¹⁴C accumulation in larch tree rings over the period from 1974 to 2022. The results range from 233.91±1.16 to 315.7±1.75 Bq/kg C. The largest contribution of Bilibino NPP emissions to the ¹⁴C content was 13.9±1.2 Bq/kg C, which was found in tree rings formed in 2020. In the considered sector of the predominant wind direction, 4.2±0.6 MBq of ¹⁴C have accumulated over 48 years of operation of the EGP-6 reactor units, which amounts to no more than 3.56×10⁻⁶% of the total ¹⁴C emissions from the Bilibino NPP during this period. Considering the operation completion of the EGP-6 power units, these unique results can be used as a safety indicator during all stages of the Bilibino NPP decommissioning.

Keywords: Bilibino Nuclear Power Plant, emissions, carbon-14, radionuclide accumulation, tree rings, larch, timber stock.

Funding

The study was supported by Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation, project FUMN-2024-0001.

Information about the authors

Ekidin, Aleksey Akimovich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Leading Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Sofia Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620219), e-mail: ekidin@mail.ru.

Nazarov, Evgeniy Igorevich, PhD of Engineering, Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Sofia Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620219), e-mail: nei@ecko.uran.ru.

Vasyanovich, Maxim Evgenievich, PhD of Physical and Mathematical Sciences, Researcher, Institute of Industrial Ecology of the Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (20, Sofia Kovalevskaya St., Ekaterinburg, Russia, 620219), e-mail: vme@ecko.uran.ru.

Kukarskikh, Vladimir Vitalievich, PhD of Biological Sciences, Senior Researcher, Institute of Plant and Animal Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences (202, 8 Marta St., Ekaterinburg, Russia, 620144), e-mail: voloduke@mail.ru.

Ershova, Olesya Valeryevna, Junior Researcher, Institute of Archaeology and Ethnography, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences (17, Akademika Lavrentyeva Ave., Novosibirsk, Russia, 630090), e-mail: ersholesya198q@gmail.com.

Parkhomchuk, Ekaterina Vasilyevna, PhD of Chemistry, Director of the NSU-NSC Accelerator Mass Spectrometry Shared Utility Center, Novosibirsk State University (2, Pirogova St., Novosibirsk, Russia, 630090), e-mail: e.parkhomchuk@g.nsu.ru.

© Ekidin A. A., Nazarov E. I., Vasyanovich M. E., Kukarskikh V. V., Ershova O. V., Parkhomchuk E. V., 2026