

УДК 621.039.766

## Тритий в выбросах ядерных реакторных установок различного типа

**Е. И. Назаров<sup>1,2</sup>, А. В. Васильев<sup>1</sup>, А. А. Екидин<sup>1</sup>,  
М. Е. Васянович<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>Институт промышленной экологии УрО РАН, г. Екатеринбург, Россия

<sup>2</sup>Уральский Федеральный университет им. первого Президента России

Б. Н. Ельцина, г. Екатеринбург, Россия

e.nazarov1005@gmail.com

*Проанализирована практика производства электроэнергии АЭС Европы с различными типами реакторных установок в период с 1995 по 2017 гг. в контексте оценки поступления трития в атмосферу при нормальной эксплуатации. Для каждой АЭС Европы был рассчитан медианный удельный показатель выброса трития (ГБк/ГВт·ч). В зависимости от этого показателя, все станции были поделены на 3 типа: с наилучшей, устойчивой и наихудшей практикой выброса. Выполнена консервативная оценка вклада различных ядерных реакторных установок в активность трития в атмосфере.*

### Введение

В настоящий момент атомная энергетика является неотъемлемой частью в жизни человечества и обеспечивает более 10 % производимого в мире электричества [1]. Важным практическим способом подтверждения безопасных условий функционирования АЭС в области охраны окружающей среды является мониторинг выбросов радионуклидов в атмосферу [2]. На 99 % АЭС Европы в программу мониторинга выбросов включен тритий [3]. Это обусловлено тем, что данный радионуклид, как правило, вносит основной вклад в дозовые нагрузки населения [4].

На некоторых АЭС тритий поступает в атмосферу как от источников с организованным выбросом (трубы вентиляционной системы), так и от источников с неорганизованным выбросом (брызгальные бассейны и технологические водоемы, баки запаса дистиллята) [5–7]. В качестве основных источников образования трития на АЭС могут быть выделены [8, 9]:

- продукт тройного деления ядер топлива (при делении ядер  $^{235}\text{U}$  на 1 ГВт электрической мощности в реакторе образуется  $1,15 \cdot 10^{11}$  Бк/сут трития);
- в результате  $(n, \gamma)$  – реакции на ядрах дейтерия, находящегося в теплоносителе – воде;
- при захвате нейтронов ядрами В и Li, находящимися в теплоносителе – воде (при борном регулировании, коррекции водного режима – на АЭС с PWR) и в стержнях регулирования;
- в результате реакции  $^3\text{He}(n, p)^3\text{H}$  в газовом контуре (в газе, заполняющем графитовую кладку) АЭС с LWGR;
- в результате  $(n, ^3\text{H})$  и  $(n, p)$  – реакций быстрых нейтронов на ядрах  $^{14}\text{N}$ ,  $^6\text{Li}$ ,  $^{10}\text{B}$ ,  $^{40}\text{Ca}$  и других, присутствующих в различных конструкционных материалах реактора.

Целью данной работы является оценка поступления трития в атмосферу от выбросов АЭС с различными типами реакторных установок.

## Статистическая обработка данных

С целью оценки поступления трития в атмосферу при штатной работе АЭС, были рассчитаны удельные показатели выброса, которые позволяют сравнивать выбросы различных станций независимо от их мощности. Значения удельных показателей получены на основе отчетной информации Европейской комиссии о годовых выбросах АЭС Европы [10] и данных МАГАТЭ о выработке электрической энергии на АЭС [11]. Размерность показателя – ГБк/(ГВт·ч) была выбрана для демонстрации масштаба значений выброса и производства энергии.

Анализ значений удельных показателей поступления трития в атмосферу проведен для 76 европейских АЭС за период 1995–2017 гг. Объем выборок по годовым удельным выбросам, с учетом пропусков в базе данных, составил 1244 записи (табл. 1).

Таблица 1

Статистическое описание выборки полученных значений годовых удельных показателей выброса трития европейскими АЭС за период с 1995 по 2017 гг.

Параметр	Значение
N наблюдений	1244
Среднее, ГБк/(ГВт·ч)	0,428
Медиана, ГБк/(ГВт·ч)	0,076
Нижний квартиль $q_1$ , ГБк/(ГВт·ч)	0,034
Верхний квартиль $q_3$ , ГБк/(ГВт·ч)	0,161
Минимум, ГБк/(ГВт·ч)	$5,61 \cdot 10^{-4}$
Максимум, ГБк/(ГВт·ч)	4,378
Стандарт. откл-е, ГБк/(ГВт·ч)	0,273

Гипотеза о том, что удельные показатели описываются нормальным распределением, была отклонена критериями Шапиро–Уилка и Колмогорова–Смирнова [12, 13]. По всем показателям заметно значительное превышение средних значений над медианными, что указывает на сильное отклонение распределений частоты повторяемости исследуемых значений от нормальной кривой. В связи с чем было решено использовать медианные удельные показатели выброса, так как медиана менее чувствительна к статистическим выбросам, в отличие от значения среднего. Динамика значений медиан удельных показателей за пятилетние интервалы времени в период с 1995 по 2017 гг. представлена на рис. 1.

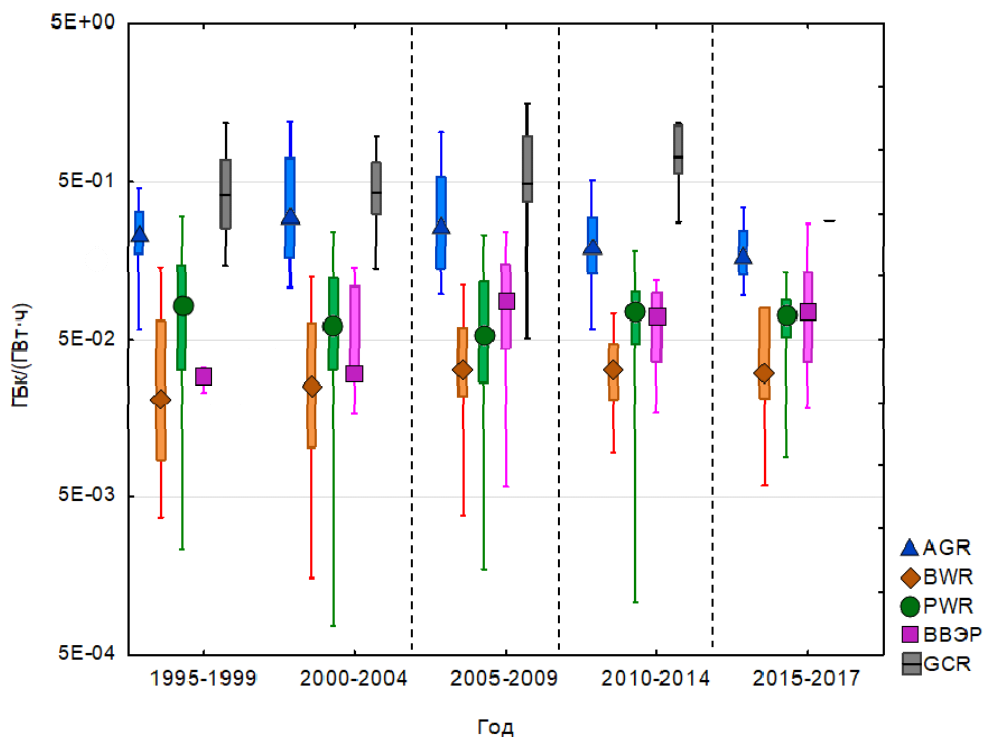


Рис. 1. Медианные удельные показатели выброса трития в период с 1995 по 2017 гг.

Значимость временных линейных тенденций удельных показателей оценены с помощью ранговых коэффициентов Спирмена (табл. 2), уровень значимости тренда при этом составил 0,05 [14].

Из рис. 1 видно, что наибольший удельный показатель выброса трития имеют газоохлаждаемые реакторы (GCR) и их второе поколение – продвинутое газоохлаждаемые реакторы (AGR). На сегодняшний момент в Европе не функционирует ни одна АЭС с газоохлаждаемым реактором старого типа. Последняя АЭС с данным типом РУ – Wylfa (Великобритания) была выведена из эксплуатации в 2015. Для реакторных установок типа AGR в целом заметно снижение удельного показателя выброса трития в атмосферу.

Таблица 2

Результаты оценки линейных трендов в динамике удельных показателей выброса трития европейскими АЭС с 1995 по 2017 гг.

Тип РУ	Число наблюдений $N$	$R$ критерий Спирмена	$p$ -значение	Тренд
AGR	152	-0,215	0,0076	Снижение
BWR	202	0,148	0,0349	Рост
GCR	62	0,256	0,0443	Рост
PWR	727	0,040	0,2776	Отсутствует
ВВЭР	100	0,190	0,0577	Отсутствует
Все РУ	1243	-0,014	0,6201	Отсутствует

Несмотря на выявленные в среднем за период 1995–2017 гг. повышенные уровни поступления трития в атмосферу от установок AGR, возможно достичь относительно небольших удельных показателей на отдельных АЭС с реакторными установками данного типа. Об этом свидетельствуют результаты расчетов средних рангов  $R_i^{cp}$  по формуле 1, которые позволили поделить все АЭС Европы на 3 категории: с наилучшей, устойчивой и наихудшей практикой выброса трития.

$$R_{i,j} = \begin{cases} 1, & \text{если } Q_{i,j} \leq q1, \\ 2, & \text{если } q1 < Q_{i,j} \leq q3, \\ 3, & \text{если } Q_{i,j} > q3. \end{cases} \quad (1)$$

Категории АЭС определены по границам квартильных размахов распределений вероятностей удельных показателей ( $q1$  и  $q3$  – 25-я и 75-я процентиля соответственно), вычисленных по совокупности всех станций Европы в период с 1995 по 2017 гг. По временным рядам ежегодных показателей  $Q_{i,j}$ , ГБк/(ГВт·ч) каждой  $i$ -ой станции за  $j$ -ый год присваивался ранг (1, 2 или 3) в зависимости от попадания в соответствующий квартиль.

Значения рангов  $R_i^{cp}$ , усредненных за весь период наблюдений по каждой станции, косвенно указывают на частоту попадания  $Q_{i,j}$  в соответствующие квартили и позволяют классифицировать АЭС по искомым категориям. Границы категорий по средним рангам определены экспертно и составляют:

- 1–1,5 для наилучших практик ( $Q_{i,j}$  чаще попадают в 1-ый квартиль);
- 1,5–2,5 – для устойчивых практик (2-й и 3-й квартили);
- 2,5–3 – для наихудших практик (преимущественно 4-й квартиль).

Значения квартилей приведены в табл. 1. В табл. 3 представлено количество АЭС с различными типами РУ в каждой из категорий, в скобках указан общий процент от реакторных установок данного типа в Европе.

Таблица 3

Количественное распределение АЭС Европы по группам с наилучшей, устойчивой и наихудшей практикой выброса  $^3\text{H}$

Тип РУ	Наилучшие практики	Устойчивые практики	Наихудшие практики
AGR	0	3 (43 %)	4 (57 %)
BWR	9 (69 %)	4 (31 %)	0
GCR	0	0	4 (100 %)
PWR	7 (17,5 %)	30 (75 %)	3 (7,5 %)
ВВЭР	1 (14 %)	5 (72 %)	1 (14 %)

В категории с наилучшей практикой ожидаемо доминируют реакторные установки, имеющие наименьший удельный показатель выброса трития: BWR (69 % от всех АЭС Европы данного типа). На трех АЭС с РУ типа PWR: Isar 1, Krümmel, Philippsburg (все Германия) удельный показатель выброса трития с 1995 по 2017 гг. не превысил 0,034 ГБк/(ГВт·ч) (границу квартиля  $q_1$ ). В категории с устойчивой практикой для выбросов трития преимущественно представлены АЭС с реакторными установками типа PWR (75 % от всех АЭС Европы данного типа). В категорию «Наихудшие практики» в основном попали РУ типа GCR и их второе поколение – AGR. Это объясняется тем, что газоохлаждаемые реакторы имеют наибольший удельный показатель выброса трития в атмосферу. Данный тип реакторных установок не получил широкого распространения и представлен исключительно в Великобритании.

Используя медианные значения удельных показателей выброса трития, выполнена консервативная оценка поступления данного радионуклида в атмосферу при нормальной эксплуатации АЭС в мире с 1954 года. Консервативная оценка не учитывает миграцию трития между компартаментами окружающей среды, а также его распад. Глобальная оценка ежегодного поступления трития в атмосферу с выбросами АЭС за период 1954–2017 гг. получена путем умножения медианного значения удельного показателя (табл. 1) на количество произведенной электроэнергии в рассматриваемый год всеми АЭС [11] в мире.

Основным антропогенным источником поступления трития в атмосферу были испытания ядерного оружия в период с 1945 по 1980 гг. Суммарная активность трития, поступившая в атмосферу в результате ядерных испытаний, составила  $2,4 \cdot 10^{20}$  Бк [15]. На рис. 2 представлено сравнение поступления трития в атмосферу в результате выбросов АЭС и испытаний ядерного оружия.

Выполненная консервативная оценка показывает, что основной вклад в содержание трития в атмосфере во второй половине 20 века внесли испытания ядерного оружия. При этом доля суммарных выбросов АЭС составляет 4 % от естественной активности трития в атмосфере.

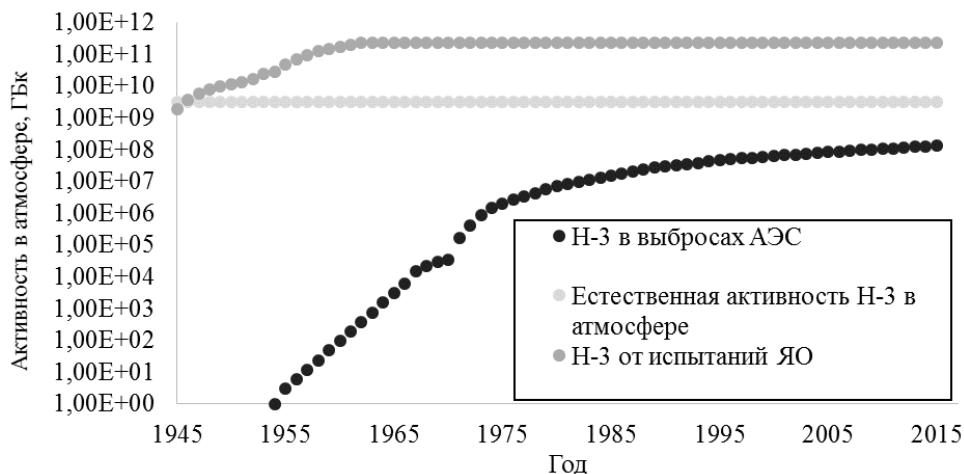


Рис. 2. Оценка поступления трития в атмосферу от различных источников

## Заключение

Анализ данных Европейской комиссии показал, что наименьшие значения удельного показателя выброса трития относятся к АЭС с реакторными установками типа BWR. В категории наилучшей практики выбросов трития 69 % всех АЭС – станции с РУ BWR. Наибольшие значения удельного показателя выброса продемонстрировали реакторные установки типа GCR и AGR, которые, как и ожидалось показали наихудшую практику выброса трития (табл. 3).

Рост удельных показателей выброса трития характерен для АЭС с газоохлаждаемыми (GCR) и кипящими (BWR) реакторами. Это может быть связано с большим возрастом станций данных типов (в среднем около 40 лет) и, как следствие, деградацией технических узлов и компонентов, а также конструкционных материалов.

Консервативная оценка поступления трития в атмосферу показала, что глобальный вклад выбросов АЭС Мира при штатной работе станций составляет 4 % от естественной активности данного радионуклида в атмосфере. Основным источником, определяющим активность трития во второй половине XX века, были испытания ядерного оружия в период с 1945 по 1980 гг.

## Список литературы

1. INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, Indicators for Nuclear Power Development Nuclear Energy Series No. NG-T-4.5 Technical Reports, IAEA, Vienna, 2015.

2. Международное агентство по атомной энергии, Мониторинг окружающей среды и источников для целей радиационной защиты: серия норм безопасности МАГАТЭ. №. RS-G-1.8. Вена, 2016.
3. Екидин А. А., Жуковский М. В., Васянович М. Е. / Идентификация основных дозообразующих радионуклидов в выбросах АЭС // Атомная энергия. 2016, т. 120, № 2, с. 106–108.
4. Пышкина М. Д. / Определение основных дозообразующих нуклидов в выбросах АЭС PWR И ВВЭР // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2017, № 2 (18), с. 98–107.
5. Екидин А. А., Антонов К. Л., Жуковский М. В. / Оценка загрязнения атмосферы тритием при испарении воды с поверхности промышленных водоемов // Вопросы радиационной безопасности. 2012, № 3 (67), с. 3–10.
6. Екидин А. А., Васильев А. В., Пышкина М. Д. [и др.] / Оценка поступления трития в атмосферу из брызгальных бассейнов Балаковской АЭС в холодный период // Ядерная и радиационная безопасность. 2017, № 3 (85), с. 35–46.
7. Екидин А. А., Васильев А. В., Васянович М. Е. [и др.] / Анализ возможности поступления трития в атмосферу из баков запаса дистиллята (на примере Балаковской АЭС) // Вопросы радиационной безопасности. 2019, № 1 (93), с. 16–24.
8. Цикунов А. Г., Алексеев В. В., Забродская С. В., Тыклева К. В. / Образование трития в технологических средах быстрых реакторов // Ядерно-реакторные константы. 2015, вып. 2.
9. Investigation of the Environmental Fate of Tritium in the Atmosphere. Part of the Tritium Studies Project: CNSC, 2009, 103 p.
10. European Commission Radioactive Discharges Database (RADD) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://europa.eu/radd/nuclideDischargeOverview.dox?pageID=NuclideDischargeOverview>. Дата обращения 10.09.2018.
11. The Database on Nuclear Power Reactors / The Power Reactor Information System (PRIS) of the IAEA [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.iaea.org/pris/>. Дата обращения: 10.09.2018.
12. Shapiro S. S., Wilk M. B. / An analysis of variance test for normality (complete samples) // *Biometrika*. 1965, vol. 52, N 3/4, p. 591–611.
13. Критерий согласия: Критерий Колмагорова [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://nsu.ru/mmfvims/chernova/ms/lec/node45.html>. Дата обращения 01.05.2019.
14. Кобзарь А. И. Прикладная математическая статистика. – М: Физматлит, 2006, 816 с.
15. Десятов Д. Д., Екидин А. А. / Оценка поступления трития в окружающую среду от выбросов АЭС // Биосферная совместимость: человек, регион, технологии. 2018, № 1 (21), с. 88–96.

## **Tritium in releases of nuclear reactor installations of various type**

E. I. Nazarov<sup>1,2</sup>, A. V. Vasiliev<sup>1</sup>, A. A. Ekidin<sup>1</sup>, M. E. Vasyanovich<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institute of Industrial Ecology, Ural Branch of the Russian Academy of Sciences, Ekaterinburg, Russia

<sup>2</sup>Ural Federal University named after the first President of Russia  
B. N. Yeltsin, Ekaterinburg, Russia  
e.nazarov1005@gmail.com

*The practice of generating electricity from nuclear power plants in Europe with various types of reactor installations in the period from 1995 to 2017 was analyzed in the context of assessing the release of tritium into the atmosphere. For each European nuclear power plant, the median specific indicator of tritium release (GBq/GWh) was calculated. Depending on this indicator, all stations were divided into 3 types: with the best, stable and worst discharge practices. A conservative estimate was made of the contribution of various nuclear reactor installations to tritium activity in the atmosphere.*