

## ОЦЕНКА УРОВНЯ ПРИРОДНОГО ФОНА ТРИТИЯ В ПОВЕРХНОСТНЫХ ВОДАХ ТИХОГО ОКЕАНА К ВОСТОКУ ОТ ЯПОНИИ

**Сергеев А.Ф., Горячев В.А., Лобанов В.Б.**

*Тихоокеанский океанологический институт им. В.И. Ильичева, Владивосток  
sergeev@poi.dvo.ru*

Испытания термоядерного оружия в 50-х – 60-х годах прошлого века в основном и привели к загрязнению вод Мирового океана радиоактивным водородом – тритием. В настоящее время содержание накопленного «бомбового» трития в природных водах после окончания испытаний в результате естественного распада приближается к природному уровню. Однако кроме снижающихся глобальных выпадений трития из атмосферы, локальными источниками остаются предприятия атомного комплекса, с которыми связаны санкционированные и аварийные поступления трития в океаны. Одним из таких новых локальных долговременных источников в Тихом океане стали с августа 2023 г. штатные сливы накопленных загрязненных тритием вод после аварии в марте 2011 г. на АЭС Фукусима-1 в Японии. Для оценки радиоактивного загрязнения, накладывающегося на «бомбовой» фон, в литературе приводятся значения трития до и после аварии, а также с началом сброса загрязненных вод [1]. Эти данные позволяют выявить степень влияния сливов на тритиевый фон прилегающих океанских вод. Но для оценки соотношений «бомбового» и «поставарийного» трития, поставляемого сливаемыми водами, а также знания суммарного антропогенного загрязнения океана к востоку от Японии, необходимы данные измерений природного «доядерного» тритиевого фона. К сожалению, в литературе таких данных нет.

Первые немногочисленные определения трития в поверхностных водах Тихого и Атлантического океанов в северном полушарии были выполнены в 1952-53 гг., когда наряду с ядерными взрывами были проведены первые испытания термоядерных устройств США и СССР. Бегеман и Либби для октября-декабря 1952 г. представили два определения концентрации трития на поверхности в

Атлантическом океане 1,3 и 2,0 ТЕ и четыре определения в Тихом – 1,0, 1,5, 10,0 и 16,3 ТЕ [2]. В сентябре 1953 г. Бутлар и Либби установили в четырех поверхностных пробах из Атлантического океана содержание трития 0,19, 0,29, 0,55 и 1,6 ТЕ [3]. Минимальные значения (0,19, 0,29 ТЕ), по их мнению, были характерны для открытых вод Атлантического океана, но они не заявляли, что эти уровни трития отражают природный (космогенный) фон океана. Тритий в поверхностном слое Тихого океана в 1953 г. был представлен ими только одной пробой с концентрацией 0,54 ТЕ.

Другая группа исследователей под руководством Джилетти [4] в июле-сентябре 1953 г. на поверхности Атлантического океана в полосе широт 34° с.ш. - 40 ° с.ш. установила в 9 точках содержание трития в диапазоне 0,62–1,5 ТЕ, получив среднее значение в 1,0 ТЕ. Рассматривая на тот момент все имеющиеся данные они [4] пришли к выводу, что это значение соответствует природному уровню фона трития. До 90-х годов прошлого века оно фигурировало в статьях, связанных с использованием трития для изучения гидрологических процессов, несмотря на ранее установленные концентрации трития значительно меньше 1 ТЕ для открытых районов океана, а также модельную оценку природного фона трития для Северной Атлантики в 0,2 ТЕ  $\pm 30\%$  [3, 6]. Кроме того, еще в 1961 г. вышла работа Крейга и Лала [5], из которой следовало, что все рассмотренные выше значения концентрации трития в поверхностных водах океанов отражают загрязнение проб «бомбовым» тритием, а природный уровень фона трития остается неизвестен. Заметим, что в последнее десятилетие текущего века получаемые для поверхностных вод океанов северного полушария значения концентраций трития свидетельствуют о правоте Крейга и Лала [5] и указывают на ошибочность принятия в свое время авторами работы [4] значения в 1 ТЕ в качестве уровня природного фона трития.

В 2019 году вышла работа Омса с соавторами [7], в которой проведено обобщение всех имеющихся данных по тритию для вод Мирового океана за период с 1967 по 2016 г. с целью определения глобального распределения концентраций трития, что позволило авторам определить его запасы на 2016 г. с учетом оценки естественного и искусственного вклада в каждый из 23 резервуаров, на которые был разделен весь Мировой океан. На рис.1 представлен

фрагмент схемы резервуаров для Тихого океана из данной статьи, а также фрагмент таблицы 1, в которой приведены запасы трития природного (космогенного) и искусственного (бомбового и промышленного) происхождения для каждого резервуара, а также суммарные их запасы от поверхности до дна.

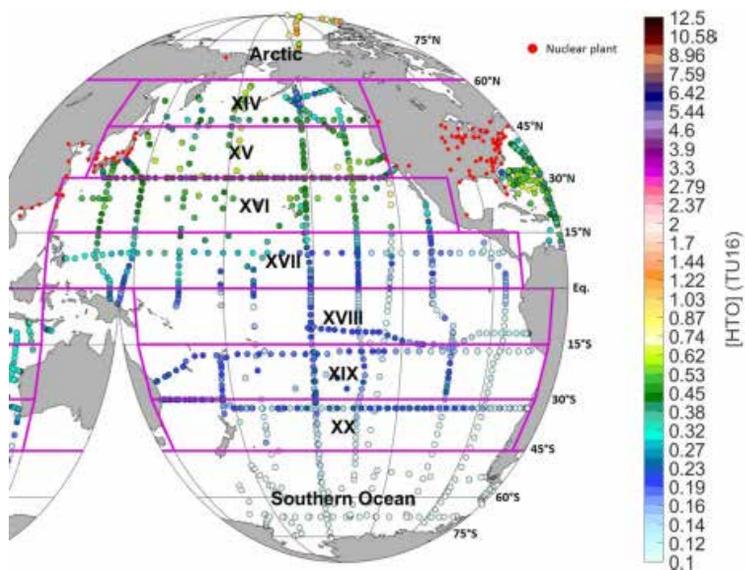


Рис. 1. Выделенные резервуары в Тихом океане и средние концентрации трития с поправкой на распад в слое 0-500 м (в тритиевых единицах ТЕ на 2016 г.) в период с 1967 по 2016 год. Красными кружками показаны атомные электростанции. Фрагмент рисунка из работы [7]

Важнейшей особенностью данной таблицы является возможность на основе приводимых оценок запасов трития в резервуарах установить долю природного трития в его общем запасе. Так интересующий нас район лежит между параллелями 30° с.ш. и 45° с.ш. и обозначен как резервуар под номером XV на рисунке 1. В нем содержится  $636 \pm 240$  ПБк суммарного (антропогенного и природного) трития (колонка 10 в табл. 1) с входящими в него 57 ПБк природного трития. Тогда отношение между природным и суммарным запасами составляет в среднем 0,09, изменяясь в диапазоне  $0,065 \div 0,144$ . Это отношение, умноженное на среднюю концентрацию трития на поверхности в данном резервуаре в 2016 г.,

Таблица 1. Общий, природный и искусственный запасы трития в Тихом океане от поверхности до дна и средние концентрации трития в слое 0–500 м между 1967 и 2016 годами, скорректированные на радиоактивный распад (в тритиевых единицах TE на 2016 г.) для всех резервуаров, показанных на рис. 1. Фрагмент таблицы из работы Омса с соавторами [7].

Box	Region	Lat <sub>min</sub> - Lat <sub>max</sub> Long <sub>min</sub> - Long <sub>max</sub>	Box Area ( $\times 10^{12}$ m <sup>2</sup> )	Box Volume ( $\times 10^{15}$ m <sup>3</sup> )	Drainage Basin Area ( $\times 10^{12}$ m <sup>2</sup> ) <sup>1</sup>	F <sub>area</sub>	Yearly natural input (PBq.yr <sup>-1</sup> )	(HTO) $\pm$ SD (TU16, 500m)	Total Inventory (PBq)	Natural Inventory (PBq)	Artificial Inventory (PBq)
XIV	North Pacific Ocean	45°N - 60°N 128°E - 240°E	9.7	31.7			2.07	0.41 $\pm$ 0.16	394 $\pm$ 236	36	358 $\pm$ 236
XV	North Pacific Ocean	30°N - 45°N 128°E - 240°E	15.6	74.8			3.32	0.48 $\pm$ 0.13	636 $\pm$ 240	57	578 $\pm$ 240
XVI	Sub-Tropical North Pacific Ocean	15°N - 30°N 120°E - 260°E	22.7	105	15	1.18	4.82	0.45 $\pm$ 0.17	872 $\pm$ 413	83	788 $\pm$ 413
XVII	Sub-Equatorial North Pacific Ocean	0°N - 15°N 120°E - 280°E	28.8	124			6.11	0.23 $\pm$ 0.17	337 $\pm$ 202	106	231 $\pm$ 202
XVIII	Sub-Equatorial South Pacific Ocean	0°S - 15°S 150°E - 250°E	24.0	96.8			4.54	0.15 $\pm$ 0.09	214 $\pm$ 82	78	136 $\pm$ 82
XIX	South Pacific Ocean	15°S - 30°S 150°E - 250°E	23.5	87.4	5	1.05	4.46	0.17 $\pm$ 0.07	268 $\pm$ 113	77	191 $\pm$ 113
XX	South Pacific Ocean	30°S - 45°S 150°E - 290°E	20	78.3			3.76	0.15 $\pm$ 0.07	271 $\pm$ 131	65	206 $\pm$ 131
S. Ocean	Southern Ocean	45°S - 90°S 0°W - 360°E	75	199	/	1.0	13.48	0.05 $\pm$ 0.04	748 $\pm$ 886	233	515 $\pm$ 886
<b>TOTAL</b>			353	1268	97	/	78.04 <b>219 g.yr<sup>-1</sup></b>	/	9531 $\pm$ 5084 <b>26.8 <math>\pm</math> 14 kg</b>	1347 <b>3.8 kg</b>	8184 $\pm$ 5084 <b>25.0 <math>\pm</math> 14 kg</b>

дает оценку уровня природного фона трития океана. Для получения информации о средней концентрации трития на поверхности в резервуаре XV воспользуемся базой данных Омса [7], из которой следует, что по данным измерений в 30 точках от 133° в.д. до 119° з.д. вдоль 30° с.ш. среднее значение составляет 0,53 ТЕ в 2013 г., а в 2016 г. с учетом распада - 0,45 ТЕ. Отсюда, умножая эту концентрацию (0,45 ТЕ) на значение отношений природного и суммарного запасов трития в данном резервуаре (0,09) получаем значение уровня природного фона трития в 0,04 ТЕ, а при изменении отношений от 0,065 до 0,144 за счет ошибки определения суммарного запаса в резервуаре получаем диапазон значений, в котором находится уровень природного фона трития в резервуаре XV – 0,03-0,06ТЕ.

Для резервуара XIV, расположенного к северу между параллелями 45° с.ш. и 60° с.ш., по данным концентраций трития из работы [7] для 20 точек на поверхности от 46° с.ш. до 58° с.ш. со средним значением в 0.51 ТЕ с учетом распада на 2016 г. диапазон концентраций природного фона трития составляет 0.03-0.12 ТЕ при среднем значении 0.05 ТЕ.

Из работы Омса с соавторами [7] также следует, что уровень природного фона трития на поверхности во всех океанах - Атлантическом, Тихом, Индийском и Южном, за исключением Северного Ледовитого, в среднем меньше 0,1 ТЕ, составляя сотые ее доли, тогда как в Арктическом бассейне может достигать 0.2-0.6 ТЕ. Кроме того, проведенные оценки уровней природного фона трития в северо-западной части Тихого океана показывают, что сформировавшийся на момент слива загрязненных тритиевых вод с АЭС Фукусима-1 антропогенный фон на порядок превышает природный, что существенно отличается от опубликованных ранее оценок.

Работа выполнена в рамках Государственного задания ТОИ ДВО РАН на 2025 г., темы № 124022100079-4 и № 124022100077-0.

### Литература

1. Kaizer J, Hirose K., Povinec P.P. Assessment of environmental impacts from authorized discharges of tritiated water from the Fukushima site to coastal and offshore regions // Preprint. July 2024. DOI: 10.48550/arXiv.2407.18664. License CC BY-NC-SA 4.0.

2. Begemann F., Libby W.F. Continental water balance, ground water inventory and storage times, surface ocean mixing rates and world-wide water circulation patterns from cosmic-ray and bomb tritium // *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1957. V. 12. P. 277-296.
3. Buttlar H.V., Libby W.F. Natural Distribution of Cosmic-Ray Produced Tritium. II // *Journal Inorganic and Nuclear Chemistry*. 1955. V. 1. P. 75-91.
4. Giletti B. J., Bazan F., Kulp J.L. The geochemistry of tritium // *Eos Transactions. American Geophysical Union*. 1958. V. 39. P. 807-818.
5. Craig H., Lal D. The Production of Natural Tritium // *Tellus*. 1961. V. XIII. N. 1. P. 85-105.
6. Dreisigacker E., Roether W. Tritium and  $^{90}\text{Sr}$  in north Atlantic surface water // *Earth and Planetary Science Letters*. 1978. V. 38. P. 301-312.
7. Oms P.-E., Du Bois P.B., Dumas F., Lazure P., Morillon M., Voiseux C., Le Corre C., Cossonnet C., Solier L., Morin P. Inventory and distribution of tritium in the oceans in 2016 // *Science of the Total Environment*. 2019. V. 656. P. 1289-1303.
8. Ostlund H.G., Possnert G., Swift J.S. Ventilation rate of the deep Arctic from carbon 14 data // *Journal of Geophysical Research*. 1987. V. 92. N. C4. P. 3769-3777.