

Дозы внутреннего облучения у населения префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима–Дайичи

И.А. Звонова

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева, Федеральная служба по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека, Санкт-Петербург, Россия

Статья посвящена анализу результатов дозиметрии внутреннего облучения жителей префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима–Дайичи. 24–30.03.2011 г. были проведены скрининговые исследования содержания ^{131}I в щитовидной железе детей в тех муниципалитетах, где японская программа оценки радиологических последствий аварии «SPEEDI» предсказывала дозы в щитовидной железе детей 1 года от 100 до 500 мЗв. Среди 1080 измерений детей 55% были ниже фона, а максимальная оценка эквивалентной дозы в щитовидной железе составила 43 мЗв. Измерения нескольких десятков жителей другими приборами и методами подтвердили низкие уровни содержания ^{131}I в щитовидной железе. Всего массив прямых измерений ^{131}I в щитовидной железе жителей Фукусимы составляет примерно 1300 человек. В пяти обследованных муниципалитетах 75% квартиль распределений индивидуальных доз в щитовидной железе был ниже 10 мЗв, медиана — от 0 до 3,7 мЗв среди детей в возрасте от 0 до 15 лет. Вклад короткоживущих радионуклидов йода оценивается в пределах 15% дозы от ^{131}I для основного радиоактивного выброса 15 марта. Эффективная доза внутреннего облучения, оцененная по 10 тысячам измерений содержания радионуклидов цезия ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) во всем теле за первый год после аварии оказалась ниже 0,1 мЗв у 90% обследованных. Измерения всего тела детей 6–15 лет за второй год после аварии подтвердили значения эффективной дозы внутреннего облучения меньше 0,1 мЗв, в то же время оценки эффективной дозы внешнего облучения с помощью индивидуальных дозиметров у тех же детей определили медиану распределения 0,66 мЗв с максимальной оценкой эффективной дозы 3,45 мЗв. Результаты проведенных измерений не дают оснований ожидать в будущем повышения заболеваемости раком щитовидной железы и другими радиогенными заболеваниями среди жителей Фукусимы. Превентивная эвакуация населения до начала радиоактивных выбросов в атмосферу, пребывание в закрытых помещениях, строгий радиационный контроль продуктов существенно снизили ожидаемые дозы внутреннего облучения жителей. В прогнозах радиологических последствий аварии необходимо учитывать реально выполненные меры защиты населения, местные особенности уклада жизни и проживания.

Ключевые слова: авария на АЭС Фукусима–Дайичи, радиологические последствия, население, дозы внутреннего облучения, щитовидная железа, радионуклиды йода и цезия.

Введение

11 марта 2011 г. землетрясение и мощнейшее цунами обрушилось на тихоокеанское побережье Японии. Они вызвали повреждение трех блоков прибрежной атомной электростанции Фукусима Дайичи (Fukushima Daiichi) (ФДАЭС), что привело к масштабной радиационной аварии с выбросом в окружающую среду радиоактивных веществ в количестве, сравнимом с выбросами при Чернобыльской аварии.

Уже в 2011 г. появились первые результаты мониторинга радиационной обстановки на территории Японии, на основе чего появились первые обобщения радиологических последствий с «предварительными» оценками доз облучения японского населения и прогнозом воз-

можных медицинских последствий [1–4]. В 2012 г. была также издана монография Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены им. профессора П.В. Рамзаева, где, в числе многих тем, были представлены оценки доз внешнего и внутреннего аварийного облучения японского населения, рассчитанные на основе моделей, разработанных по материалам Чернобыльской аварии, и данных мониторинга радиационной обстановки на территории Японии, представленных в Интернете и открытой печати в 2011 г. [5].

Сравнение двух крупнейших аварий в атомной энергетике по масштабам радиоактивных выбросов, по уровням повышения гамма-фона, по количеству эвакуированных жителей вызвала у населения ожидание таких же меди-

Звонова Ирина Александровна

Санкт-Петербургский научно-исследовательский институт радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева.

Адрес для переписки: 197101, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ir_zv@bk.ru

цинских последствий, как после Чернобыльской аварии [6–9] или как после атомных бомбардировок в 1945 г. в Японии [10, 11]. В первую очередь, люди опасались возрастания заболеваний раком щитовидной железы (ЩЖ) среди детей вследствие внутреннего облучения радиоизотопами йода, что было признано единственным достоверным результатом облучения населения вследствие аварии на Чернобыльской АЭС.

В 20-х числах марта 2011 г. на сайте Комиссии по ядерной безопасности Японии (Nuclear Safety Commission of Japan) был размещен прогноз развития радиационной обстановки и радиологических последствий аварии, сделанный с помощью «Системы прогнозирования информации об аварийных дозах в окружающей среде (SPEEDI)». Согласно SPEEDI, эквивалентные дозы в ЩЖ ребёнка 1 года в зоне эвакуации и на северо-западном радиоактивном следе оценивались величиной от 100 до 1000 мЗв [12]. Сценарий расчета доз предполагал равномерное ингаляционное поступление радионуклидов при нахождении ребёнка 24 ч в сутки на открытом воздухе с 12 по 23 марта (рис. 1). Карта изолиний доз в ЩЖ неоднократно цитировалась в научных публикациях, являясь основанием для проведения подробных исследований и измерений жителей [13–15].

Опубликованная информация вызвала сильное беспокойство среди населения, на которое местные власти отреагировали проведением скрининговых измерений содержания ^{131}I в ЩЖ детей префектуры Фукусима. С 24 по 30 марта 2011 г. было сделано 1149 измерений детей в возрасте от 0 до 15 лет из нескольких населенных пунктов за пределами 30-километровой зоны вокруг АЭС [13, 14], но находящихся на следе радиоактивных выпадений. Кроме того, ещё в двух работах были опубликованы результаты нескольких десятков измерений ЩЖ эвакуированных жителей префектуры Фукусима, выполненные на других приборах, другими методами [15, 16]. Суммарно было измерено содержание ^{131}I в ЩЖ около 1300 жителей, преимущественно детей. На этом скрининг ^{131}I в ЩЖ жителей был остановлен администрацией префектуры. Все оценки доз в ЩЖ детей по измерениям, выполненным разными методами, показали значительно меньшие значения, чем в прогнозе SPEEDI. После Чернобыля в трех республиках бывшего СССР было проведено около 400 тысяч измерений ЩЖ у жителей загрязненных территорий.

Несмотря на успокаивающие результаты скрининга ЩЖ, беспокойство населения относительно последствий облучения детей не уменьшилось. Правительство Японии совместно с администрацией Фукусимы организовало долгосрочную программу скрининга состояния здоровья облученных жителей, в рамках которой уже в 2011 г. начались ультразвуковые исследования ЩЖ детей и подростков, проживавших в зонах радиоактивных выпадений в префектуре Фукусима. Ставилась задача провести обследование всех 360 тысяч детей и подростков до 18 лет на момент аварии в префектуре Фукусима, чтобы иметь «золотой стандарт» для последующих наблюдений за заболеваемостью раком ЩЖ лиц, которые были детьми в период аварии. За первый период с 2011 по 2013 г. было обследовано 81,7% общего количества детей [17]. Ультразвуковые исследования и биопсия подозрительных узловых образований выявили 116

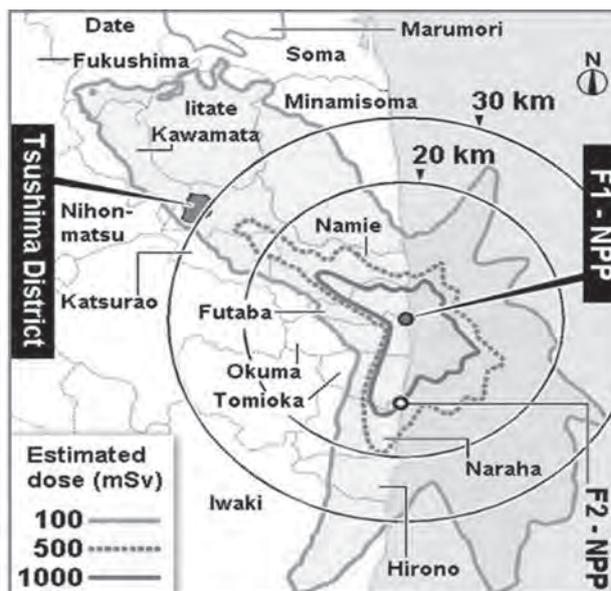


Рис. 1. Прогноз SPEEDI (Система прогнозирования аварийной дозы в окружающей среде) эквивалентных доз в ЩЖ детей в возрасте 1 года на территориях вокруг ФДАЭС [13–15]
[Fig. 1. “SPEEDI” (System for Prediction of Environmental Emergency Dose) prognosis of equivalent dose in thyroids of one-year children in the areas around FDNPP [13–15]]

доброкачественных и злокачественных новообразований среди детского населения префектуры Фукусима. Население восприняло результаты исследования как подтверждение радиационного воздействия аварии и требовало проведения тщательного расследования и оценок доз облучения детей и взрослых, полученных в результате аварии.

Опасения жителей вызывало также внутреннее облучение радионуклидами ^{134}Cs и ^{137}Cs , так как в результате Чернобыльской аварии, начиная со второго года, примерно 40% эффективной дозы населения формировалось за счет поступления в организм радионуклидов цезия [18]. Хроническое внутреннее облучение дополнительно к внешнему облучению в местах проживания является фактором добавочного аварийного облучения, которое необходимо было изучить и оценить.

В настоящей работе представлен анализ результатов дозиметрии внутреннего облучения жителей префектуры Фукусима, проживавших в наиболее загрязненных районах префектуры, в первую очередь за счёт облучения ЩЖ радиоизотопами йода, а также из-за хронического поступления долгоживущих радиоизотопов цезия в организм жителей.

Радиационная опасность биологически доступных продуктов распада ядерного топлива

Во время аварии ядерного реактора наиболее опасными для человека являются радионуклиды, которые при поступлении в организм включаются в обменные процессы, накапливаются в определенных органах и тканях, облучая их при радиоактивном распаде радионуклидов. Такими биологически доступными и наиболее опасными в атмосферных выбросах поврежденного реактора являются радиоизотопы йода и цезия. Согласно обобщениям НКДАР ООН 2013 г. [3], в атмосферу при аварии на

ФДАЭС было выброшено 124 ПБк (10^{15}) ^{131}I ; 10 ПБк ^{133}I ; 29 ПБк ^{132}I (в равновесии с ^{132}Te); 9 ПБк ^{137}Cs ; 9,0 ПБк ^{134}Cs [3]. Наиболее опасными для человека являются радионуклиды: ^{131}I с периодом полураспада $T_{1/2} = 8,04$ суток из-за огромных количеств активности, нарабатанных во время работы реактора и их биологической доступности, а также ^{137}Cs – $T_{1/2} = 30$ лет и ^{134}Cs – $T_{1/2} = 2,4$ года, которые также в больших количествах накапливаются в реакторах, мигрируют по биологическим цепочкам: атмосфера – выпадения – растительность – молочный скот – молоко и мясо животных – человек.

Радиоизотопы йода и цезия одинаково хорошо проникают в организм человека с вдыхаемым воздухом и с пищевыми продуктами, всасываются в кровь, где пути их расходятся: 15–40% радиоизотопов йода (в зависимости от содержания стабильного йода в рационе [19, 20]) захватываются щитовидной железой, где они включаются в белковые молекулы тиреоглобулинов, откуда медленно секретируются в кровоток, обеспечивая потребность организма в тиреоидных гормонах. Остальное количество радиоизотопов йода выводится из организма, в основном, через почки. Скорость секреции йода из ЩЖ определяется биологическим периодом полувыведения T_6 , который для новорожденных определяется как 11 суток, увеличиваясь с возрастом до 80–90 суток у взрослых людей [21]. Эффективный период уменьшения радиоактивного йода в ЩЖ, $T_{эф}$, зависит от биологического выведения и от радиоактивного распада:

$$T_{эф} = \frac{T_6 \cdot T_{1/2}}{T_6 + T_{1/2}}, \quad (1)$$

где: T_6 – биологический период полувыведения;

$T_{1/2}$ – период полураспада радиоизотопа.

Все параметры должны использоваться в одинаковых единицах измерения.

Цезий – это элемент 1-й группы, в организме человека он ведет себя аналогично калию: из кровотока радионуклиды цезия распространяются по всему организму, с несколько большей концентрацией накапливаясь в мышцах. У взрослых старше 17 лет 10% поступившего радионуклида ^{137}Cs быстро выводится из организма с биологическим полупериодом 2 сут, остальные 90% радионуклидов выводятся с полупериодом 110 сут. У детей в возрасте до 1 года выведение происходит с одной скоростью 13–16 сут, у более старших детей выведение цезия из организма происходит с двумя скоростями: например, у детей 5 лет вклады и полупериоды выведения оценены как 45% со скоростью 9,1 сут; 55% – 30 сут, у более старших детей пропорции и скорости выведения сдвигаются в сторону значений для взрослых [21].

Стоит напомнить, что радионуклиды йода концентрируются в ЩЖ, масса которой у взрослых людей около 20 г, а у детей ещё меньше (у новорожденных – 1,3 г), а цезий распределяется по всему телу, из-за этого концентрация радионуклидов, а следовательно, и доза (энергия распада радионуклидов, выделенная в единице массы органа) в ЩЖ оказывается на порядки выше в случае поступления в организм одинаковых количеств радионуклидов. Из такого краткого рассмотрения свойств аварийных радионуклидов становится ясно, почему наибольшее беспокойство вызывает облучение ЩЖ радионуклидами йода.

Мониторинг радиоизотопов йода в щитовидной железе

Внутреннее облучение жителей загрязненных радиоактивными выпадениями территорий происходило в результате ингаляционного поступления во время прохождения радиоактивного облака, потребления загрязненных продуктов питания и воды. Оценка дозы в ЩЖ по результатам измерений содержания ^{131}I в ЩЖ является наиболее достоверным способом оценки дозы в ЩЖ. Прямые измерения содержания ^{131}I в ЩЖ обобщают в себе все особенности поступления радиоизотопов йода в организм конкретного человека, отражая экологические аспекты загрязнения окружающей среды (воздуха, воды и пищевых продуктов) и принятые меры защиты (изоляция в закрытом помещении, эвакуация, отказ от потребления загрязненных продуктов и пр). Однако для достоверной оценки дозы необходимо корректно восстановить динамику поступления радиоизотопов йода в организм человека до момента измерения, что является весьма непростой задачей.

С 24 по 30 марта было выполнено 1149 измерений детей в возрасте от 0 до 15 лет из муниципалитетов Кавамата (Kawamata), Иваки (Iwaki) и Иитате (Iitate), которые расположены за пределами 30-километровой зоны вокруг АЭС, где не было обязательной эвакуации в первые дни после аварии, но где, согласно расчётам SPEEDI, дозы в ЩЖ детей 1 года могли превышать 100 мЗв [13, 14]. После отбраковки измерений, выполненных в условиях повышенного фона и с ошибками записей, в работе осталось 1080 измерений.

Измерения проводились с использованием радиометра на основе сцинтилляционного кристалла NaI(Tl) $\varnothing 2,54 \times 2,54$ см (TCS-16, TCS-171, TCS-172, Hitachi-Aloka Medical, Ltd., Japan) [13, 14]. Измерения мощности дозы проводились в положении детектора перпендикулярно, вплотную к передней поверхности шеи обследуемого, в той же геометрии, как выполнялись измерения в Российской Федерации аналогичным радиометром СРП-68-01 после аварии на ЧАЭС. В качестве фона измерялась мощность дозы при установке детектора к середине плеча того же человека. Для калибровки измерений ^{131}I в ЩЖ использовались фантомы шеи и ЩЖ промышленного производства, в фантом ЩЖ заливался стандартный раствор ^{133}Ba (период полураспада 10,51 лет), имитирующий излучение ^{131}I , в объеме, соответствующем массе ЩЖ у детей разного возраста и взрослых [13]. Распределение измерений в виде «чистой» мощности дозы, измеренной над ЩЖ с вычитанием фона, показано на рисунке 2.

55% измерений оказалось ниже фона, а максимальное измеренное значение над фоном у ребенка одного года было около 0,1 мкЗв/ч, что соответствовало дозе в ЩЖ 43 мЗв, рассчитанной по сценарию SPEEDI.

Поскольку выполненные 1080 измерений ^{131}I в ЩЖ являются единственным массивом прямых измерений, которые могут быть использованы для верификации других модельных методов оценки доз облучения ЩЖ радиоизотопами йода, в последующие годы большие усилия были приложены к уточнению методики расчета активности и дозы в ЩЖ по результатам измерения мощности дозы над ЩЖ [22, 23].

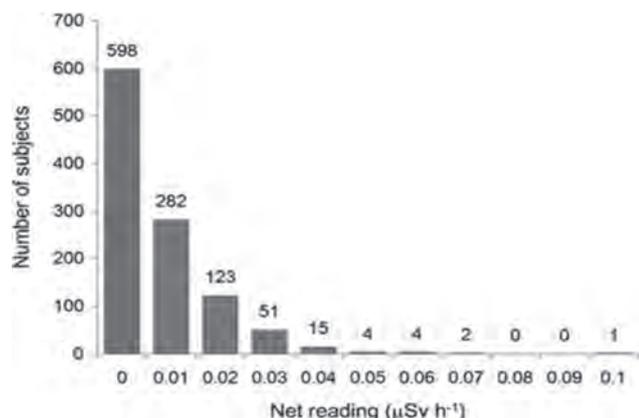


Рис. 2. Распределение измерений 1080 детей по результатам скрининга жителей, пострадавших от аварии на ФДАЭС [14, 22]

[Fig. 2. Results of measuring 1080 persons by the thyroid screening surveys, reported by the medical group of the Support Team for Residents affected by Nuclear Incidents [14, 22]

Работы продолжились в направлении уточнения возрастных коэффициентов калибровки, верификации путей поступления радионуклидов в организм человека с вдыхаемым воздухом, пищей и водой, а также в направлении поиска корреляций выпадений ¹³¹I с другими долгоживущими радионуклидами и разработки методов экологического моделирования [22, 23].

В результате выполненных работ были уточнены детали методики проведенных измерений, более точно определены коэффициенты пересчета измеренной мощности дозы в активность ¹³¹I в ЩЖ, изменена модель поступления радиойода в организм: вместо хронического однородного ингаляционного поступления с 12 марта до дня измерений была принята модель однократного ингаляционного поступления 15 апреля – дня максимальных

выбросов в атмосферу. Также была опробована модель пищевого поступления радионуклидов в организм, обоснованная тем, что в продуктах местного производства и водопроводной воде в ряде населенных пунктов префектуры Фукусима измерения в марте 2011 г. показали наличие ¹³¹I [23]. Запрет на потребление загрязненных продуктов был введен в 20-х числах марта 2011 г., что предполагает, что часть жителей могла использовать в пищу загрязненные продукты и воду. Исходя из этих измерений, для расчёта дозы в ЩЖ по результатам измерений использовался сценарий равномерного поступления ¹³¹I с продуктами и водой, начиная с 16 мая до даты измерения. Предполагалось, что реальная доза находится в интервале между двумя расчётными значениями. В среднем дозы, рассчитанные по сценарию пищевого поступления, составили 0,4 часть от расчета по сценарию однократной ингаляции.

Полученные методические и модельные поправки не внесли существенных изменений в оценки дозы в ЩЖ у детей префектуры Фукусима. Оценки доз несколько возросли по сравнению с первыми значениями 2011 г. [13], например, максимальная оценка дозы изменилась с 43 на 65 мЗв [23], но осталась главная проблема, которая состояла в том, что счетная статистика проведенных измерений была очень низкая по сравнению с фоном. Более половины результатов измерений ЩЖ оказалась на уровне и ниже измерений фона (см. рис. 2), из-за чего оценка среднего значения и медианы распределения содержания ¹³¹I в ЩЖ или «измеренных» доз часто попадали в диапазон нулевых измерений, поэтому в качестве основных статистических параметров использовались оценки не среднего значения и медианы, а верхний квартиль, 90% и 95% перцентили распределений [22, 23]. В таблице 1 показаны статистические параметры распределения эквивалентных доз в ЩЖ детей от 0 до 15 лет в некоторых муниципалитетах префектуры Фукусимы, рассчитанные по измерениям в марте 2011 г. по сценарию однократного ингаляционного поступления.

Таблица 1

Статистические параметры распределений эквивалентных доз в ЩЖ детей в возрасте от 0 до 15 лет вследствие поступления ¹³¹I (мЗв), рассчитанные по сценарию однократного ингаляционного поступления [23]

[Table 1

Fundamental statistics of thyroid equivalent doses (mSv) due to ¹³¹I intake for children aged from 0 to 15 years in some municipalities of the Fukushima prefecture estimated on scenario 1- single inhalation intake [23]

Населенный пункт [Locality]	Число измерений [Number of measurements]	Медиана, мЗв [Median, mSv]	Верхний квартиль, мЗв [75% percentile, mSv]	Максимум, мЗв [Maximum, mSv]
Кавамата [Kawamata Town]	593	0,0	3,7	31,2
Иваки [Iwaki City]	123	2,8	8,8	47,5
Иитате [Iitate Village]	291	3,7	7,5	61,1
Минамисома [Minamisoma City]	31	2,8	3,3	26,3
Фукусима [Fukushima City]	22	0,0	0,0	7,3
Остальные [Others]	20	1,4	13,6	64,6

Измерения содержания ^{131}I в щитовидной железе жителей Фукусимы другими приборами и методами

В территориальном округе города Намие, район Цушима (Namie Town, Tsushima District), где, согласно прогнозу SPEEDI, ожидалась доза в ЩЖ детей 1 года от 100 до 500 мЗв (см. рис. 1), 12–16 апреля 2011 г. были измерены 62 человека, из которых 17 человек были местными жителями, а 45 человек – эвакуированными из прибрежных территорий к северу от ФДАЭС [15]. Измерения проведены на сцинтилляционном спектрометре с кристаллом NaI(Tl) $\varnothing 75 \times 75$ мм, с измерениями скорости счёта над ЩЖ и фона в месте измерения человека в каналах пика излучения ^{131}I – 364 кэВ. Калибровочный коэффициент определен экспериментально с использованием фантома шеи и трех фантомов ЩЖ, объемом 4, 12 и 16 мл, которые наполняли раствором ^{131}I . У 46 из 62 измеренных людей были обнаружены детектируемые количества ^{131}I в ЩЖ, с максимумом 1,5 кБк. Эквивалентная доза в ЩЖ по модели однократного ингаляционного поступления и результатам измерений оценена в пределах от 0 до 33 мЗв.

В измеренной группе было всего 5 детей в возрасте до 10 лет. Чтобы оценить максимально возможные дозы в ЩЖ детей, рассчитывали максимальную концентрацию ^{131}I в воздухе по наибольшей измеренной активности в ЩЖ взрослых – 1,5 кБк, предполагая, что радиоактивное облако проходило через населенный пункт в течение 4 ч и человек всё это время находился на улице. Рассчитанная концентрация ^{131}I в воздухе использовалась для расчета ингаляционного поступления детям с учетом возрастных различий объема дыхания, в предположении, что ребёнок находился на улице всё время прохождения облака [15]. Даже при таком консервативном способе оценки уровня облучения ЩЖ максимальные дозы у детей 1 года и 5 лет были оценены в 63 мЗв, то есть существенно меньше прогноза SPEEDI.

В городе Нагасаки, начиная с 16 мая, проводились измерения людей, находившихся в префектуре Фукусима после 11 мая и выехавших не позднее 10.04.2011 г., на стационарном счётчике излучения человека (СИЧ) медицинского факультета университета Нагасаки, размещенном в низкофоновой защищённой камере [16]. Из 173 человек примерно у трети людей были зарегистрированы активности ^{131}I , ^{134}Cs и ^{137}Cs , превышающие минимально детектируемую активность (МДА) – 30 Бк для ^{131}I , 33 Бк для радионуклидов цезия. Измерения сопровождалась регистрацией маршрута и дат передвижения обследуемых по территории Фукусимы. Это позволило выявить, что в группе лиц, находившихся в Фукусиме в течение первой недели после аварии, было наибольшее число измерений выше МДА и наибольшие измеренные активности. Суммарное поступление радионуклидов, оцененное по результатам измерений и по модели однократного ингаляционного поступления, составляло: 1–140 кБк ^{131}I ; для ^{134}Cs и ^{137}Cs 0,16–16 кБк для каждого изотопа. При более позднем нахождении на территории Фукусимы суммарное поступление радионуклидов оценивалось в 15–20 раз ниже. Эквивалентные дозы в ЩЖ оценены ниже 20 мЗв, а эффективные дозы – ниже 1 мЗв у всех измеренных лиц.

В работе [16] также представлен спектр излучения человека, находившегося в 50 км к югу от ФДАЭС до вы-

езда 15 мая и измеренного на СИЧ 16 мая. Спектр демонстрирует пики энергий многих радионуклидов, в том числе ^{132}Te , ^{131}I , ^{132}I , ^{134}Cs и ^{137}Cs . У людей, выехавших из района радиоактивных выпадений раньше 15 мая, короткоживущие радионуклиды ^{132}Te ($T_{1/2}=3,2$ сут) и ^{132}I ($T_{1/2}=2,3$ ч) не обнаружены, а измеренные активности ^{131}I , ^{134}Cs , ^{137}Cs и оценки доз были существенно ниже. Эти измерения подтверждают, что основным источником внутреннего загрязнения жителей были радиоактивные выбросы 15 мая, последовавшие в результате взрыва на втором блоке ФДАЭС.

Все измерения ^{131}I , выполненные в марте – апреле 2011 г., свидетельствуют, что радиационное воздействие на жителей радиоактивно загрязненных территорий было намного меньше, чем предсказывал прогноз SPEEDI. Однако эти прямые измерения не сняли общей тревожности населения по поводу облучения ЩЖ детей. Одним из вопросов безопасности была оценка вклада короткоживущих изотопов йода в облучение ЩЖ.

Вклад короткоживущих изотопов йода в поглощенную дозу в щитовидной железе жителей Фукусимы

В работах [24, 25] оценивается возможный максимальный вклад короткоживущих изотопов йода в облучение ЩЖ жителей Фукусимы с использованием опыта оценок дозы в ЩЖ у населения, пострадавшего от радиоактивных выбросов Чернобыльской аварии [26, 27].

В работе [26] по результатам прямых спектрометрических измерений ЩЖ 65 жителей города Припять, эвакуированных через 1,5 суток после аварии на ЧАЭС, было показано, что радиологическое значение при ингаляционном поступлении смеси радиоизотопов йода имеют изотопы ^{133}I ($T_{1/2}=20,8$ ч) и ^{132}I ($T_{1/2}=2,3$ ч). Причём ^{132}I вносит свой вклад в облучение ЩЖ как продукт распада ^{132}Te ($T_{1/2}=3,20$ сут), поступившего и отложившегося в органах дыхания, где он распадается до ^{132}I , который через кровоток быстро доходит до ЩЖ, включается в биологические структуры и, распадаясь, облучает ткань ЩЖ. Доза от ^{132}I , который находится в воздухе в равновесии с ^{132}Te , при ингаляционном поступлении в организм человека создает дозу более чем на порядок меньшую, чем от ^{132}Te , отложившегося в легких [29].

Расчет вклада короткоживущих йодов в эквивалентную дозу в ЩЖ основан на двух положениях. Во-первых, отношение $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ во всех трех реакторах на момент их отключения сразу после цунами (14:46, 11 марта 2011 г.) было 2,1 [24]. Первый выброс радиоактивности произошел 12 мая, однако большая часть выпадений произошла над океаном, лишь немного затронув сушу к северу от ФДАЭС, где жители были уже эвакуированы. Основной выброс произошел от парового взрыва второго блока утром 15.05.2011 г. За время, прошедшее после остановки реакторов, большинство короткоживущих нуклидов в продуктах распада ядерного топлива распались, в том числе количество ^{133}I существенно уменьшилось, отношение $^{133}\text{I}/^{131}\text{I}$ на 15.03.2011 г. оценивалось как 0,12 [25]. Тем не менее, концентрации ^{133}I в воздухе было достаточно, чтобы этот изотоп регистрировался в теле человека, выехавшего из района аварии 15 мая вечером и измеренного на низкофоном СИЧ 16 мая [16].

Вторым исходным положением для расчета была оценка соотношения ^{132}Te и ^{131}I в воздухе. Оно оценивалось по отношению радионуклидов в пробах почвы и растений, которые регистрировались во время первых радиологических обследований территории 15–19 марта 2011 г. [28]. В докладе НКДАР ООН [3] отношение ^{132}Te к ^{131}I оценено на 15 мая как 0,7 для территорий Фукусимы и соседних префектур, за исключением небольшой прибрежной территории южного следа, где это отношение оценивается как 0,8, такие же соотношения были использованы в работе [29] для расчета дозы в ЩЖ от короткоживущих изотопов йода.

Дозы в железе рассчитывались для трех возрастных групп – 1 год, 10 лет и взрослые. Для основного выброса радиоактивности 15 мая вклад короткоживущих радионуклидов оценивается в пределах 15% от дозы, сформированной ^{131}I . При этом доза от ^{132}I (продукта распада ^{132}Te в теле человека) примерно в 3 раза превосходит дозу от ^{131}I [24, 25]. Если ориентироваться на первый выброс 12 мая, то вклад короткоживущих йодов может достигать 30–40% по сравнению с ^{131}I . В этом случае вклад ^{131}I примерно в два раза выше, чем от ^{132}I – дочернего продукта ^{132}Te в теле человека [24]. Расчетные оценки в предположении начала выбросов 12 мая хорошо согласуются с результатами оценки вкладов короткоживущих изотопов йода в дозу облучения ЩЖ жителей Припяти, эвакуированных через 1,5 суток после аварии на ЧАЭС, для которых вклад ^{131}I составил около 30% дозы от ^{131}I , а ^{132}I от ^{132}Te в лёгких – 13% [26].

Эквивалентные дозы в ЩЖ по данным экологического мониторинга и по измерениям содержания ^{131}I в щитовидной железе жителей Фукусимы

Оценки доз в ЩЖ, выполненные по результатам измерений содержания ^{131}I в ЩЖ жителей, являются наиболее точным методом оценки радиационного воздействия. Они служат набором данных, по которым верифицируют другие методики оценок доз. Сравним оценки эквивалентных доз в ЩЖ, выполненные по результатам измерений с расчетами, выполненными нами в первый год после аварии. В работе [5] 2012 г. сделан вывод: «В префектуре Фукусима в зоне плановой эвакуации среднее значение эквивалентной дозы в щитовидной железе в отдельных муниципальных образованиях и НП (за исключением Намие) изменялось в пределах 20–110 мЗв в зависимости от возраста (нижнее значение соответствует взрослому населению, а верхнее – детям 1 года). В муниципальном образовании Намие диапазон средних доз у указанных возрастных групп населения оценивался как 75–260 мЗв.»

Что касается внутреннего облучения радиоизотопом ^{131}I , то, согласно принятой в 2011 г. модели расчета, основной вклад в дозу ЩЖ получен за счет поступления радионуклидов йода с продуктами питания и водой, в меньшей степени за счет ингаляции, поскольку принималось, что северо-западный след радиоактивного загрязнения был образован в результате влажных выпадений и использовались базы данных радиационного контроля местных продуктов из продуктовой сети Фукусимы. Примененные меры защиты не учитывались в расчетах. В таблице 2 представлены оценки эквивалентных доз внутреннего

облучения ^{131}I для детей 1 года и 10 лет, рассчитанные по экологическим данным, для тех населенных пунктов, в которых были проведены измерения в марте 2011 г. [5].

Таблица 2

Эквивалентные дозы облучения от ^{131}I в ЩЖ детей в некоторых населенных пунктах префектуры Фукусимы, рассчитанные по данным экологического мониторинга, доступным в 2011 г. [5], и по результатам измерений ^{131}I в ЩЖ детей [23], мЗв

[Table 2

Equivalent doses from ^{131}I in thyroid of children in some localities of Fukushima Prefecture, calculated basing on environmental monitoring data available in 2011 [5] and on the results of ^{131}I measurements in thyroid of children [23], mSv

Населенный пункт [Locality]	Среднее, по экологическим данным [5] [Mean, on environmental monitoring [5]]		Максимальная доза по измерениям [23], [Maximum dose on measurements [23]]
	1 год [1 year]	10 лет [10 years]	
Кавамата [Kawamata Town]	63	30	31,2
Иваки [Iwaki City]	36	17	47,5
Иитате [Iitate Village]	98	51	61,1
Минамисома [Minamisoma City]	19	10,5	26,3
Фукусима [Fukushima City]	15	8	7,3
Остальные [Others]	17 – 41	9 – 21	64,6

Расчеты 2011 г. давали консервативные оценки возможных средних доз в ЩЖ без учета дат эвакуации и применения других защитных мер, однако они использовали реальные измерения и закономерности изменения активности в воздухе, в продуктах питания, сведения о рационах питания японского населения и другую доступную информацию, что позволило дать правдоподобные оценки доз. Полученные в 2011 г. консервативные оценки доз [5] не входят в противоречие с максимальными значениями довольно ограниченного числа «измеренных» доз, что говорит о правильном подходе к использованию результатов радиозоологического мониторинга и сведений социального характера для оценки доз внутреннего облучения населения в случае масштабной аварии ядерного реактора с выбросом радиоактивных веществ в атмосферу.

Внутреннее облучение радиоизотопами цезия

Массовые измерения жителей Фукусимы, эвакуированных из 20-километровой зоны и из зоны отсроченной плановой эвакуации (северо-западный радиоактивный след), на содержание радионуклидов цезия (^{134}Cs и ^{137}Cs) во всем теле начались в июле 2011 г. Использовались 4 счетчика измерений человека (СИЧ), при времени измерения 2–3 минуты МДА составила для ^{134}Cs 300–340 Бк, для ^{137}Cs 300–370 Бк [29].

Всего с 11.07.2011 г. по конец января 2012 г. было выполнено 9927 измерений жителей разного возраста старше 4 лет из 11 муниципалитетов Фукусимы. Оказалось, что 80% измерений были ниже МДА [29, 30]. Наибольшие количества ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) составили 14 кБк среди взрослых и 2,7 кБк среди детей младше 8 лет [29, 30].

Ожидаемую эффективную дозу (ОЭД) от внутреннего облучения радиоизотопами цезия оценивали по модели однократного ингаляционного поступления радионуклидов от первого выброса 12 марта. Даже по такой заведомо консервативной модели у 99,8% измеренных жителей ОЭД за первый год после аварии оценена меньше 1 мЗв. Всего у 22 человек оценка дозы превышала 1 мЗв, из них 16 человек – дети меньше 8 лет, 5 – в возрасте 8–12 лет и лишь один взрослый, у которого обнаружена наибольшая ОЭД 3 мЗв. При сравнении высоких измерений у детей с измерениями их родителей выявилось полное отсутствие корреляции: дозы родителей не превышали 0,2 мЗв, а дозы у детей оценены от 0,15 до 1,75 мЗв [29]. Эти результаты говорят о том, что дозы у детей не могут быть объяснены пищевым поступлением радионуклидов при семейном питании. Дополнительные исследования показали, что большая часть высокой счётности СИЧ обусловлена случайным загрязнением внутренней одежды, хотя верхнюю одежду обследуемые снимали перед измерением [29]. Только с января 2012 г. измерения жителей стали проводить в сменной чистой одежде, что гарантировало отсутствие поверхностного загрязнения одежды.

95% перцентиль распределений ОЭД в двух возрастных группах (13–17 лет и взрослые) составил 0,10 мЗв и 0,13, экстраполированные медианы распределений – 0,02 и 0,025 мЗв соответственно. По этим измерениям видно, что внутреннее облучение жителей Фукусимы было весьма небольшим, у абсолютного большинства не превысило за первый год после аварии предела дозы для населения 1 мЗв от поступления в организм радионуклидов йода и цезия.

Во второй год после аварии с 01.04.2012 г. по 31.03.2013 г. проводилось исследование доз внешнего и внутреннего облучения у школьников младшей и средней школы города Минамисома (Minamisoma City), расположенного в 14–38 км к северу от ФДАЭС [31]. Поверхностное загрязнение цезием-137 территории города варьировало от 10 кБк/м² до 3 МБк/м².

Содержание радионуклидов цезия у 987 школьников детей измеряли на стационарных СИЧ, установленных в двух больницах города. МДА для измерения детей составляла 220 Бк для ^{134}Cs и 250 Бк для ^{137}Cs для обоих аппаратов. При оценке дозы предполагалось, что измеренные активности являются равновесными значениями для всего года.

У тех же школьников определяли дозы внешнего облучения, для чего детям выдавали индивидуальные дозиметры-бейджики (Glass Badge: GD-450, Chiyoda Technol Corp.) для ношения в течение 3 месяцев трижды за год скрининговой программы в периоды: 01.06–31.08.2012; 01.09–30.11.2012; 01.12.2012–28.02.2013. Для определения техногенной эффективной дозы внешнего облучения из результатов считывания дозиметров вычиталась величина естественного фона 0,54 мЗв/год, которая была определена до аварии с такими же дозиметрами в соседней префектуре Ибараки. Эффективные дозы за три пе-

риода ношения складывались, и рассчитывалась средняя доза за день, годовая доза вычислялась умножением на 365.

Из 987 участников были исключены те лица, которые проживали за пределами Минамисома сити, анализировались результаты 881 детей от 6 до 15 лет, у которых были проведены измерения внешнего облучения и внутреннего содержания ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) в течение второго года после аварии на ФДАЭС. Из всех участников только у 3 человек зарегистрировано превышение МДА для ^{134}Cs и ^{137}Cs : (245 и 566), (364 и 452), (401 и 615) Бк в теле, что соответствовало дозам: 0,040, 0,069 и 0,085 мЗв/год. Для всех остальных участников проекта с активностью в теле меньше МДА максимально возможную дозу оценили из предположения постоянного ежедневного поступления радионуклидов и для содержания в теле на уровне МДА двух изотопов цезия. Дозы внутреннего облучения за второй год после аварии не превышают 0,066, 0,04 и 0,025 мЗв соответственно для детей 6–7, 8–12 и 13–15 лет. Для тех же детей доза внешнего облучения, согласно проведенным измерениям, варьировала от 0 до 3,45 мЗв/год со значением медианы 0,66 мЗв/год. Дополнительная эффективная доза за второй год после аварии на АЭС у 78% школьников была ниже 1 мЗв, что говорит о минимальном риске радиационно обусловленных эффектов для здоровья детей [31].

Медиана суммарной эффективной дозы составила 0,70 мЗв с разбросом индивидуальных значений от 0,025 до 3,49 мЗв/год. Среднее соотношение внешней и внутренней дозы у детей оценивается как 0,66 : 0,04, дозы внешнего облучения вносили более 90% в суммарную дозу [31]. Эти измерения показывают, что хроническое облучение жителей, проживающих после аварии на ФДАЭС на загрязненной территории, формируется в основном за счет внешнего излучения. В мае – июне 2013 г. в Минимасома были измерены на СИЧ 3255 школьников младшей и средней школы, это 98% от всех школьников данной возрастной группы в городе. Не было выявлено ни одного человека с измеримым содержанием ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) в организме [32], что наглядно демонстрирует отсутствие риска внутреннего облучения для жителей Фукусимы. Принятые меры жёсткого контроля и отбраковки местных продуктов с концентрацией ^{137}Cs выше 100 Бк/кг привели к практически полному исключению загрязненных продуктов из рациона питания жителей Фукусимы.

Обсуждение

Проведенный анализ работ по оценке доз внутреннего облучения жителей префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима Дайичи, вызванной разрушительным землетрясением и цунами 11 марта 2011 г., показал, что поступление радионуклидов в организм жителей было минимальным. Результаты прямых измерений ^{131}I в ЩЖ и радионуклидов цезия в организме жителей префектуры Фукусима демонстрируют, что поступление радионуклидов в организм и внутреннее облучение после аварии на ФДАЭС было значительно меньше, чем в Чернобыле. Принятые вовремя правительственные решения о мерах защиты населения – экстренная эвакуация населения из 10-, затем 20-километровой зоны до основных выбросов радиоактивности в атмосферу, установленные зоны готовности к эвакуации и объявление режима

укрытия в жилищах в 20–30-километровой зоне, а также строгое выполнение мер защиты населения привели к тому, что ингаляционное поступление радионуклидов во время прохождения радиоактивного облака от основного выброса 15 мая для большинства жителей было снижено или предотвращено полностью. Нахождение в закрытом помещении особенно помогло снизить ингаляционную дозу у детей, поэтому вполне ожидаемо, что абсолютное большинство детей не имели измеримого накопления радиоизотопов йода в ЩЖ и радионуклидов цезия в организме. Значения медианы распределений индивидуальных оценок доз в ЩЖ в отдельных населенных пунктах не удалось достоверно оценить, т.к. они попадали в область измерений «ниже фона», а значения верхнего квартиля оценок доз в ЩЖ для отдельных муниципалитетов определены в пределах 3–9 мЗв; максимально возможные индивидуальные оценки доз, выполненные по консервативному сценарию однократного ингаляционного поступления, оценены в пределах 50–65 мЗв. Такие оценки поглощенных доз в ЩЖ не дают оснований ожидать в будущем повышения заболеваемости раком ЩЖ среди жителей, переживших аварию на ФДАЭС в детском и подростковом возрасте.

Относительно пищевого поступления радионуклидов следует сделать несколько замечаний. Некоторые продукты местного производства, а также вода в некоторых муниципалитетах были загрязнены радионуклидами, что было зарегистрировано радиационным контролем. Критерии отбраковки загрязненных продуктов и воды при уровне выше 100 Бк/кг были введены 21.05.2011 г., после чего их поступление в торговую сеть было жестко пресечено. Есть некоторая вероятность, что в течение недели после основного выброса радионуклидов малая часть жителей могла использовать в пищу загрязненные продукты. Местные органы власти и комиссия Национального института ядерных исследований (NIRS) по ядерному реагированию на чрезвычайные ситуации ставят задачу провести опрос всех эвакуированных и оставшихся жить на загрязненной территории жителей и оценить индивидуализированные дозы внешнего и внутреннего облучения в соответствии с их поведением во время аварии, так как малое число прямых измерений ^{131}I в ЩЖ не гарантирует отсутствия более высоких доз в ЩЖ у некоторых жителей.

Опасность внутреннего облучения оценивалась по многочисленным измерениям содержания ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$) в организме жителей загрязненных территорий префектуры Фукусима, которые показали, что эффективная доза внутреннего облучения жителей за первый год после аварии оценивается в сотые доли мЗв. В последующие годы содержания радионуклидов цезия в теле жителей оказались практически не измеримым на СИЧ (меньше МДА).

Несмотря на такие успокоительные результаты скрининга внутреннего облучения, беспокойство населения относительно последствий облучения детей не уменьшилось. Причиной этому являются, с одной стороны, перенесенные на ситуацию Фукусимы ожидания таких же последствий воздействия радиоизотопов йода на детей, как после аварии на Чернобыльской АЭС. С другой стороны, 23 марта 2011 г. Комиссия по ядерной безопасности Японии (Nuclear Safety Commission of Japan) опубликовала предварительный прогноз радиологических послед-

ствий аварии SPEEDI [12], согласно которому эффективные дозы среди населения загрязненных территорий Фукусимы прогнозировались на уровне 20 мЗв за первый год и выше, а эквивалентные дозы в ЩЖ детей в возрасте 1 года – в пределах от 100 до 1000 мЗв в зоне эвакуации и за её пределами [14, 16, 34, 36]. Прогноз вызвал панику среди населения, которую трудно удаётся нивелировать разумными доводами и результатами скрининга до настоящего времени.

Относительно внутреннего облучения в прогноз SPEEDI была заложена абсолютно не реализуемая модель поступления радионуклидов в организм жителей: ингаляционное равномерное поступление, начиная с первого небольшого выброса 12 марта до 25 марта, при нахождении человека всё время на открытом воздухе. Это привело к переоценке прогнозных оценок более чем на порядок по внешнему излучению, и ещё большей переоценке по дозам внутреннего облучения, что продемонстрировали скрининговые измерения содержания ^{131}I в ЩЖ и радионуклидов цезия в теле жителей Фукусимы.

Из Фукусимской ситуации послеаварийных оценок доз можно сделать следующие выводы относительно прогнозирования радиологических последствий:

- разработанные модели оценок доз у населения на случай ядерной аварии с выбросом в атмосферу радиоактивных веществ нельзя механически переносить с одной территории на другую, необходимо учитывать особенности быта, питания, поведения местного населения;
- при использовании модели в конкретной ситуации для прогноза доз населения необходимо учитывать реально выполненные меры защиты, рассматривать факторы, влияющие на уровень облучения, такие как место жительства (городской или сельский), род деятельности, тип жилища, наличие семейного подсобного хозяйства и иные местные особенности;
- доводить до сведения общественности от имени ответственного научного или правительственного органа можно только тщательно проверенные данные и прогнозы в таком виде, который понятен непрофессионалам; если в СМИ попала ошибочная информация, то следует в том же источнике добиваться размещения правильной информации и разъяснения ошибочности предыдущих сведений.

Следует отметить, что авария на ФДАЭС принципиально отличается от аварии на Чернобыльской АЭС тем, что из-за выполнения своевременных и эффективных мер радиационной защиты населения закономерности формирования доз облучения населения после Чернобыля не могут напрямую быть перенесены на ситуацию после аварии в Фукусиме, так как соотношения доз внешнего и внутреннего облучения, ингаляционного и пищевого поступления в Фукусиме изначально оказались иными по сравнению с Чернобылем.

Следует также учитывать, что размеры следа загрязнения в Фукусиме было весьма ограниченным (примерно 50–60 на 20 км) по сравнению с огромными территориями загрязнения в Белоруссии, России и Украине; экономическая ситуация и мобильность населения в Японии значительно отличались от ситуации в СССР в 1980-е гг. В Японии население могло быстро покинуть зону загрязнения, оно практически не зависело от продуктов местного производства, так как сеть супермаркетов обеспе-

чивала всем необходимым, а радиационный контроль продуктов практически свёл к нулю пищевое поступление активности.

Заключение

После аварии на ФДАЭС в марте 2011 г. были проведены скрининговые измерения содержания ^{131}I в ЩЖ 1080 детей от 0 до 15 лет из наиболее загрязнённых муниципалитетов префектуры Фукусима. 55% измерений ЩЖ показали полное отсутствие ^{131}I в железе. Эквивалентные дозы в ЩЖ, оценённые по измерениям, превышающим МДА, оказались в пределах 50 мЗв у абсолютного большинства детей. Несмотря на малое число прямых измерений, их распределение не даёт оснований прогнозировать повышение радиогенной заболеваемости раком ЩЖ среди детского населения префектуры Фукусима, так как фактор радиационного воздействия у большинства детей отсутствовал.

Оценки эффективной дозы внутреннего облучения радиоизотопами цезия, выполненные по результатам СИЧ измерений, показали, что за первый год после аварии эффективные дозы внутреннего облучения жителей Фукусимы были ниже 0,1 мЗв, то есть в 10–50 раз ниже допустимого предела дозы техногенного облучения для населения. Во второй и третий год после аварии у более 99% жителей не было измеримых содержаний радионуклидов в организме.

Проведённый анализ доступной информации по внутреннему облучению жителей Фукусимы вследствие аварии на ФДАЭС даёт основание считать, что среди детского и взрослого населения нет оснований ожидать дополнительных онкологических заболеваний, в том числе и раком ЩЖ, вызванных аварийным облучением в 2011 году, и заметных на фоне спонтанной онкологической заболеваемости.

Литература

- WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization. Geneva, 2012.
- WHO. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami based on a preliminary dose assessment. Draft report of the World Health Organisation. Geneva, February 2013. World Health Organisation. Geneva, 2013.
- United Nation Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). Levels of effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, 2014. UNSCEAR 2013 Report Volume 1. Scientific Annex A: http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html (дата обращения: 21.06.2020)
- Fukushima, one year later. Initial analyses of the accident and its consequences. Report IRSN/DG/2012-003 of March 12. Paris, 2012.
- Голиков В.Ю., Звонова И.А. Оценка доз облучения жителей Японии. В монографии «Авария на АЭС «Фукусима-1». Под ред. акад. РАМН Г.Г. Онищенко. СПб.: НИИРГ им. проф. П.В. Рамзаева, 2012. 336 с.
- United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 report Vol. II. Effects of ionizing radiation. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. United Nations. New York, 2011.
- Cardis E., Kesminiene A., Ivanov V., et al. Risk of thyroid cancer after exposure to ^{131}I in childhood // *Journal of the National Cancer Institute*. 2005. Vol. 97, No 10. P. 724-732.
- Cardis E., Howe G., Ron E., et al. Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years after // *Journal of Radiological Protection*. 2006. Vol. 26. P. 127-140
- Likhtarev I., Kovgan L., Vavilov S., et al. Chepurny M., Ron E., Lubin J. Post-Chernobyl thyroid cancers in Ukraine, Report 2: Risk analysis // *Radiation Research*. 2006. Vol. 166, No 2. P. 375-386.
- Preston D.L., Ron E., Tokuoka S., et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958-1998 // *Journal of Radiation Research*. 2007. Vol. 168, No 1. P. 1-64.
- Furukawa K., Preston D., Funamoto S., et al. Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure // *International Journal of Cancer*. 2013. Vol. 132, No 5. P. 1222-1226.
- Nuclear Regulation Authority of Japan: http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/mext_speedi/0312-0324_in.pdf (дата обращения: 21.06.2020)
- Kim E., Kurihara O., Suzuki T., et al. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident (NIRS-M-252). In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Chiba, Japan; National Institute of Radiological Sciences; 2012. P. 59-66: http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_252.pdf (дата обращения: 21.06.2020)
- Hosokawa Y., Hosoda M., Nakata A., Kon M. Thyroid Screening Survey on Children after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident // *Radiation Emergency Medicine*. 2013. Vol. 2, No 1. P. 82-86.
- Tokonami S., Hosoda M., Akiba S., et al. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident // *Scientific Reports*. 2012. No 2. P. 507.
- Matsuda N., Kumagai A., Ohtsuru A., et al. Assessment of Internal Exposure Doses in Fukushima by a Whole Body Counter Within One Month after the Nuclear Power Plant Accident // *Journal of Radiation Research*. 2013. No 179. P. 663-668.
- Ohtsuru A., Midorikawa S., Ohira T., et al. Incidence of Thyroid Cancer Among Children and Young Adults in Fukushima, Japan, Screened With 2 Rounds of Ultrasonography Within 5 Years of the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident // *Journal of Otolaryngology – Head & Neck Surgery*. 2019. Vol. 145, No 1. P. 4-11.
- Balakov M.I., Anspaugh L.R., Bouville A., Likhtarev I.A. Contribution of internal exposures to the radiological consequences of the Chernobyl accident // *Radiation Protection Dosimetry*. 2007. Vol. 127, No 1-4. P. 491-6. Epub 2007/11/06. doi: 10.1093/rpd/ncm301 PMID: 17977893.
- Nagataki S., Shisume K., Nakao R. Thyroid Function in Chronic Excess Iodine Ingestion: Comparison of Thyroidal Absolute Iodine Uptake and Degradation of Thyroxine in Euthyroid Japanese Subjects // *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 1967. Vol.27, No 5. P. 638-647.
- Zvonova I.A. Dietary intake of stable iodine and some aspects of radioiodine dosimetry // *Health Physics*. 1989. Vol. 57, No 3. P. 471-475.
- ICRP, 1989. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP 20(2).
- Kim E., Kurihara O., Kunishima N., et al. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining // *Journal of Radiation Research*. 2016. No 57. P. i118-i126.
- Kim E., Yajima K., Hashimoto S., et al. Reassessment of Internal Thyroid Doses to 1,080 Children Examined in a Screening Survey after the 2011 Fukushima Nuclear Disaster // *Health Physics*. 2019. Vol. 118, No 1. P. 1. DOI: 10.1097/HP.0000000000001125
- Shinkarev S.M., Kotenko K.V., Granovskaya E.O., et al. Estimation of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake

- following the Fukushima accident // Radiation Protection Dosimetry. 2015. Vol. 164, No 1-2. P. 51–56. Doi:10.1093/rpd/ncu335.
25. Шинкарев С.М., Самойлов А.С., Грановская Е.О., и др. Сравнительный анализ вклада короткоживущих изотопов йода в дозу облучения щитовидной железы у населения после Чернобыльской и Фукусимской аварий // Гигиена и санитария. 2017. Т. 96, № 9. С. 827–832.
 26. Balonov M., Kaidanovsky G., Zvonova I., et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements // Radiation Protection Dosimetry. 2003. Vol. 105, No 1–4. P. 593–599.
 27. Gavrilin Yu., Khrouch V., Shinkarev S., et al. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus—Part I: ^{131}I , short-lived radioiodines (^{132}I , ^{133}I , ^{135}I), and short-lived radiotelluriums ($^{131\text{m}}\text{Te}$ and ^{132}Te) // Health Physics. 2004. No 86. P. 565–585.
 28. Hosoda M., Tokonami Sh., Tazoe H., et al. Activity concentrations of environmental samples collected in Fukushima Prefecture immediately after the Fukushima // Scientific Reports. 2013. No 3. P. 2283. DOI: 10.1038/srep02283.
 29. Momose T., Takada Ch., Nakagawa T., et al. Whole-body Counting of Fukushima Residents after the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. (NIRS-M-252). In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Chiba, Japan. National Institute of Radiological Sciences; 2012. P. 67–82.
 30. Takada C., Kurihara O., Tsujimura N., et al. Evaluation of Internal Exposure of the Workers and the Residents Caused by the Fukushima Nuclear Accident. 13th International Congress of International Radiation Protection Association (IRPA13) At: Glasgow, Scotland: <http://www.irpa13glasgow.com/information/downloads/>, File P12.22.doc. (дата обращения: 21.06.2020).
 31. Tsubokura M., Kato S., Morita T., et al. Assessment of the Annual Additional Effective Doses amongst Minamisoma Children during the Second Year after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster // PLoS ONE. 2015. Vol. 10, No 6. P. e0129114. doi:10.1371/journal.pone.0129114.
 32. Tsubokura M., Kato S., Nomura S., et al. Absence of internal radiation contamination by radioactive cesium among children affected by the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster // Health Phys. 2015. Vol. 108. P. 39–43.

Поступила: 21.06.2020 г.

Звонова Ирина Александровна – доктор технических наук, главный научный сотрудник лаборатории радиационной гигиены медицинских организаций Санкт-Петербургского научно-исследовательского института радиационной гигиены имени профессора П.В. Рамзаева Федеральной службы по надзору в сфере защиты прав потребителей и благополучия человека. **Адрес для переписки:** 197101, Россия, Санкт-Петербург, ул. Мира, д. 8; E-mail: ir_zv@bk.ru

Для цитирования: Звонова И.А. Дозы внутреннего облучения у населения префектуры Фукусима вследствие аварии на АЭС Фукусима-Дайичи // Радиационная гигиена. 2020. Т. 13, № 3. С. 98–109. DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-98-109

Internal doses to the public in the Fukushima prefecture from the Fukushima Daiichi NPP accident

Irina A. Zvonova

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being, Saint-Petersburg, Russia

The article is devoted to the analysis of internal dosimetry in residents of Fukushima Prefecture due to the accident at the Fukushima-Daiichi NPP. On March 24–30, 2011, screening studies were conducted on measurements of ^{131}I content in thyroid gland of children in those municipalities where the Japanese program for assessing the radiological consequences of the radiation accident “SPEEDI” predicted doses in the thyroid of one-year children from 100 to 500 mSv. Among 1080 children measured, 55% had results below the background, and the maximum estimate of the equivalent dose in the thyroid was 43 mSv. Measurements of several dozen inhabitants with other instruments and methods confirmed low levels of ^{131}I in the thyroid. In total, the ^{131}I thyroid direct measurement database of Fukushima residents contains approximately 1300 individuals. 75% quartile of individual thyroid dose distributions was below 10 mSv, the median was from 0 to 3.7 mSv

Irina A. Zvonova

Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev

Address for correspondence: Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia. E-mail: ir_zv@bk.ru

among children aged from 0 to 15 years in the five examined municipalities. The contribution of short-lived iodine radionuclides was estimated as 15% of the dose from ^{131}I for the main radioactive release on March 15. The effective dose of internal exposure to cesium radionuclides ($^{134}\text{Cs} + ^{137}\text{Cs}$), estimated from 10 thousand whole body measurements for the first year after the accident, was below 0.1 mSv in 90% of the examined people. Whole body measurements of children 6–15 years old in the second year after the accident confirmed the values of the effective dose of internal exposure less than 0.1 mSv, while the estimates of the effective dose of external exposure in the same children with using individual dosimeters determined the median distribution as 0.66 mSv with a maximum value of 3.45 mSv. The measurement results do not provide any basis to expect a future increase in the incidence of thyroid cancer and other radiogenic diseases among the Fukushima residents. Preventive evacuation of the population before the radioactive release, stay in enclosed dwellings, strict radiation control of food products have effectively reduced the expected doses of internal exposure to residents. In the predictions of the radiological consequences of the accident, it is necessary to take into account the actually implemented measures to protect the population, and local characteristics of the style of life and living.

Key words: accident at the Fukushima Daiichi NPP, radiological consequences, population, internal radiation doses, thyroid gland, radionuclides of iodine and cesium.

References

1. WHO. Preliminary dose estimation from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami. World Health Organization. Geneva, 2012.
2. WHO. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami based on a preliminary dose assessment. Draft report of the World Health Organisation. Geneva, February 2013. World Health Organisation. Geneva, 2013.
3. United Nation Scientific Committee on the Effect of Atomic Radiation (UNSCEAR). Levels of effects of radiation exposure due to the nuclear accident after the 2011 Great East-Japan Earthquake and Tsunami, 2014. UNSCEAR 2013 Report Volume 1. Scientific Annex A: http://www.unscear.org/unscear/en/publications/2013_1.html (дата обращения: 21.06.2020)
4. Fukushima, one year later. Initial analyses of the accident and its consequences. Report IRSN/DG/2012-003 of March 12. Paris, 2012.
5. Golikov VYu, Zvonova IA. Dose assessments to residents of Japan. In the monograph: "Accident at the Fukushima-1 NPP", Ed. Acad. RAMS G.G. Onischenko. Saint-Petersburg: NIIRG named after Prof. P.V. Ramzaev; 2012: 336. (In Russian).
6. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. UNSCEAR 2008 report Vol. II. Effects of ionizing radiation. Annex D: Health effects due to radiation from the Chernobyl accident. United Nations. New York, 2011.
7. Cardis E, Kesminiene A, Ivanov V, Malakhova IV, Shibata Y, Khrouch V, et al. Risk of thyroid cancer after exposure to ^{131}I in childhood. *Journal of the National Cancer Institute*. 2005;97(10): 724–732.
8. Cardis E, Howe G, Ron E, Bebeshko V, Bogdanova T, Bouville A, et al. Cancer consequences of the Chernobyl accident: 20 years after. *Journal of Radiological Protection*. 2006;26: 127–140.
9. Likhtarev I, Kovgan L, Vavilov S, Chepurny M, Ron E, Lubin J, et al. Post-Chernobyl thyroid cancers in Ukraine, Report 2: Risk analysis. *Radiation Research*. 2006;166(2): 375–386.
10. Preston DL, Ron E, Tokuoka S, Funamoto S, Nishi N, Soda M, et al. Solid cancer incidence in atomic bomb survivors: 1958–1998. *Journal of Radiation Research*. 2007;168(1): 1–64.
11. Furukawa K, Preston D, Funamoto S, Yonehara S, Ito M, Tokuoka S, et al. Long-term trend of thyroid cancer risk among Japanese atomic-bomb survivors: 60 years after exposure. *International Journal of Cancer*. 2013;132(5): 1222–1226.
12. Nuclear Regulation Authority of Japan. Available from: http://www.nsr.go.jp/archive/nsc/mext_speedi/0312-0324_in.pdf [Accessed 21 June 2020].
13. Kim E, Kurihara O, Suzuki T, Matsumoto M, Fukutsu K, Fukutsu Yu, et al. Screening survey on thyroid exposure for children after the Fukushima Daiichi nuclear power station accident (NIRS-M-252). In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Chiba, Japan; National Institute of Radiological Sciences; 2012: 59–66: http://www.nirs.go.jp/publication/irregular/pdf/nirs_m_252.pdf [Accessed 21 June 2020].
14. Hosokawa Y, Hosoda M, Nakata A, Kon M. Thyroid Screening Survey on Children after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Accident. *Radiation Emergency Medicine*. 2013;2(1): 82–86.
15. Tokonami S, Hosoda M, Akiba S, Sorimachi A, Kashiwakura I, Balonov M. Thyroid doses for evacuees from the Fukushima nuclear accident. *Scientific Reports*. 2012; 2: 507.
16. Matsuda N, Kumagai A, Ohtsuru A, Morita N, Miura M, Yoshida M, et al. Assessment of Internal Exposure Doses in Fukushima by a Whole Body Counter Within One Month after the Nuclear Power Plant Accident. *Journal of Radiation Research*. 2013;179: 663–668.
17. Ohtsuru A, Midorikawa S, Ohira T, Suzuki S, Takahashi H, Murakami M, et al. Incidence of Thyroid Cancer Among Children and Young Adults in Fukushima, Japan, Screened With 2 Rounds of Ultrasonography Within 5 Years of the 2011 Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. *Journal of Otolaryngology – Head & Neck Surgery*. 2019;145(1): 4–11.
18. Balonov MI, Anspaugh LR, Bouville A, Likhtarev IA. Contribution of internal exposures to the radiological consequences of the Chernobyl accident. *Radiation Protection Dosimetry*. 2007;127(1–4): 491–6. Epub 2007/11/06. doi: 10.1093/rpd/ncm301 PMID: 17977893.
19. Nagataki S, Shisume K, Nakao R. Thyroid Function in Chronic Excess Iodide Ingestion: Comparison of Thyroidal Absolute Iodine Uptake and Degradation of Thyroxine in Euthyroid Japanese Subjects. *Journal of Clinical Endocrinology and Metabolism*. 1967;27(5): 638–647.
20. Zvonova IA. Dietary intake of stable iodine and some aspects of radiiodine dosimetry. *Health Physics*. 1989;57(3): 471–475.
21. ICRP, 1989. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 1. ICRP Publication 56. Ann. ICRP 20(2).
22. Kim E, Kurihara O, Kunishima N, Momose T, Ishikawa T, Akashi M. Internal thyroid doses to Fukushima residents—estimation and issues remaining. *Journal of Radiation Research*. 2016; 57: i118–i126.
23. Kim E, Yajima K, Hashimoto S, et al. Reassessment of Internal Thyroid Doses to 1,080 Children Examined in a Screening Survey after the 2011 Fukushima Nuclear Disaster. *Health Physics*. 2019;118(1): 1. DOI: 10.1097/HP.0000000000001125

24. Shinkarev SM, Kotenko KV, Granovskaya EO, Yatsenko VN, Imanaka T, Hoshi M. Estimation of the contribution of short-lived radioiodines to the thyroid dose for the public in case of inhalation intake following the Fukushima accident. *Radiat. Prot. Dosimetry*. 2015;164(1-2): 51–56. Doi:10.1093/rpd/ncu335.
25. Shinkarev SM, Samoilo AS, Granovskaya EO, Korneva EA, Kukhta BA, Androsova AA, et al. Comparative analysis of the contribution of short-lived iodine isotopes to the thyroid dose in the population after the Chernobyl and Fukushima accidents. *Gigiena i sanitariya = Hygiene and sanitation*. 2017; 96 (9): 827-832. (In Russian).
26. Balonov M, Kaidanovsky G, Zvonova I, Kovtun A, Bouville A, Luckyanov N, et al. Contributions of short-lived radioiodines to thyroid doses received by evacuees from the Chernobyl area estimated using early in vivo activity measurements. *Radiation Protection Dosimetry*. 2003;105(1–4): 593–599.
27. Gavrilin Yu, Khrouch V, Shinkarev S, Drozdovitch V, Minenko V, Shemiakina E, et al. Individual thyroid dose estimation for a case-control study of Chernobyl-related thyroid cancer among children of Belarus—Part I: ^{131}I , short-lived radioiodines (^{132}I , ^{133}I , ^{135}I), and short-lived radiotelluriums ($^{131\text{m}}\text{Te}$ and ^{132}Te). *Health Physics*. 2004;86: 565–585 .
28. Hosoda M., Tokonami Sh, Tazoe H, Sorimachi A, Monzen S, Osanai M, et al. Activity concentrations of environmental samples collected in Fukushima Prefecture immediately after the Fukushima. *Scientific reports*. 2013;3: 2283. DOI: 10.1038/srep02283.
29. Momose T, Takada Ch, Nakagawa T, Kanai K, Kurihara O. Whole-body Counting of Fukushima Residents after the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. (NIRS-M-252). In: Proceedings of the 1st NIRS Symposium on Reconstruction of Early Internal Dose in the TEPCO Fukushima Daiichi Nuclear Power Station Accident. Chiba, Japan. National Institute of Radiological Sciences; 2012: 67–82.
30. Takada C, Kurihara O, Tsujimura N, Kanai K, Nakagawa T, Miyauchi H, et al. Evaluation of Internal Exposure of the Workers and the Residents Caused by the Fukushima Nuclear Accident. 13th International Congress of International Radiation Protection Association (IRPA13) At: Glasgow, Scotland. – Available from: <http://www.irpa13glasgow.com/information/downloads/>, File P12.22.doc. [Accessed 21 June 2020].
31. Tsubokura M, Kato S, Morita T, Nomura S, Kami M, Sakaiharu K, et al. Assessment of the Annual Additional Effective Doses amongst Minamisoma Children during the Second Year after the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Disaster. *PLoS ONE*. 2015;10(6): e0129114. doi:10.1371/journal.pone.0129114.
32. Tsubokura M, Kato S, Nomura S, et al. Absence of internal radiation contamination by radioactive cesium among children affected by the Fukushima Daiichi nuclear power plant disaster. *Health Phys*. 2015;108: 39–43.

Received: June 21, 2020

For correspondence: Irina A. Zvonova – Doctor of Technical Sciences, Associate Professor, Chief Researcher of Protection Laboratory, Saint-Petersburg Research Institute of Radiation Hygiene after Professor P.V. Ramzaev, Federal Service for Surveillance on Consumer Rights Protection and Human Well-Being (Mira Str., 8, Saint-Petersburg, 197101, Russia; E-mail: ir_zv@bk.ru)

For citation: Zvonova I.A. Internal doses to the public in the Fukushima prefecture from the Fukushima Daiichi NPP accident. *Radiatsionnaya Gygiena = Radiation Hygiene*. 2020. Vol. 13, No 3. P. 98-109. (In Russian). DOI: 10.21514/1998-426X-2020-13-3-98-109