

УДК 574.2:614.876:539.16.04

ОЦЕНКА ДОЗЫ ОБЛУЧЕНИЯ БИОТЫ И ЧЕЛОВЕКА ПРИ ВЫБРОСЕ ЙОДА-131 РАДИОФАРМАЦЕВТИЧЕСКИМ ПРОИЗВОДСТВОМ

© 2024 г. А. А. Бурякова^{1, *}, А. И. Крышев¹, А. А. Удалова²¹Научно-производственное объединение “Тайфун” Росгидромета, Обнинск, Россия²Обнинский институт атомной энергетики – филиал “Национальный исследовательский ядерный университет “МИФИ”, Обнинск, Россия

*E-mail: buryakova@rpatyphoon.ru

Потупила в редакцию 27.04.2023 г.

После доработки 28.12.2023 г.

Принята к публикации 27.03.2024 г.

В ходе производственной деятельности радиофармацевтических предприятий осуществляется выброс техногенного ¹³¹I. На примере Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова показан метод оценки радиоэкологической обстановки вокруг предприятия в многолетней динамике путем определения содержания радионуклида в компонентах природной среды, а также дозовых нагрузок на биоту и человека. Выполнен модельный расчет среднегодовой объемной активности радионуклида, основанный на Гауссовой модели рассеяния и переноса примеси в атмосфере, позволяющий определить ее в любой точке местности. Определено, что дозовые нагрузки на биоту изменялись от 0.5 мкГр/сут (для пчелы) до 8.7 мкГр/сут (для дождевого червя) и были значительно ниже экологически безопасных уровней облучения (100000 и 10000 мкГр/сут соответственно). Дозовая нагрузка на взрослого человека составила от 0.5 до 1.3 мкЗв/год, что не превышает квоту предела дозы для института им. Л.Я. Карпова 300 мкЗв/год. Подчеркнута необходимость учета в оценке радиоэкологической обстановки как молекулярной, так и аэрозольной формы ¹³¹I с целью предотвращения занижения оценки дозовой нагрузки до двух раз. Полученные оценки радиоэкологической обстановки вокруг Научно-исследовательского физико-химического института им. Л.Я. Карпова в 2015–2021 гг. свидетельствуют об отсутствии негативного радиационно-экологического воздействия на человека и окружающую его среду. Алгоритм оценки может быть применен для других предприятий, производящих выбросы радиоактивного йода.

Ключевые слова: выброс, ¹³¹I, радиоэкологическая обстановка, радиационный мониторинг, модельная оценка, доза, население, окружающая среда, биота

DOI: 10.31857/S0869803124020093, **EDN:** MXJVV

В современном мире, когда ученые разработали и внедрили ряд способов лечения ранее неизлечимых опухолевых заболеваний с использованием различных радиоизотопов, возрастает необходимость производить еще больше радиофармпрепаратов для ядерной медицины. Отрасль активно развивается, растут производственные мощности заводов по изготовлению радиофармпрепаратов.

В настоящее время в производстве медицинских изотопов реакторным методом задействованы пять площадок отрасли: Научно-исследовательский физико-химический институт им. Л.Я. Карпова (НИФХИ), Институт реакторных материалов (ИРМ), Научно-исследовательский институт атомных реакторов (НИИАР), ПО “Маяк” и Ленинградская АЭС. Среди них крупным поставщиком радиофармпрепаратов и изотопов медицинского назначения является НИФХИ, где на базе исследовательского ядерного реактора ВВР-ц производится радиоизото-

пная продукция: генераторы ^{99m}Tc, радиофармпрепараты на основе ¹³¹I, ¹⁵³Sm. Кроме того, на площадке НИФХИ начато строительство радиофармацевтического завода, соответствующего стандартам GMP, который первым в России будет производить таргетные радиофармпрепараты на основе перспективных изотопов — ¹⁷⁷Lu, ²²⁵Ac, ²²³Ra [1].

Поскольку производство радиофармпрепаратов предусматривает обращение с радиоактивными веществами, оно должно выполняться в соответствии с требованиями норм радиационной безопасности. Состав выброса радиоактивных веществ НИФХИ в атмосферу определяется особенностью технологии производства радиофармпрепаратов. В частности, побочными продуктами производства медицинских изотопов НИФХИ в г. Обнинске являются инертные газы (изотопы аргона, ксенона, криптона), радиоизотопы йода (¹³¹–¹³³, ¹³⁵I) [2].

Радиоактивные изотопы йода, выбрасываемые в окружающую среду, вовлекаются в сложные физические, химические и биологические процессы. Благодаря высокой летучести и подвижности в окружающей среде они могут быстро рассеиваться на большие расстояния, а благодаря высокой миграционной способности и биологической доступности [3, 4] — легко поступать в живые организмы, обитающие рядом с источником выброса, с воздухом, пищей, пылью [5, 6] и, таким образом, оказывать радиационное воздействие на биоту и человека посредством внешнего и внутреннего облучения. Среди всех радиоизотопов йода, входящих в состав газоаэрозольного выброса, основную радиологическую значимость имеет ^{131}I [4], что обуславливает необходимость контроля выбросов этого изотопа и оценки его радиационного воздействия на население и биоту.

Как показывают данные многолетнего мониторинга радиационной обстановки г. Обнинска, в период с 2015 до 2018 г. наблюдалось увеличение среднегодовой объемной активности (СГОА) ^{131}I , а также случаев появления радионуклида в приземном слое атмосферного воздуха города. Максимальные измеренные значения СГОА ^{131}I в рассматриваемый период наблюдались в 2018 г. (8.8×10^{-4} Бк/м³) и 2019 г. (5.8×10^{-4} Бк/м³) [7, 8]. Снижение СГОА ^{131}I после 2018 г. обусловлено реализацией мероприятий по снижению выбросов радиоактивных веществ: оптимизация систем газоочистки, в том числе изменение технологических режимов с целью снижения выброса радиоизотопов йода, замена аэрозольных и йодных фильтров в вентиляционной системе очистки воздуха, внедрение модернизированной технологии переработки облученных мишеней для эффективного улавливания радиойода и радиоактивных благородных газов [9, 10].

В атмосферном воздухе г. Обнинска ^{131}I регистрируется в молекулярной и аэрозольной формах. При сухом осаждении определяющую роль играет соотношение химических форм йода в приземном слое воздуха, и в первую очередь доля молекулярного йода. Количество йода в молекулярной форме во многом определяет возможные уровни загрязнения. Доля молекулярной фракции в отбираемых пробах изменяется от 77 до 93% [7].

Обнаружение системами радиационного мониторинга в январе-феврале 2017 г. повышенного содержания ^{131}I в воздухе ряда европейских стран инициировало проведение исследований о возможных источниках такого выброса. В рамках этих ис-

следований были высказаны многочисленные гипотезы о возможном источнике ^{131}I в воздухе, при этом одним из потенциальных источников назывались выбросы исследовательских реакторов или радиофармацевтических производств, среди которых деятельность НИФХИ [7, 11]. Стоит отметить, что ранее уже были известны случаи появления более высоких концентраций ^{131}I в атмосфере Европы: осенью 2011 г. за пределами Венгрии были обнаружены повышенные концентрации радионуклида вследствие выброса Институтом изотопов вблизи Будапешта, инцидент в августе 2008 г. связан с выбросом газообразного молекулярного ^{131}I Национальным институтом радиоэлектроники в Бельгии [11]. Подобные внештатные ситуации возникают периодически и, как правило, сразу обнаруживаются системами мониторинга.

На территории Российской Федерации функционирует Единая государственная автоматизированная система мониторинга радиационной обстановки (ЕГАСМРО). Мониторинг радиационной обстановки организуется на государственном, региональном и локальном (объектовом) уровнях, на каждом из которых осуществляется сбор, обработка, хранение, анализ, обобщение и распространение данных о радиационной обстановке в пределах государства, отдельного региона с радиационно опасными объектами и конкретного объекта использования атомной энергии соответственно [12]. Местные системы радиационного мониторинга регулярно проводят контроль за содержанием радиойода в атмосфере и имеют полное представление о содержании радионуклида в многолетней динамике. Основываясь на этих данных, можно оценить локальное воздействие на живые организмы и окружающую среду вследствие поступления техногенного ^{131}I в компоненты природной среды.

Оценка содержания радиоактивного ^{131}I в компонентах природной среды и соответствующих мощностей дозы облучения с использованием данных радиационного мониторинга будет, однако, определять дозовые нагрузки только для конкретной точки местности, где были непосредственно проведены измерения объемной активности в атмосферном воздухе. Моделирование рассеяния выброса радиойода дает представление о переносе радионуклида в атмосфере, тем самым позволяет выявить точки местности, где ожидаются максимальные уровни содержания ^{131}I . Дозовая нагрузка на население и окружающую среду при эксплуатации объектов использования атомной энергии фор-

мируется с учетом рассеяния выброса радионуклидов в атмосферном воздухе. При этом для всех путей облучения, за исключением перорального, величина дозы зависит от места нахождения живого организма на местности.

Длительное время в отношении радиационной безопасности окружающей среды применялся антропоцентрический подход, согласно которому в случае если защищен человек, то защищена и природа. Доводы в пользу такого подхода являются спорными и не учитывают всех сценариев и радиоэкологических ситуаций [13, 14]. Напротив, экоцентрический принцип подразумевает “здоровье человека в здоровой экосистеме”. Впоследствии МКРЗ включила в систему радиационной защиты и биоту, представив основные критерии и принципы защиты биоты [15] и предложив набор референтных организмов биоты, который, впрочем может быть актуализирован для конкретных природных условий. Поскольку два основных подхода к обеспечению радиационной безопасности населения и окружающей среды взаимозависимы и дополняют друг друга, необходимо оценивать радиационную обстановку как для человека, так и для представителей живой природы.

Таким образом, целью настоящей работы является оценка вклада ^{131}I , поступающего в атмосферный воздух при производстве медицинских изотопов реакторным методом (на примере НИФХИ им. Л.Я. Карпова), в формирование дозы облучения человека и референтных видов биоты.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Оценка среднегодовой объемной активности ^{131}I в приземном слое воздуха

СГОА ^{131}I в приземном воздухе оценена с использованием модельного расчета, основанного на классической модели — статистической Гауссовой модели переноса и рассеяния примеси в атмосфере, которая позволяет оценить содержание ^{131}I в окружающей среде и дозовую нагрузку в любой запрашиваемой точке местности [7]. Такой расчет подразумевает использование метеорологических данных, определяемых вблизи рассматриваемого объекта, а также данных о выбросе радионуклида из источника. Величины среднегодового выброса ^{131}I в результате функционирования НИФХИ в г. Обнинске регулярно публикуются в Ежегодниках о радиационной обстановке на территории РФ [8, 16]. Оценки СГОА проведены за период времени с 2015 по 2021 г. Основные модельные характеристики для расчета содержания радионуклида в компонентах

природной среды, включая величину фактора метеорологического разбавления, вычисляли в соответствии с методическими рекомендациями [17].

Модель позволяет оценить среднегодовые значения объемной активности радионуклида в окружающей среде, и эти данные, в свою очередь, становятся исходными для оценки дозовой нагрузки на живые организмы.

Корректность модельных оценок подтверждается сравнением данных мониторинга, полученных путем контроля на пунктах наблюдений содержания радионуклида в природной среде, со значениями модельного расчета. В рассматриваемом случае контрольными данными являются данные об объемной активности ^{131}I , регистрируемые на стационарном посту НПО “Тайфун”, расположенном в 5 км в северо-северо-западном направлении от промплощадки НИФХИ [7, 8, 16]. Содержание ^{131}I в атмосферном воздухе на данном стационарном посту определяется путем непрерывного ежесуточного отбора проб с помощью воздухофильтрующей установки (методом фильтрации воздуха одновременно через два фильтра), которые позволяют фиксировать радиойод в аэрозольной и молекулярной формах и их последующего анализа в лаборатории [3, 19]. Статистическую обработку данных проводили с помощью программного пакета Microsoft Excel. Достоверность различий между расчетными и измеренными значениями оценивали с использованием критерия Стьюдента.

Оценка доз облучения референтных видов биоты

Оценка радиационного воздействия на биоту проведена на основе оценок поглощенной дозы облучения референтных организмов флоры и фауны в районе расположения предприятия. Ввиду большого биоразнообразия в экосистемах невозможно оценить радиационное воздействие на каждого представителя флоры и фауны. Поэтому оценка проводится для ограниченного набора представительных видов биоты, специфичных для территории расположения объекта исследования. В соответствии с [15] выбраны следующие виды биоты наземной экосистемы: дождевой червь, мелкое и крупное млекопитающие — мышь и лось, среди насекомых — пчела, а также травянистые растения и сосна. Выбор видов обусловлен широким распространением данных живых организмов на рассматриваемой территории, а также их радиочувствительностью. Кроме того, представительные виды биоты отобраны согласно таким критериям, как: экологическая значимость объекта биоты (из числа доминирующих видов), величина мощности

дозы облучения объекта биоты (анализ критических путей радиационного воздействия, приводящий к повышенным дозам облучения организмов), способность к восстановлению (с низким потенциалом восстановления) [20].

Определение дозы облучения референтных видов биоты осуществляли согласно действующим рекомендациям Р 52.18.820-2015 [20] с учетом публикации [21], где приведены коэффициенты перехода нуклида и факторы дозовой конверсии для биоты.

Оценку поглощенных доз облучения биоты проводили за сутки. Определяли полный вклад радионуклида, включая внешнее и внутреннее облучение организма в компонентах среды.

В расчетах учитывали время пребывания организмов в среде обитания: наземные организмы (дождевой червь в почве, лось на поверхности) — постоянное (100%); мелкие млекопитающие — частично в почве, частично на поверхности (по 50%); пчела — частично при отсутствии травы на поверхности почвы, частично в воздухе, трава и сосна — как в почве, так и на поверхности.

НИФХИ расположен в лесном массиве рядом с автомагистралью. В расчетах рассматривали сценарий, когда биота перманентно обитает в пределах критической точки местности — точке с максимальной определенной концентрацией ¹³¹I в приземном слое атмосферы. Согласно ранее проведенным оценкам [7], критическая точка располагается в 1.9 км в северо-восточном направлении от источника выброса.

В качестве радиационно-экологического критерия для референтных организмов использовали пре-

дельно допустимую радиационную нагрузку (ПДРН) — максимально допустимая мощность дозы, не приводящая к появлению последствий радиационного воздействия на заболеваемость, размножение и продолжительность жизни видов биоты [22]. Для оценки радиационной безопасности представителей наземной экосистемы сравнивали рассчитанную величину мощности дозы облучения со следующими значениями ПДРН (мГр/сут): 0.1–1 мелкие и крупные млекопитающие, 1–10 сосна обыкновенная, 10–100 наземные растения (кроме сосны обыкновенной) и беспозвоночные животные, 100–1000 насекомые [15, 23].

Оценка дозы облучения населения

Расчет эффективных доз внутреннего и внешнего облучения человека для населения взрослой возрастной группы (> 17 лет) с учетом их пребывания на открытом воздухе проводили в соответствии с действующими методическими документами [17] и нормами [18].

В районе расположения предприятия НИФХИ размещаются населенные пункты, где население либо проживает постоянно, либо периодически ведет сельскохозяйственную деятельность. С учетом этих особенностей для оценки радиационной безопасности вокруг объекта исследования для них определены три основных сценария (табл. 1) [7].

В качестве основных возможных путей радиационного воздействия от выбросов ¹³¹I рассматривали внешнее облучение от радиоактивного облака и от радиойода, осевшего на землю, и внутреннее облучение при вдыхании радионуклида с воздухом

Таблица 1. Сценарии жизнедеятельности населения в районе источника выброса НИФХИ

Table 1. Scenarios of population vital activity in the area of the NIFHI discharge source

№	Описание сценария
Сценарий 1	Взрослый человек постоянно проживает и ведет хозяйственную деятельность в критической точке местности (далее — КТ) с максимальной определенной концентрацией ¹³¹ I. КТ находится на расстоянии 1.9 км в северо-восточном направлении от источника выброса.
Сценарий 2	Взрослый человек постоянно проживает и ведет хозяйственную деятельность в д. Доброе — ближайшем населенном пункте к НИФХИ, расположенном на расстоянии 1,5 км в северо-западном направлении от источника выброса. По состоянию на 1 марта 2023 г. в д. Доброе постоянно проживают 129 чел., среди них 118 чел. — взрослые.
Сценарий 3	Взрослый человек постоянно проживает в г. Обнинске, причем в той его части, которая по расчетным оценкам наиболее подвержена воздействию выбросов НИФХИ, на расстоянии 4 км к северу от источника выбросов (85% времени). У жителя города также есть дачный дом и участок на территории садового товарищества “Медик”, расположенного в 700 м к северо-востоку от источника выбросов, где он выращивает на своем участке овощи и фрукты для личного потребления (15% времени; не учитывается мясо-молочная продукция).

и в результате его миграции по пищевым и биологическим цепочкам. Учитывается время пребывания человека в той или иной точке местности: сценарий 1 и 2 — 100%-ное пребывание, сценарий 3 — 85% времени в г. Обнинске (где 67% времени — пребывание в многоэтажном здании и 33% — на открытом воздухе) и 15% — на садовом участке.

В настоящей работе оценки доз облучения населения и представительных видов биоты выполнены с учетом молекулярной и аэрозольной форм ^{131}I и показано их соотношение.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Среднегодовая объемная активность ^{131}I в приземном слое воздуха

Величины СГОА в 2015–2021 гг., полученные расчетным методом, составили 4×10^{-4} — 1×10^{-3} Бк/м³, по данным радиационного мониторинга — 3×10^{-4} — 9×10^{-4} Бк/м³. Показано, что различия между данными мониторинга СГОА ^{131}I в месте расположения стационарного поста мониторинга НПО “Тайфун” в г. Обнинске и данными, полученными расчетным путем с помощью Гауссовой модели переноса и рассеяния примеси в атмосфере, являются статистически недостоверными (критерий Стьюдента, $p < 0.05$).

Дозы облучения референтных видов биоты

На рис. 1 показаны уровни облучения представителей разных видов биоты, обитающих согласно сценарию в точке местности с максимальной концентрацией ^{131}I в приземном слое атмосферы.

Дозовые нагрузки на объекты биоты изменяются от 0.5 мкГр/сут (для пчелы в 2015 г.) до 8.7 мкГр/сут (для дождевого червя в 2018 г.). В 2018 г. имеет место увеличение мощностей доз облучения всех видов биоты в связи с повышенными уровнями выброса ^{131}I в атмосферу [16]. Наиболее подвержены радиационному воздействию в данной точке дождевой червь и млекопитающие. При этом полученные величины мощности дозы облучения биоты были значительно ниже пороговых уровней облучения ПДРН.

Вклад молекулярной и аэрозольной фракции ^{131}I в суммарную дозу облучения биоты в 2018 г. составляет 69% и 31% соответственно (рис. 2). Результаты расчетов доз облучения биоты в другие годы в изученном временном интервале (2015–2021 гг.) показали, что без учета аэрозольной фракции доза была бы занижена в 1.2–1.4 раза.

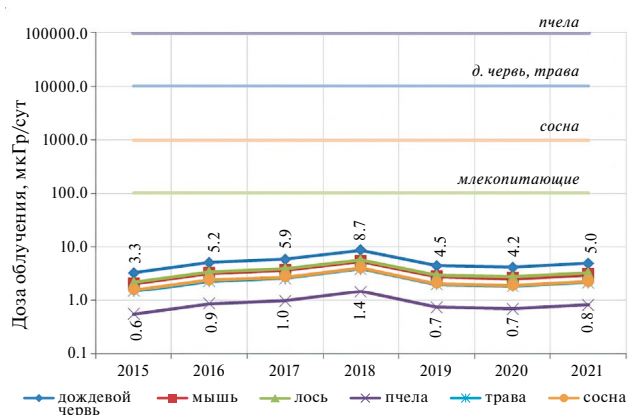


Рис. 1. Мощности дозы облучения биоты в критической точке местности относительно уровней ПДРН, мкГр/сут. Верхние прямые линии — величины экологически безопасного уровня облучения ПДРН для соответствующих объектов биоты [15, 23].

Fig. 1. The radiation dose rates for biota at the critical point of the terrain relative to the levels of maximum permissible dose (MPD), $\mu\text{Gy/d}$. The upper straight lines are the values of the environmentally safe level of exposure (MPD) for the corresponding biota objects [15, 23].

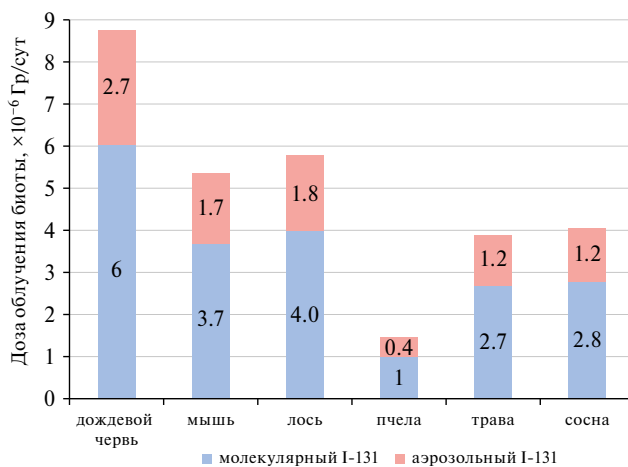


Рис. 2. Вклад молекулярной и аэрозольной форм ^{131}I в мощность дозы облучения биоты в критической точке местности в 2018 г.

Fig. 2. Contribution of molecular and aerosol form ^{131}I to the radiation dose rate for biota at the critical point of the terrain in 2018.

Соотношение внутреннего и внешнего облучения в суммарной поглощенной дозе от ^{131}I различается для изученных видов биоты (рис. 3), но в большинстве случаев внешнее облучение вносит основной вклад (59–92%), за исключением пчелы и лося, у которых преобладало внутреннее облучение (73–96%).

Расчетные оценки показали, что даже при учете краткосрочных повышенных выбросов ^{131}I предприятием дозовые нагрузки на биотическую компоненту на три-четыре порядка ниже экологически безопасного уровня облучения. Проведенные мероприятия по снижению выбросов радиоактивных веществ снизили воздействие на окружающую среду: в динамике с 2019 г. дозовая нагрузка на биоту снизилась в 1.8–2.1 раза.

Дозы облучения населения

Согласно расчетным оценкам в 2015–2021 гг. дозовые нагрузки от выбросов ^{131}I на население, проживающее в районе расположения НИФХИ, находились в пределах 0.5–1.9 мкЗв/год (рис. 4). Величины дозы облучения составляют <1% от квоты предела дозы для населения вокруг НИФХИ — 300 мкЗв/год.

Уровни облучения 2018 г. не превышались и по-прежнему являются максимальными в рассматриваемой временной динамике: 1.9 мкЗв/год (сценарий 1), 1.7 мкЗв/год (сценарий 2), 1.3 мкЗв/год (сценарий 3) [7]. Дозовые нагрузки для жителей д. Доброе в силу расположения и метеоусловий находятся на уровне дозовых величин, характерных для сценария 1.

Наиболее реалистичны оценки для сценария 3, поскольку учитывают пребывание населения в нескольких точках местности в течение года, а также характеристики ведения хозяйственной деятельности, максимально приближенные к реальным событиям.

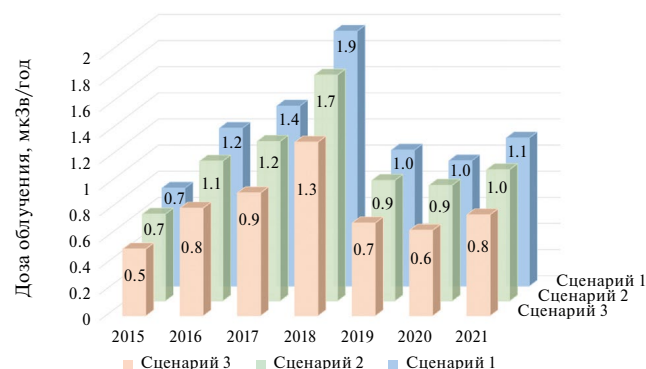


Рис. 4. Суммарные дозы облучения населения от выброса ^{131}I в районе расположения НИФХИ в 2015–2021 гг., мкЗв/год.

Fig. 4. Total radiation doses for the population from the ^{131}I discharge in the area of the NIFHI location in 2015–2021, $\mu\text{Sv/year}$.

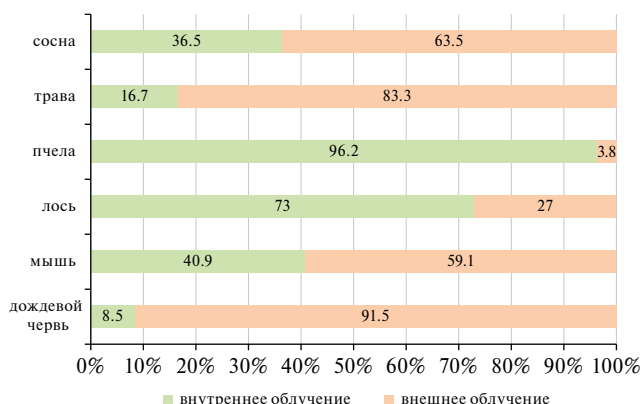


Рис. 3. Вклад внутреннего и внешнего облучения в дозу облучения биоты.

Fig. 3. Contribution of internal and external exposure to the radiation dose for biota.

Годовые дозы облучения населения от выбросов ^{131}I НИФХИ для жителя г. Обнинска (в рамках сценария 3) варьировали от 0.5 до 1.3 мкЗв/год с максимумом в 2018 г. В период с 2019 по 2021 гг. отмечается резкое сокращение уровней облучения до уровней 2016 г. Такое изменение объясняется результатом ремонтных работ по усовершенствованию фильтрационных систем улавливания выбросов.

Преимущественный вклад в суммарную дозовую нагрузку вносит молекулярный йод. Вклад аэрозольной формы ^{131}I для сценария 3 варьирует от 8.1 (в 2017 г.) до 25.9% (в 2018 году) (рис. 5). Наиболее

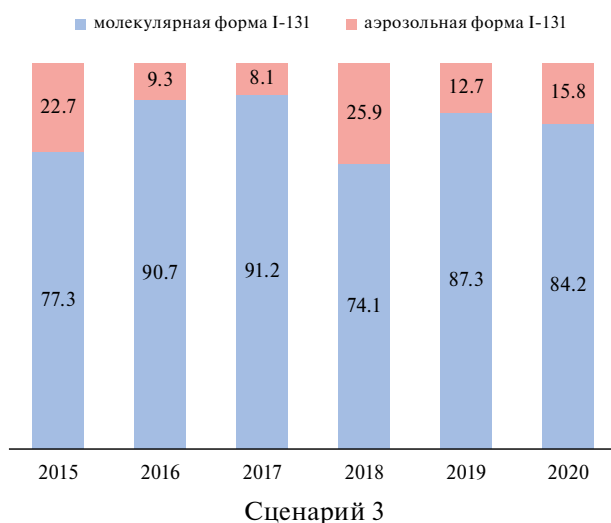


Рис. 5. Вклад молекулярной и аэрозольной форм ^{131}I в суммарную дозу облучения населения при сценарии 3, %.

Fig. 5. Contribution of molecular and aerosol forms of ^{131}I to the total radiation dose for the population in scenario 3, %.

высокие дозовые нагрузки от аэрозольной фракции в 2015 г. (22.7%) и 2018 году (25.9%) определяются высокими среднесуточными значениями объемной активности 0.11 и 0.25 Бк/м³ соответственно, что всего на один порядок ниже норматива допустимой СГОА ¹³¹I. Таким образом, в оценке важно учитывать две формы содержания ¹³¹I. Определяя дозу облучения с учетом только молекулярной фракции радионуклида, оценка может быть занижена, в данном случае — в 1.3 раза.

Для сценария 3 вклад внешнего и внутреннего облучения в годовую дозу облучения составляет 49.7 и 50.3% соответственно для молекулярной фракции ¹³¹I и 58.1 и 41.9% соответственно для аэрозольной формы. Доза от ¹³¹I практически полностью формируется за счет перорального пути поступления, прежде всего от потребления овощей собственного производства.

Среднегодовая доза облучения населения от выброса радионуклида оставалась ниже выделенной дозовой квоты. Вследствие мероприятий по снижению выбросов радиоактивных веществ снизилось воздействие на человека: дозовая нагрузка на население сократилась в 1.6–2.2 раза.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Алгоритм оценки воздействия деятельности объекта на население и окружающую среду, реализованный в данной работе, может применяться для оценки радиоэкологической обстановки вокруг других предприятий, производящих выбросы радиоактивного йода. Выброс ¹³¹I в силу своих физико-химических характеристик и широкого применения в производстве радиофармпрепаратов имеет особое радиологическое значение. Его присутствие в атмосфере является надежным индикатором распространения выброса.

Характер изменения дозовой нагрузки на биоту и население в районе расположения НИФХИ вследствие выброса ¹³¹I обусловлен вариабельностью величин среднегодового выброса и СГОА радиойода на протяжении последних лет.

Вследствие отсутствия значимых различий между данными мониторинга и полученными данными в ходе модельного расчета подтверждена корректность оценок с использованием модели переноса и рассеяния примеси в атмосфере.

Согласно проведенным оценкам, дозовая нагрузка на биоту изменялась от 0.5 мкГр/сут (для пчелы) до 8.7 мкГр/сут (для дождевого червя) и была значительно ниже пороговых уровней облучения

(100000 и 10000 мкГр/сут соответственно). Наиболее подвержены радиационному воздействию в данной точке дождевой червь и млекопитающие. Максимальные мощности дозы облучения наблюдались в 2018 г., при этом вклад молекулярного йода в дозу составил 69%. Учет аэрозольной фракции йода предотвращает занижение оценки в 1.2–1.4 раза.

Для оценки эффективной дозы облучения населения предпочтительно использовать реалистичный сценарий, согласно которому дозовые нагрузки на взрослого человека составили от 0.5 мкЗв/год в 2015 г. до 1.3 мкЗв/год в 2018 г., что не превышает квоту предела дозы НИФХИ 300 мкЗв/год. Оценки учитывают вклад молекулярного йода и аэрозольной фракции, преобладает вклад молекулярного ¹³¹I в суммарную дозу облучения.

Рассмотренная модельная оценка позволяет определить содержание радионуклида в компонентах природной среды, а также оценить дозовую нагрузку на биоту и человека в любой точке местности.

В результате полученные модельные оценки позволяют судить о том, что штатные выбросы предприятия не оказывают значимого влияния на экосистему и человека.

Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией статьи.

The authors declare no conflicts of interests.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Полякова М. Изотопы исцеления. Цепочка производства: от стартовых материалов до инновационных радиофармпрепаратов. *Вестн. Атомпрома: Информационно-аналитический журнал об атомной отрасли*. М.: ООО “НВМ-пресс”. 2022;(3):18–22. [Polyakova M. Izotopy isceleniya. Cepochka proizvodstva: ot startovyh materialov do innovacionnyh radiofarmpreparatov. *Vestnik Atomproma: informacionno-analiticheskij zhurnal ob atomnoj otrasli*. Moskva: ООО “NVM-press”. 2022;(3):18–22. (In Russ.)]
2. Отчет по экологической безопасности “НИФХИ им. Л.Я. Карпова” за 2020 год. Обнинск: АО “НИФХИ им. Л.Я. Карпова”, 2021. 35 с. [Otchet po jekologicheskoj bezopasnosti “NIFHI im. L.Ja. Karpova” za 2020 god. Obninsk: AO “NIFHI im. L.Ja. Karpova”, 2021. 35 p. (In Russ.)]
3. Агеева Н.В., Ким В.М., Васильева К.И. и др. Многолетние наблюдения за содержанием ¹³¹I в приземном слое атмосферы г. Обнинска Калужской области. *Радиация и риск*. 2015;24(1):96–107. [Ageeva N.V., Kim V.M., Vasilieva K.I. et al. Long-term monitoring airborne ¹³¹I in the surface layer in Obninsk city, Kaluga region. *Radiacija i risk*. 2015;24(1):96–107. (In Russ.)]
4. Василенко И.Я., Василенко О.И. Радиоактивный йод. *Энергия: экономика, техника, экология*. 2003; (5):57–62. [Vasilenko I.Ya., Vasilenko O.I.

- Radioaktivnyj jod. *Jenergija: jekonomika, tehnika, jekologija*. 2003; (5):57–62. (In Russ.)]
5. Нуштаева В.Э., Микаилова Р.А., Спиридонов С.И., и др. Оценка и прогнозирование воздействия атмосферных выбросов Белоярской АЭС на референтные организмы биоты. *АгроЭкоИнфо*. 2019;(3):1–9. [Nushtaeva V.E., Mikailova R.A., Spiridonov S.I. et al. Ocenka i prognozirovanie vozdejstvija atmosferynyh vybrosov Belojarskoj AJeS na referentnye organizmy bioty. *AgroJekoInfo*. 2019;(3):1–9. (In Russ.)]
 6. Карпенко Е.И. Комплексная оценка радиационного воздействия объектов ядерной энергетики на окружающую среду и человека: Дис. ... д-ра биол. наук: 03.01.01 — радиобиология. Обнинск: ФГБНУ ВНИИРАЭ, 2020. 317 с. [Karpenko E.I. Kompleksnaja ocenka radiacionnogo vozdejstvija obektov jadernoje jenergetiki na okruzhajushhujuju sredu i cheloveka [dissertation] Obninsk: All-Russian Research Institute of Agricultural Radiology and Agroecology, 2020. 317 p. (In Russ.)]
 7. Бурякова А.А., Булгаков В.Г., Крышев А.И., Каткова М.Н. Оценка распространения ^{131}I в окружающей среде и доз облучения населения Обнинска и его окрестностей от выбросов АО “НИФХИ им. Л.Я. Карпова”. *Радиация и риск*. 2021;30(3):103–111. [Buryakova A.A., Bulgakov V.G., Kryshev A.I., Katkova M.N. Radiodine, ^{131}I , release into the atmosphere during normal operation of the radiopharmaceutical production facility at the Karpov Institute of Physical Chemistry: analysis of ^{131}I concentration in the air and radiation dose to the population of the Obninsk city and its surroundings. *Radiacija i risk*. 2021;30(3):103–111. (In Russ.)]. <https://doi.org/10.21870/0131-3878-2021-30-3-103-111>
 8. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2021 году. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, Росгидромет, 2022. 342 с. [Radiacionnaja obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2021 godu. *Ezhegodnik*. Obninsk: FGBU “NPO “Tajfun”, Rosgidromet, 2022. 342 p. (In Russ.)]
 9. Отчет по экологической безопасности “НИФХИ им. Л.Я. Карпова” за 2017 год. Обнинск: АО “НИФХИ им. Л.Я. Карпова”, 2018. 34 с. [Otchet po jekologicheskoj bezopasnosti “NIFHI im. L.Ja. Karpova” za 2017 god. Obninsk: AO “NIFHI im. L.Ja. Karpova”, 2018. 34 p. (In Russ.)]
 10. Отчет по экологической безопасности “НИФХИ им. Л.Я. Карпова” за 2018 год. Обнинск: АО “НИФХИ им. Л.Я. Карпова”, 2019. 35 с. [Otchet po jekologicheskoj bezopasnosti “NIFHI im. L.Ja. Karpova” za 2018 god. Obninsk: AO “NIFHI im. L.Ja. Karpova”, 2019. 35 p. (In Russ.)]
 11. Masson O., Steinhäuser G., Wershofen H. et al. Potential source apportionment and meteorological conditions involved in airborne ^{131}I detections in January/February 2017 in Europe. *Environ. Sci. Technol.* 2018; 52:8488–8500. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b01810>
 12. Постановление Правительства РФ от 10 июля 2014 г. № 639 “О государственном мониторинге радиационной обстановки на территории Российской Федерации” (ред. от 18.01.2022). [Postanovlenie Pravitel'stva RF ot 10 ijulja 2014 g. № 639 “O gosudarstvennom monitoringe radiacionnoj obstanovki na territorii Rossijskoj Federacii” (red. ot 18.01.2022) (In Russ.)]
 13. Панченко С.В., Линге И.И., Воробьева Л.М., и др. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту. Под общ. ред. И.И. Линге и И.И. Крышева. М: Сам Полиграфист, 2015. 265 с. [Panchenko S.V., Linge I.I., Vorobyova L.M. et al. Prakticheskie rekomendacii po voprosam ocenki radiacionnogo vozdejstvija na cheloveka i biotu. Pod obshh. red. I.I. Linge i I.I. Krysheva. M: Sam Poligrafist, 2015. 265 p. (In Russ.)]
 14. Панов А.В., Санжарова Н.И., Гераскин С.А. и др. Анализ международных подходов к обеспечению радиационной безопасности населения и окружающей среды при реабилитации объектов и территорий, загрязненных в результате прошлой деятельности предприятия ядерного топливного цикла. *Радиация и риск*. 2016; 25(3): 86–103. [Panov A.V., Sanzharova N.I., Geraskin S.A. et al. Survey of international approaches to ensuring radiation safety of the public and environment during remediation of radioactively contaminated sites of former nuclear fuel cycle facilities. *Radiacija i risk*. 2016;25(3):86–103. (In Russ.)]
 15. ICRP Publication 108. Environmental Protection: the Concept and Use of Reference Animals and Plants. *Annals ICRP*, 2009. 251 p.
 16. Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2019 году. Ежегодник. Обнинск: ФГБУ “НПО “Тайфун”, Росгидромет, 2020. 340 с. [Radiacionnaja obstanovka na territorii Rossii i sopredel'nyh gosudarstv v 2019 godu. *Ezhegodnik*. Obninsk: FGBU “NPO “Tajfun”, Rosgidromet, 2020. 340 p. (In Russ.)]
 17. Методические рекомендации по расчету нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ из организованных источников в атмосферный воздух применительно для организации Госкорпорации “Росатом”. Утверждены 15.07.2014 г. № 1-1/310-Р. М., ГК “Росатом”, 2014. [Metodicheskie rekomendacii po raschetu normativov predelno dopustimyh vybrosov radioaktivnyh veshhestv iz organizovannyh istochnikov v atmosfernyj vozduh применительно для организаций Госкорпорации “Росатом”. Utverzhdeny 15.07.2014 g. № 1-1/310-R. M., GK “Rosatom”, 2014. (In Russ.)]
 18. Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09 “Нормы радиационной безопасности НРБ-99/2009” (утв. постановлением Главного государственного санитарного врача РФ от 7 июля 2009 г. № 47). [Sanitarnye pravila i normativy SanPiN 2.6.1.2523-09 “Normy radiacionnoj bezopasnosti NRB-99/2009” (utv. postanovleniem Glavnogo gosudarstvennogo sanitarnogo vracha RF ot 7 ijulja 2009 g. № 47) (In Russ.)]
 19. РД 52.18.826-2015 Наставление гидрометеорологическим станциям и постам. Вып. 12. Наблюдения за радиоактивным загрязнением компонентов природной среды. Обнинск, 2015. 105 с. [RD 52.18.826-2015 Nastavlenie gidrometeorologicheskimi stancijam i postam. Vypusk 12. Nabljudenija za radioaktivnym zagrjazneniem komponentov prirodnoj sredy. Obninsk, 2015. 105 p. (In Russ.)]
 20. Рекомендации Р 52.18.820-2015. Оценка радиационно-экологического воздействия на объекты природной среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Утверждены Росгидрометом Минприроды России 17.04.2015 г. Обнинск, 2015. 60 с. [Rekomendacii R 52.18.820-2015. Ocenka radiacionno-jeologicheskogo vozdejstvija na obekty prirodnoj sredy po dannym monitoringa radiacionnoj obstanovki. Utverzhdeny Rosgidrometom Minprirody Rossii 17.04.2015 g. Obninsk, 2015. 60 s. (In Russ.)]

- radiacionno-jekologicheskogo vozdejstviya na obekty prirodnoj sredy po dannym monitoringa radiacionnoj obstanovki. Uverzhdeny Rosgidrometom Minprirody Rossii 17.04.2015 g. Obninsk, 2015. 60 p. (In Russ.))
21. ICRP Publication 136. Dose coefficients for non-human biota environmentally exposed to radiation. *Ann. ICRP*. 2017; 46(2).
 22. Рекомендации Р 52.18.923-2022. Порядок оценки риска от радиоактивного загрязнения окружающей среды по данным мониторинга радиационной обстановки. Обнинск, 2022. 28 с. [Рекомендации Р 52.18.923-2022. Porjadok ocenki riska ot radioaktivnogo zagraznenija okruzhajushhej sredy po dannym monitoringa radiacionnoj obstanovki. Obninsk, 2022. 28 p. (In Russ.)]
 23. ICRP Publication 124. Protection of the environment under different exposure situations. *Ann. ICRP*. 2014;43(1):1-58.

Assessment of the Radiation Dose to Biota and Humans During the Discharge of Iodine by Radiopharmaceutical Production

A. A. Buryakova^{1*}, A. I. Kryshev¹, A. A. Udalova²

¹Research and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russia

²National Research Nuclear University (NRNU) MEPhI Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering (OINPE), Obninsk, Russia

*E-mail: buryakova@rpatyphoon.ru

During the production activities of radiopharmaceutical enterprises, the discharge of technogenic ¹³¹I is carried out. On the example L.Ya. Karpov Scientific Research Institute of Physics and Chemistry (Obninsk), a method for assessing the radioecological situation around the enterprise in long-term dynamics is shown by determining the content of radionuclide in the components of the natural environment, as well as dose loads on biota and humans. A model assessment of the average annual volume activity of a radionuclide based on a Gaussian model of scattering and transport of impurities in the atmosphere, allowing to determine it at any point of the terrain, has been performed. It was determined that the dose loads on biota varied from 0.5 µGy/d (for bees) to 8.7 µGy/d (for earthworms) and were significantly lower than environmentally safe exposure levels (100000 and 10000 µGy/d, respectively). Adult radiation doses ranged from 0.5 µSv/year to 1.3 µSv/year, which doesn't exceed the quota of the Karpov Scientific Research Institute dose limit 300 µSv/year. The necessity of taking into account both the molecular and aerosol forms of ¹³¹I in the assessment of the radioecological situation in order to prevent underestimation of the dose load by up to two times is emphasized. The obtained assessments of the radioecological situation around the Karpov Scientific Research Institute in 2015-2021 indicate the absence of negative radiation and environmental effects on humans and their environment. The assessment algorithm can be applied to other enterprises producing radioactive iodine discharges.

Keywords: discharge, iodine-131, radioecological situation, radiation monitoring, model assessment, dose, population, environment, biota.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ СТАТЬИ

Бурякова Анна Александровна (Buryakova Anna Aleksandrovna), <https://orcid.org/0000-0002-4455-9565>, Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия (Research and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russia); e-mail: buryakova@rpatyphoon.ru

Крышев Александр Иванович (Kryshev Aleksandr Ivanovich), <https://orcid.org/0000-0001-6816-0260>, Научно-производственное объединение "Тайфун", Обнинск, Россия (Research and Production Association "Typhoon", Obninsk, Russia); e-mail ecomod@yandex.ru

Удалова Алла Александровна (Oudalova Alla Aleksandrovna), <https://orcid.org/0000-0003-2758-5793>, Обнинский институт атомной энергетики — филиал "Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", Обнинск, Россия (National Research Nuclear University (NRNU) MEPhI Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering (OINPE), Obninsk, Russia); e-mail oudalova@mail.ru

ВКЛАД АВТОРОВ

Все авторы внесли эквивалентный вклад в подготовку публикации. Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.