

УДК 539.163:551.578.46:581.5:614.876:621.039

СООТНОШЕНИЕ ОБЪЕМНОЙ АКТИВНОСТИ ТРИТИЯ В ТАЛОМ СНЕГЕ И БЕРЕЗОВОМ СОКЕ В ЗОНЕ ВЛИЯНИЯ “ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ “МАЯК” ВЕСНОЙ 2016 ГОДА

© 2020 г. В. В. Востротин^{1,*}, А. Ю. Янов¹, Л. В. Финашов¹¹ Южно-Уральский институт биофизики ФМБА России, Озёрск, Россия*E-mail: vostrotin@subi.su

Поступила в редакцию 28.12.2018 г.

После доработки 26.07.2019 г.

Принята к публикации 18.09.2019 г.

В марте 2016 г. было проведено радиоэкологическое исследование березового сока и талого снега в зоне влияния Федерального государственного предприятия “Производственное Объединение “Маяк” (ПО “Маяк”). Максимальная объемная активность (ОА) трития в 19 пробах березового сока составила 190 Бк/дм³, в пробах талого снега – 110 Бк/дм³. Обработка результатов измерения показала статистически значимую ранговую корреляцию ($p = 0.02$) между ОА трития в пробах талого снега и ОА трития в пробах березового сока, попарно соответствующих одной географической координатной точке, при этом между данными по ОА для снега и березового сока не наблюдалось статистически значимого различия по парному критерию знаков. Создана упрощенная модель зависимости ОА радионуклида в березовом соке от расстояния до ПО “Маяк” в виде экспоненциально убывающей функции с постоянной составляющей. Путем обработки результатов измерений были получены параметры зависимости ОА трития в березовом соке от географических координат в виде нормального (Гауссова) распределения с постоянной составляющей. Последняя модель была предпочтительной по скорректированному значению R^2 .

Ключевые слова: тритий, окружающая среда, ПО “Маяк”, объемная активность, снег, березовый сок

DOI: 10.31857/S0869803120030157

Тритий является одним из дозообразующих радионуклидов, который образуется в результате использования ядерного топлива и его переработки предприятиями атомной промышленности.

На 62-й сессии Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН рассматривался вопрос о влиянии трития на персонал, работающий на атомных объектах, и население. При работе в штатном режиме предприятий атомной промышленности объемная активность (ОА) трития в их зоне влияния не превышает уровня вмешательства и не представляет опасности для населения [1–4]. Однако в связи с малой изученностью процессов миграции трития по пищевой цепочке, НКДАР ООН считает необходимым создание базы данных об уровнях содержания трития в объектах окружающей среды и измерениях содержания трития в биологических образцах индивидуумов, подвергшихся его воздействию [5].

Применение методов статического и динамического моделирования позволит наиболее продуктивно использовать данные об уровнях объемной/удельной активности трития в объектах

окружающей среды для анализа процессов миграции трития и оценки его влияния на природные объекты и население, проживающее в зоне влияния предприятий атомной промышленности.

Высокая физическая подвижность, а также высокая химическая и радиохимическая активность трития и его соединений затрудняют процесс их улавливания, утилизации и хранения [6, 7]. Образовавшийся в процессе использования и переработки ядерного топлива, выделившийся в процессе утилизации и хранения тритий, в жидком (НТО) и газообразном состоянии (НТ) распространяется в зоне влияния предприятий и объектов атомной промышленности и увеличивает радиационную нагрузку на окружающую среду.

Одним из распространенных методов изучения содержания и миграции трития в окружающей среде является измерение его ОА в атмосферных осадках [8–10]. В частности снег, сохраняющийся тритий в течение всего зимнего периода, может быть использован как индикатор для контроля радиоактивного загрязнения воздушной среды [9, 11]. Отмечается также возможность накопления в снеге эманированного из почвы и тех-

нических объектов трития в местах, где проводились подземные ядерные испытания [12]. Таким образом, анализ проб снега, отобранных в начале периода снеготаяния, позволяет получить данные об объемной активности трития в воде, которая поступит в почву и грунт за весь период накопления трития в снежном покрове.

Миграция трития в окружающей среде включает также звенья его перераспределения в процессе жизнедеятельности растений. Проведенные исследования показывают не только значительную роль растений в процессе миграции трития [13], но и сложность этого процесса. Так, в отдельных случаях наблюдаемые различия ОА трития в березовом соке и снеге в соотнесенных точках отбора [14] могут свидетельствовать о неоднаправленности миграционных путей трития, что открывает перспективы для дальнейших исследований.

ПО “Маяк” является предприятием ядерно-топливного цикла (ЯТЦ), в процессе деятельности которого происходят регламентированные сбросы трития в окружающую среду [15, 16].

Результаты опубликованных исследований отражают уровни объемной/удельной активности трития в объектах окружающей среды, находящихся в зоне влияния ПО “Маяк” [17]. Максимальные значения уровней ОА трития в атмосферных осадках наблюдались в радиусе 10 км от предприятия, однако в зависимости от азимутального направления на этом участке отмечалась высокая вариабельность уровней ОА трития — от 6 до 256 Бк/л [18]. По информации из отчета ФГУП НПО “Тайфун”, согласно данным ЦЗЛ ПО “Маяк”, значение удельной активности трития в снеговом покрове в зоне влияния ПО “Маяк” в 2013 г. не превышало 188 Бк/кг [15].

Цели исследования: установить соотношения ОА трития в березовом соке и талом снеге, создать модели зависимости ОА трития в березовом соке от расстояния и географических координат.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДИКА

В марте–апреле 2016 г. было отобрано по 19 образцов березового сока и снега, попарно соответствующих одной географической координатной точке, в границах населенных пунктов и на прилегающей к ним территории, находящихся на различном удалении от ПО “Маяк” в границах Челябинской области. Отбор проб березового сока производился в соответствии с основными положениями Приказа Россельхоза от 05.12.2011 № 511 “Об утверждении Правил заготовки пищевых лесных ресурсов и сбора лекарственных растений”. Отбор проб снега проводился в соответствии с ГОСТ 17.1.5.05-85 “Охрана природы. Гидросфера. Общие требования к отбору проб

поверхностных и морских вод, льда и атмосферных осадков”.

Карта расположения точек отбора проб представлена на рис. 1, где площадь круга пропорциональна ОА трития в березовом соке. Для построения графика использовали пакеты “ggmap” [19] и “ggplot2” [20], программы статистической обработки данных R версии 3.3.3 “Another Canoe”.

Отобранные пробы снега при комнатной температуре переводили в талую воду и затем дистиллировали. Пробы березового сока также подвергались предварительной дистилляции. Определение ОА трития проводилось с помощью собственной методики выполнения измерений с использованием бета-спектрометра Quantulus-1220 по методу жидкостной сцинтилляции. Были установлены следующие метрологические характеристики: эффективность регистрации трития (0.295 ± 0.016) Бк⁻¹ с⁻¹ при доверительной вероятности 68%, предел обнаружения 8 Бк/дм³ при времени измерения 6 ч, относительная расширенная неопределенность результата измерения $11+320/ОА$, % при коэффициенте охвата $k = 2$.

Для построения графиков и статистического анализа были использованы пакеты: R версии 3.3.3 “Another Canoe”, Sigma Plot 2000. Уровень значимости был принят равным $\alpha = 5\%$.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В табл. 1 представлены результаты измерения ОА трития в березовом соке и воде растаявшего снега с привязкой к месту отбора, расстоянию и направлению от ПО “Маяк”.

При первичном анализе данных, используя межквартильное расстояние соотношения ОА в березовом соке и талом снеге, были установлены два статистических выброса, соответствующих г. Аргаяш и п. М. Куяш. Выборки оставшихся 17 значений как ОА трития в талом снеге, так и ОА в березовом соке статистически значимо отличались от выборок нормального распределения (тест Шапиро–Уилка, талый снег $W = 0.89$; $p = 0.04$, березовый сок $W = 0.75$; $p < 0.01$). В то же время обе выборки статистически значимо не отличались от выборок логнормального распределения (тест Шапиро–Уилка, талый снег $W = 0.94$; $p = 0.27$, березовый сок $W = 0.92$; $p = 0.15$). Между ОА трития в березовом соке и талом снеге наблюдалась статистически значимая ранговая корреляционная связь (тест Кендала, $z = 3.5$; $p < 0.01$), при этом не было статистически значимого различия (парный тест Вилкоксона, $V = 95$, $p = 0.40$, 95%-ный ДИ медианы разницы $-6.6...23.2$ Бк/дм³).

На рис. 2 представлены исходные данные и результат моделирования зависимости ОА трития в березовом соке (y , Бк/дм³) от расстояния до

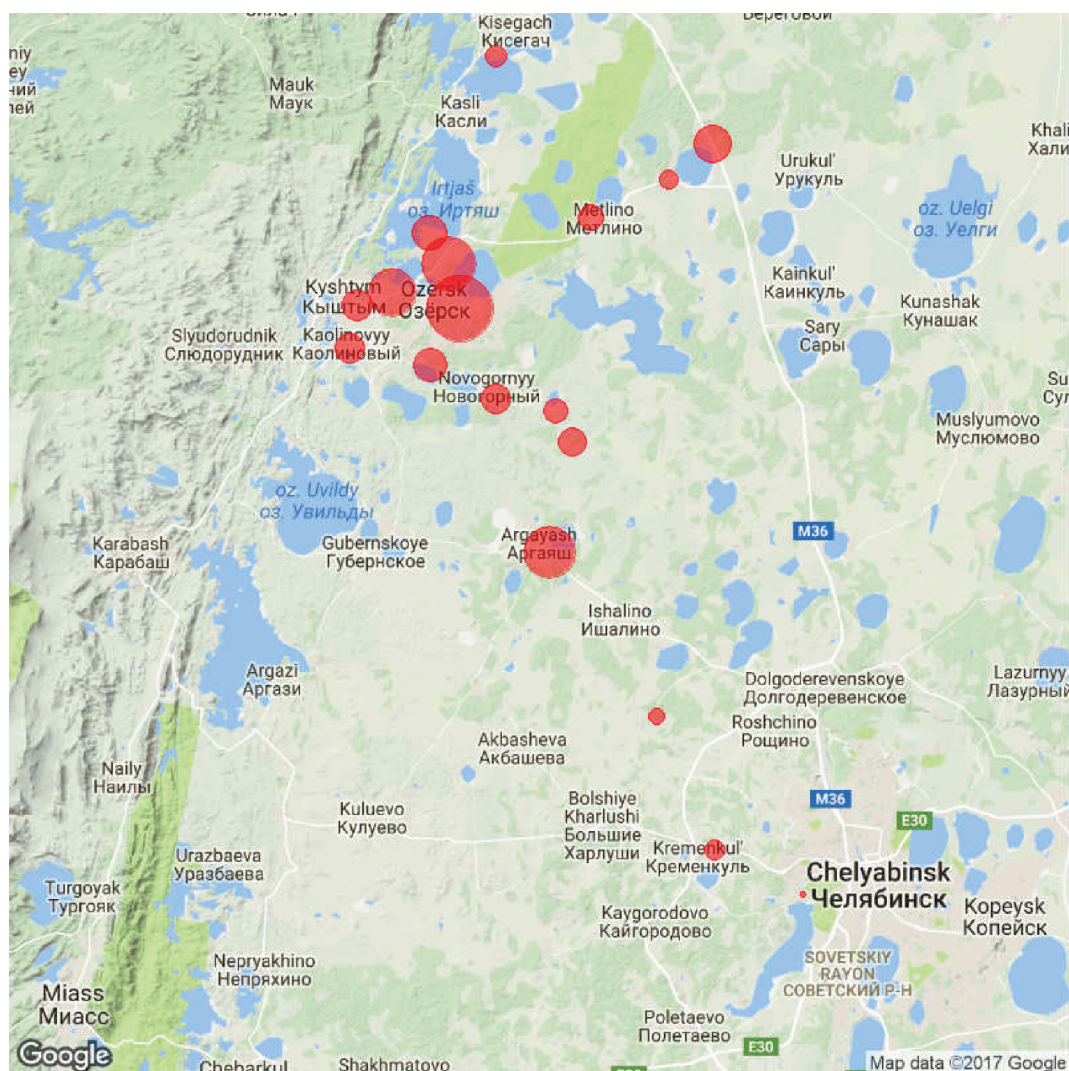


Рис. 1. Карта точек отбора проб березового сока и снега в зоне влияния ПО “Маяк” в марте 2016 г., с использованием данных сайта www.google.com/maps. Площадь круга пропорциональна ОА трития в березовом соке.

Fig. 1. Map of sampling points for birch sap and snow in the zone of influence of PA “Mayak” software in March 2016, using the data from www.google.com/maps. The area of the circle is proportional to the of tritium volume activity in birch sap.

ПО “Маяк” (r , км) в виде экспоненциально-убывающей функции с постоянной составляющей: $y = (9.5 \pm 4.5) + (137 \pm 52)e^{-(0.130 \pm 0.046)r}$. В качестве весов измерений использовались величины, обратно пропорциональные квадрату их расширенной неопределенности. Скорректированный по числу степеней свободы R^2 был равен 0.637. Все параметры модели достоверно отличались от нуля, за исключением параметра постоянной составляющей ($p = 0.054$). Период полуубывания ОА трития в березовом соке составил (5.3 ± 1.9) км. Полученная модель зависимости ОА березового сока от расстояния до ПО “Маяк” согласуется с аналогичной моделью зависимости ОА трития в талом снеге от расстояния ($a_0 = (9.0 \pm 3.9)$ Бк/дм³, $a_1 = (136 \pm 39)$ Бк/дм³, $\lambda = (0.14 \pm 0,04)$ км⁻¹, где

λ – постоянная полуубывания ОА трития в зависимости от расстояния) [2].

На заключительном этапе анализа была построена модель зависимости ОА трития в березовом соке (y , Бк/дм³) от географических координат долготы (d , °) и широты (s , °). В качестве модели была выбрана функция нормального распределения с постоянной составляющей вида:

$$y(d, s) = y_0 + A \exp \left\{ -\frac{1}{2} \left[\left(\frac{d - \bar{d}}{\sigma_d} \right)^2 + \left(\frac{s - \bar{s}}{\sigma_s} \right)^2 \right] \right\}.$$

Так же как и на предыдущем этапе, в качестве весов измерений использовались величины, обратно пропорциональные квадратам их расширенной неопределенности. На рис. 3 показан результат моделирования в сравнении с исходными

Таблица 1. Результаты измерения объемной активности трития в березовом соке и талой воде растаявшего снега, с привязкой к месту отбора, расстоянию и направлению от ПО “Маяк”
Table 1. The results of measuring the volumetric activity of tritium in birch sap and melt water of snow, with reference to the place of selection, distance and direction from PA “Mayak”

| № | Место отбора | Расстояние от ПО “Маяк”, <i>r</i> , км | Координаты точек отбора проб: °СШ; °ВД | ОА трития, Бк/дм ³ | |
|----|-------------------------------------|--|--|-------------------------------|---------------|
| | | | | в березовом соке | в талом снеге |
| 1 | СЗЗ ПО “Маяк” | 2.2 | 55.705; 60.745 | 190 | 110 |
| 2 | г. Озёрск, ЮУрИБФ | 6.8 | 55.746; 55.746 | 130 | 77 |
| 3 | п. Татыш за КПП | 5.8 | 55.651; 60.697 | 50 | 39 |
| 4 | п. Новогорный | 7.9 | 55.621; 60.804 | 39 | 80 |
| 5 | г. Озёрск, СНТ (оз. Большая Нанога) | 8.8 | 55.720; 60.634 | 100 | 59 |
| 6 | г. Озёрск, здание СИЧ | 10.5 | 55.775; 60.695 | 53 | 69 |
| 7 | г. Кыштым | 11.8 | 55.708; 60.577 | 42 | 50 |
| 8 | п. Худайбердинск | 12.4 | 55.610; 60.904 | 26 | 18 |
| 9 | п. Каолиновый | 12.6 | 55.668; 60.564 | 39 | 50 |
| 10 | п. Метлино | 16.9 | 55.789; 60.964 | 29 | 14 |
| 11 | п. Булатова | 16.1 | 55.580; 60.932 | 33 | 11 |
| 12 | п. Б. Куяш | 25.6 | 55.825; 61.091 | 16 | <8 (6.2)* |
| 13 | г. Аргаяш | 25.0 | 55.476; 60.896 | 120 | 10 |
| 14 | г. Касли, СНТ “Новинка” | 28.1 | 55.940; 60.804 | 20 | 34 |
| 15 | п. М. Куяш | 31.5 | 55.858; 61.164 | 62 | <8 (4.0)* |
| 16 | п. Тюбук | 40.8 | 56.040; 60.944 | 14 | 16 |
| 17 | п. Мирный | 45.0 | 55.323; 61.071 | 10 | 15 |
| 18 | п. Кременкуль | 60.4 | 55.196; 61.168 | 18 | 12 |
| 19 | г. Челябинск | 68.7 | 55.155; 61.313 | <8 (1.2)* | <8 (7.5)* |

Примечание. Сокращения: СЗЗ – санитарно-защитная зона, ЮУрИБФ – Южно-Уральский институт биофизики, СИЧ – счетчик излучения человека, КПП – контрольно-пропускной пункт, СНТ – садовое некоммерческое товарищество.
 * В скобках приведен промежуточный результат измерения, использованный в дальнейшей статистической обработке.

Таблица 2. Численные значения параметров модели зависимости ОА трития в березовом соке от географических координат с постоянной составляющей
Table 2. Numerical values of the model parameters of the dependence of volumetric activity of tritium in birch sap on geographical coordinates with a constant component

| Параметр модели | Размерность | Значение | Стандартная ошибка | <i>p</i> |
|-----------------|--------------------|----------|--------------------|-------------------|
| y_0 | Бк/дм ³ | 12.3 | 2.9 | 0.0014 |
| <i>A</i> | Бк/дм ³ | 210 | 60 | 0.005 |
| \bar{d} | град | 60.82 | 0.04 | <10 ⁻⁴ |
| σ_d | град | 0.129 | 0.019 | <10 ⁻⁴ |
| \bar{s} | град | 55.71 | 0.005 | <10 ⁻⁴ |
| σ_s | град | 0.042 | 0.005 | <10 ⁻⁴ |

Adj. $R^2 = 0.802$

данными. Численные значения параметров модели зависимости ОА трития в березовом соке от географических координат приведены в табл. 2.

Из табл. 2 следует, что, во-первых, все параметры модели статистически значимо отличались от нуля, во-вторых, модель зависимости ОА три-

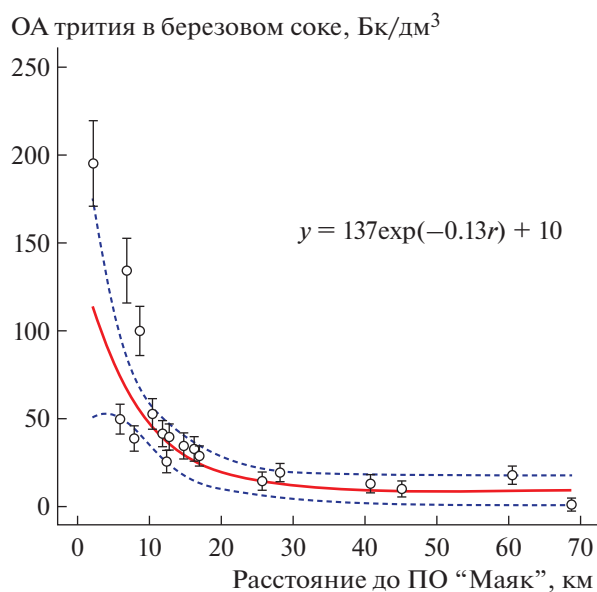


Рис. 2. Модель зависимости ОА трития в березовом соке, отобранном в марте 2016 г., от расстояния до ПО “Маяк”. 95%-ный ДИ функции представлен в виде штриховых линий. Результаты измерения ОА трития в березовом соке приведены с расширенной неопределенностью при коэффициенте охвата $k = 2$.

Fig. 2. Model of the dependence of tritium volume activity in birch sap, selected in March 2016, on the distance to PA “Mayak”. The 95% CI of function is represented as dashed lines. The results of the measurement of tritium volume activity in birch sap are presented with expanded uncertainty at a coverage factor of $k = 2$.

тия в березовом соке от географических координат, по скорректированному значению R^2 , являлась более предпочтительной, нежели модель зависимости ОА от расстояния до ПО “Маяк”. Полученное значение центра распределения (\bar{d} , \bar{s}) находилось на территории промышленной зоны, что являлось косвенным подтверждением качества выполненного анализа.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты измерения ОА трития в снежном покрове населенных пунктов и прилегающих к ним территорий, расположенных в зоне влияния ПО “Маяк”, во всех точках отбора показали превышение среднего фонового уровня (1.7 Бк/дм³) ОА трития в осадках на территории РФ в 2016 г. [17].

В ходе анализа была обнаружена достоверная ранговая корреляция между ОА трития в березовом соке и ОА трития в талом снеге в зоне влияния ПО “Маяк”, при этом ОА трития в березовом соке и ОА трития в талом снеге статистически значимо не различались по парному критерию знаков. Пространственное распределение трития в березовом соке и снежном покрове не имело

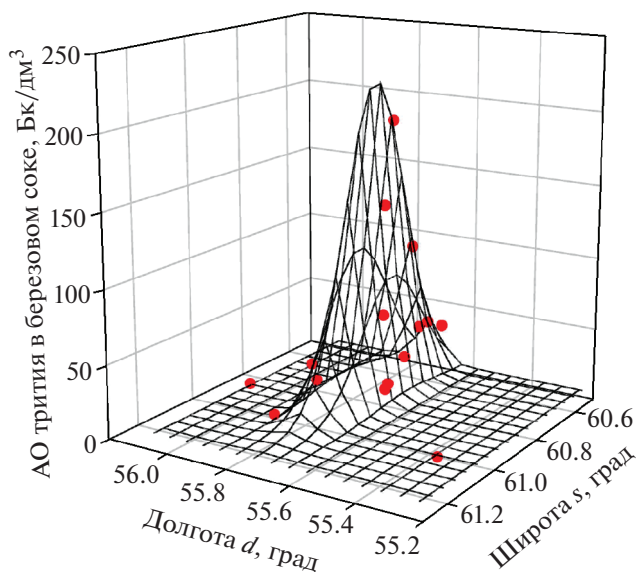


Рис. 3. Модель зависимости ОА трития в березовом соке, отобранном в марте 2016 г., от географических координат, в сравнении с результатами измерений.

Fig. 3. Model of the dependence of tritium volume activity in birch sap, selected in March 2016, on geographical coordinates, in comparison with the measurement results.

статистически значимых различий. Это может быть связано с несколькими причинами. Постоянная скорость поступления трития в грунт с атмосферными осадками в течение нескольких лет определяет распределение ОА в грунтовых водах по глубине. В случае равномерного распределения ОА трития в грунтовых водах по глубине ОА трития в березовом соке не будет зависеть от морфологии корневой системы.

Особенность грунтов может повлиять на вертикальное распределение корневой системы деревьев и, например, определить формирование большей части корневой системы в верхнем горизонте. В этом случае деревьями для образования сока будет использоваться грунтовая вода, преимущественно образованная при таянии снега текущего сезона.

Сформировавшийся загрязненный тритием слой грунтовых вод, обусловленный более ранними выбросами радионуклида с ПО “Маяк”, может оказаться вне зоны досягаемости корневой системы деревьев.

Так же как и в работе Кабанова и соавт. [14], ОА трития в березовом соке статистически значимо не отличалась от ОА трития в талом снеге. При этом, в отличие от предыдущего исследования, было выявлено ярко выраженное пространственное распределение ОА трития как в талом снеге [2], так и в березовом соке относительно центра, находящегося на территории производственной площадки ПО “Маяк”.

Разработанные модели зависимости ОА трития в березовом соке позволяют количественно оценивать уровни трития на расстоянии от 2 до 70 км до ПО “Маяк” и использоваться для оценки антропогенного воздействия, обусловленного выбросами данного радионуклида в воздух с ПО “Маяк”, на окружающую среду. Период полураспада ОА трития в березовом соке составил 5.3 ± 1.9 км и практически не отличался от периода полураспада ОА трития в талом снеге, составляющем 5.0 ± 1.4 км [2]. На расстоянии от 30 до 70 км от ПО “Маяк” уровни ОА трития в березовом соке и талом снеге соответствовали значениям 9–10 Бк/дм³, которые можно принять за фоновые в пределах исследованной территории.

ВЫВОДЫ

В зоне влияния ПО “Маяк” ОА трития в березовом соке и ОА трития в талом снеге статистически значимо не различались.

Достоверная ранговая корреляция между ОА трития в березовом соке и ОА трития в талом снеге может свидетельствовать о преимущественном поступлении трития в грунт на исследованной территории с осадками и парами воды, содержащимися в воздухе.

Две разработанные модели ОА трития в березовом соке в зависимости: 1) от расстояния до ПО “Маяк”, 2) от географических координат позволяют делать прогнозы относительного пространственного распределения радионуклида в радиусе от 2 до 70 км от данного предприятия ЯТЦ. Использование последней модели является более предпочтительным, ввиду более высокого значения скорректированного R^2 , учитывающего число степеней свободы.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

Работа выполнена в рамках Государственного контракта № 17734521419170000340/11.311.17.10 от 14 июня 2017 г. “Анализ радиационного риска и медико-дозиметрическое сопровождение при работе с соединениями трития” шифр “Элемент-17”, финансируемого ФМБА России.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Бондарева Л.Г., Рубайло А.И.* Новые данные уровня загрязнения аэрозольными выпадениями трития в ближней зоне влияния Горно-химического комбината ГК Росатома // Докл. АН. 2016. Т. 467. № 1. С. 67–70. [Bondareva L.G., Rubailo A.I. New data on the level of pollution with tritium aerosol deposition in the near zone of influence of the Mining and Chemical Combine of the State Atomic Energy Agency of Rosatom // Dokl. AN. 2016. T. 467. № 1. P. 67–70. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0869565216070185>
2. *Востротин В.В., Янов А.Ю., Финашов Л.В.* Накопление трития в снежном покрове зоны влияния ПО “Маяк” за осенне-зимний сезон 2015–2016 гг. // Вопр. радиац. безопасности. 2017. № 3 (87). С. 63–67. [Vostrotin V.V., Yanov A.Yu., Finashov L.V. Accumulation of tritium in snow cover in Mayak PA affected area during autumn and winter season of 2015–2016 // Vopr. radiac. bezopasnosti. 2017. № 3 (87). P. 63–67. (in Russian)]
3. *Момот О.А., Силин И.И., Сынзыныс Б.И., Козьмин Г.В.* Оценка радиационного риска для здоровья населения при наличии трития в питьевой воде. Идентификация опасности // Изв. высших учебных заведений. Ядерная энергетика. 2007. № 2. С. 84–92. [Momot O.A., Silin I.I., Synsynys B.I., Kozmin G.V. Assessment of the radiation risk to public health in the presence of tritium in drinking water. Hazard identification // Izv. vysshih uchebnyh zavedenij. Jadernaja jenergetika. 2007. № 2. P. 84–92. (in Russian)]
4. *Момот О.А., Сынзыныс Б.И.* Оценка риска для здоровья при употреблении питьевой воды, содержащей малые количества трития // Вестн. Калужского университета. 2017. № 2 (35). С. 96–100. [Momot O.A., Synsynys B.I. Health risk assessment for drinking small amounts of tritium // Vestn. Kaluzhskogo universiteta. 2017. № 2 (35). P. 96–100. (in Russian)]
5. *Аклеев А.В., Азизова Т.В., Алексахин Р.М. и др.* Итоги 62-й сессии научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН (Вена, 1–5 июня 2015 г.) // Мед. радиология и радиац. безопасность. 2016. Т. 61. № 1. С. 60–72. [Akleev A.V., Azizova T.V., Alexakhin R.M. et al. Results of the 62nd session of the UN Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR) (Vienna, June 1–5, 2015) // Med. radiologija i radiac. bezopasnost'. 2016. V. 61. № 1. P. 60–72. (in Russian)]
6. *Букин А.Н., Лесина И.Г., Семенов А.А. и др.* Проблема трития при переработке ОЯТ // Вопр. атомной науки и техники. Серия: Материаловедение и новые материалы. 2014. № 4. С. 43–48. [Bukin A.N., Lesina I.G., Semenov A.A. et al. The problem of tritium in the processing of spent nuclear fuel // Vopr. atomnoj nauki i tehniki. Serija: Materialovedenie i novye materialy. 2014. № 4. P. 43–48. (in Russian)]
7. *Hughes C.E., Cendón D.I., Harrison J.J. et al.* Movement of a tritium plume in shallow groundwater at a legacy low-level radioactive waste disposal site in eastern Australia // J. Environ. Radioactiv. 2011. V. 102. Issue 10. P. 943–952.
8. *Чеботина М.Я., Николин О.А., Мурашова Е.Л.* Поступление трития на земную поверхность с дождевыми осадками // Водн. хозяйство России: проблемы, технологии, управление. 2012. № 5. С. 77–87. [Chebotina M.I., Nikolin O.A., Murashova E.L. Intake of tritium to earth surface through rainfall // Vodn. hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie. 2012. № 5. P. 77–87. (in Russian) (revised 14.05.2019) Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=18019244>
9. *Чеботина М.Я., Николин О.А., Смагин А.И.* Тритий в снеговом покрове в зонах воздействия предприятий ядерно-топливного цикла на Урале // Водн. хозяйство России: проблемы, технологии, управ-

- ление. 2014. № 2. С. 102–113. [Chebotina M.I., Nikolin O.A., Smagin A.I. Tritium in snow cover in affected areas of nuclear-cycle facilities in Urals // Vodn. hozjajstvo Rossii: problemy, tehnologii, upravlenie. 2014. № 2. P. 102–113. (in Russian) (revised 14.05.2019) Available from: <https://elibrary.ru/item.asp?id=21467267>]
10. Nankar D.P., Patra A.K., Ravi P.M. et al. Studies on the rain scavenging process of tritium in a tropical site in India // J. Environ. Radioactiv. 2012. V. 104. P. 7–13.
 11. Макаров В.Н., Торговкин Н.В. Тритий в снежном покрове бассейна р. Вилюй // Наука и образование. 2015. № 1. С. 50–55. [Makarov V.N., Torgovkin N.V. Tritium in the snow cover of the river basin Vilyuy // Nauka i obrazovanie. 2015. № 1. S. 50–55. (in Russian)]
 12. Турченко Д.В., Лукашенко С.Н., Айдарханов А.О., Ляхова О.Н. Исследование содержания трития в снежном покрове в местах проведения подземных ядерных взрывов // Радиационная биология. Радиоэкология. 2018. Т. 58. № 2. С. 174–182. [Turchenko D.V., Lukashenko S.N., Aydarkhanov A.O., Lyakhova O.N. Investigation of the tritium content in the snow cover in underground nuclear explosions // Radiac. biologija. Radiojekonomika. 2018. V. 58. № 2. P. 174–182. (in Russian). <https://doi.org/10.7868/S0869803118020066>]
 13. Ляхова О.Н., Лукашенко С.Н., Ларионова Н.В. и др. Сравнительная оценка основных источников поступления трития в воздушную среду на территории Семипалатинского испытательного полигона // Радиация и риск. 2014. Т. 23. № 3. С. 43–56. [Lyakhova O.N., Lukashenko S.N., Larionova N.V. et al. Comparative assessment of the main sources of tritium in the air on the territory of the Semipalatinsk test site // Radiacija i risk. 2014. V. 23. № 3. S. 43–56. (in Russian)]
 14. Кабанов М.В., Маркелова А.Н., Мелков В.Н. и др. Содержание трития и радиоуглерода в природных средах в окрестностях г. Томска // Вопр. радиац. безопасности. 2013. № 4. С. 30–44. [Kabanov M.V., Markelova A.N., Melkov V.N. et al. Tritium and radio carbon content in natural environments in the vicinity of Tomsk // Vopr. radiac. bezopasnosti. 2013. № 4. P. 30–44. (in Russian)]
 15. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2013 году. Ежегодник. Обнинск: НПО “Тайфун”, 2014. [Radiation environment in Russia and neighboring countries in 2013. Annual. Federal State Budgeted Institution “Scientific and Production Association “Typhoon”. Obninsk, 2014.]
 16. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2016 году. Ежегодник. Обнинск: НПО “Тайфун”, 2017. [Radiation environment in Russia and neighboring countries in 2016. Annual. Federal State Budgeted Institution “Scientific and Production Association “Typhoon”. Obninsk, 2017. 397 p. (in Russian) [revised 14.05.2019] Available from: https://www.rpatyphoon.ru/upload/medialibrary/130/ezhegodnik_ro_2016.pdf]
 17. Янов А.Ю., Востротин В.В., Финашов Л.В. Тритий в окружающей среде Уральского региона: обзор современного состояния и анализ перспектив изучения с позиций радиологической защиты // Человек. Спорт. Медицина. 2016. Т. 16. № 2. С. 85–99. [Yanov A.Yu., Vostrotin V.V., Finashov L.V. Tritium in the environment of the Ural region: a review of the current state and analysis of the prospects of study from the standpoint of radiological protection // Chelovek. Sport. Medicina. 2016. V. 16. № 2. P. 85–99. (in Russian). <https://doi.org/10.14529/hsm160209>]
 18. Кузнецова И.А., Коркина И.Н., Ставищенко И.В. и др. К организации комплексного мониторинга состояния природной среды в районе падения отделяющихся частей ракет-носителей на территории Северного Урала // Изв. Коми научн. центра УрО РАН. № 2. 2012. С. 57–67. [Kuznetsova I.A., Korkina I.N., Stavishenko I.V. et al. To the organization of integrated monitoring of the state of the environment in the region of the fall of the separating parts of launch vehicles in the Northern Urals // Izv. Komi nauchn. centra UrO RAN. № 2. 2012. P. 57–67. (in Russian)]
 19. Kahle D. Wickham H. ggmap: Spatial Visualization with ggplot2 // R. J. № 5 (1). P. 144–161.
 20. Wickham H. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis. New York: Springer-Verlag, 2009.

Correlation of Volume Activity of Tritium in Melted Snow and Birch Sap in “Mayak” PA Affected Area in Spring 2016

V. V. Vostrotin^{a, #}, A. Y. Yanov^a, and L. V. Finashov^a

^a Southern Urals Biophysics Institute (SUBI), Ozyorsk, Russia

[#]E-mail: vostrotin@subi.su

Radioecological investigation of birch sap and melted snow in the affected area of the Federal State Enterprise “Mayak” Production Association (“Mayak” PA) was performed in March 2016. Maximum volume activity (VA) of tritium in 19 samples of birch sap made 190 Bq/dm³, in the samples of melted snow – 110 Bq/dm³. Processing of the measured results showed a statistically significant grade correlation ($p = 0.02$) between VA of tritium in samples of melted snow and VA of tritium in samples of birch sap correspondingly pairwise to one geographical location; at that no statistically significant difference in pairwise sign test was observed between VA values. A simplified model of decrease of radionuclide VA in birch sap in relation to the distance from “Mayak” PA in the form of exponential function was developed. Parameters of normal (Gaussian) distribution with constant component of dependence of tritium VA in birch sap from geographic coordinates were obtained by means of processing the results of the measurements. The latter model was preferential regarding value of adjusted R^2 .

Keywords: tritium, environment, “Mayak” PA, volume activity, snow, birch sap