

Факторы риска от трития: аргументы в пользу ужесточения нормативов

Арджун Макхиджани, Брайс Смит и Майкл Торн¹

Идея проекта IEER переориентировать нормы радиационной защиты на защиту людей, наиболее подверженных риску, была отчасти продиктована простым постижением эффектов простейшего радионуклида – трития. Тритий – это форма радиоактивного водорода, атомное ядро которого состоит из двух нейтронов. Как правило, у водорода нет нейтронов, тогда как у дейтерия, стабильного изотопа водорода, один нейтрон.

Химическое поведение всех трех изотопов водорода практически одинаково. Поэтому тритий (Т) может замещать водород, образуя тритиевую воду (т.е. НТО или Т₂О).² Распад трития происходит за счет излучения бета-частицы и, таким образом, тритий превращается в стабильный изотоп гелия (He-3). При относительно коротком периоде полураспада, который составляет 12,3 года, тритий является высокорadioактивным изотопом. Например, один грамм трития (приблизительно равный массе четверти чайной ложки соли) в тритиевой воде приведет к загрязнению почти 500 миллиардов галлонов воды, достигая действующей предельной концентрации в питьевой воде, которая составляет 20 000 пикокюри на один литр и которая установлена Управлением по защите окружающей среды (EPA). Одна унция тритиевой воды (НТО) может заразить целый годовой поток реки Саванна, превысив действующую предельную норму в питьевой воде.³

Помимо образования тритиевой воды, тритий также способен вытеснять нерадиоактивный водород в других видах химикатов. Тритий, являющийся составной частью связи углерод-третий, сложно удалить, и поэтому он относится к незаменимому органически связанному тритию (ОСТ). Исследования животных показывают, что от 1 до 5 процентов тритиевой воды в организме млекопитающих входит в состав органических молекул.

Из этих наблюдений видно, что тритиевая вода или органически связанный тритий способен проникать в плаценту. Затем этот тритий может проникнуть внутрь эмбриона /внутриутробного плода и облучить быстро делящиеся клетки, тем самым повышая риск возникновения врожденных нарушений, ранних выкидышей и других

¹ Доктор Арджун Макхиджани (Arjun Makhijani) является президентом исследовательского Института проблем энергетики и окружающей среды (IEER). Доктор Брайс Смит (Brice Smith) – старший советник IEER, а также старший преподаватель физики Нью-Йоркского университета в Кортленде (SUNY-Cortland). Доктор Майк Торн (Mike Thorne) – независимый консультант и эксперт в области радиологической защиты и перемещения радионуклидов в окружающей среде. Эта статья основана на главе 7 отчета «Наука - за беззащитных: установление норм радиационной защиты и комплексного воздействия окружающей среды для защиты людей, наиболее подверженных риску» («*Science for the Vulnerable: Setting Radiation and Multiple Exposure Environmental Health Standards to Protect Those Most at Risk*»). IEER, 19 октября, 2006 г. Отчет размещен на сайте www.ieer.org/campaign/report.pdf. Глава отчета была написана доктором Макхиджани и резюмирована в этой статье доктором Смитом при участии доктора Макхиджани. Ссылки размещены в отчете.

² Тритий также способен соединяться с дейтерием (D) и образовывать DTO. Это очень важно в тех случаях, когда в ядерных реакторах используется тяжелая вода (D₂O), например, в канадских ядерных реакторах или в американских реакторах по производству плутония в промышленном ядерном комплексе Саванна-Ривер-Сайт (Savannah River Site). Последние уже закрыты.

³ Учитывая среднюю скорость потока 10 000 кубических футов в секунду (Отчет Макхиджани и Бойд «Ядерные свалки на берегах реки: угроза реке Саванна от радиоактивного загрязнения на производственном комплексе «Саванна-Ривер-Сайт» (CPC)», 2004 г., стр. 18. Размещен на сайте: www.ieer.org/reports/srs/index.html).

проблем.⁴ Поэтому тритий является важным примером для определения необходимой степени изменения норм радиационной защиты в свете появления рисков у тех, кто не входит в категорию взрослых мужчин.

Расхождения в положениях

Научные модели, используемые для оценки опасных для здоровья воздействий от трития, имеют целый ряд серьезных недостатков. Например, в этих моделях предполагается, что тритиевая вода обычно распространяется по всему организму. В результате Управление по защите окружающей среды допускает, что все органы, за исключением отделов желудочно-кишечного тракта, получают одинаковую дозу трития при заданном поглощении. Однако необходимо учитывать, что ткани с высоким содержанием воды могут получить более высокую дозу по сравнению с костными или жировыми тканями. Ткани плода содержат больше воды, чем материнские. В результате тритиевая вода будет содержаться в тканях плода в концентрациях выше средних, что и показывают исследования животных. Более того, если органически связанный тритий проникает в состав ДНК, он, как правило, не облучает всю клетку, а в основном облучает ядро. Следовательно, риск повреждения ДНК и появления опасных эффектов (в том числе раковых и нераковых), значительно выше, чем если бы тритий потратил свою энергию на цитоплазму клетки.

Наконец модели, которые применяют для оценки дозы, полученной эмбрионом за первые недели беременности, имеют серьезные недостатки. Действующие модели предполагают, что доза эмбриона, полученная за первые восемь недель беременности, эквивалентна дозе, полученной стенкой матки. Это предположение вполне справедливо лишь в случае проникновения гамма-лучей. Но оно не подходит для альфаизлучающих радионуклидов, например, урана, и плохо действует в отношении таких радионуклидов, как тритий, который испускает бета-частицы относительно малой энергии.⁵ Это происходит потому, что альфа-частицы и бета-частицы малой энергии не перемещаются на большое расстояние и поэтому вред, который они причиняют, носит более локальный характер, чем вред от гамма-лучей.

Потенциальный вред от трития

Проблема в данном случае заключается в том, что бета-частицы малой энергии, аналогичные тем, что испускает тритий, зачастую наносят намного больше вреда, чем на сегодняшний день допускают нормативы. Эффективность нанесения вреда различными видами радиационного облучения учитывается с помощью коэффициента «относительной биологической эффективности» (ОБЭ). Действующие нормы, как правило, допускают, что у гамма-, рентгеновских лучей и всех бета-частиц коэффициент ОБЭ равен одному, то есть нанесенный вред прямо пропорционален количеству энергии излучения, распространяемой по ткани. С другой стороны, альфа-частицы, которые распространяют всю свою энергию на меньшее количество клеток либо только на одну, имеют коэффициент ОБЭ 20. Иными словами, по этим

⁴ Если не указано иного, формами трития, которые обсуждаются в статье, являются тритиевая вода или ОСТ.

⁵ У типичной бета-частицы, испускаемой тритием, в 35 раз меньше энергии, чем у типичной бета-частицы, испускаемой стронцием-90.

нормативам выходит, что альфа-частица наносит в 20 раз больше биологического вреда, чем гамма-луч, который размещает в организме такое же количество энергии.

Как отмечено, малая энергия бета-частицы трития может привести к распространению всей энергии на небольшое расстояние, что может быть особенно вредным, если тритий присутствует в ДНК. В некоторых случаях это мало отличает бета-частицы трития от альфа-частиц. Таким образом, коэффициент ОБЭ трития не должен быть равен одному ни для всех форм трития, ни для всех возрастных групп. Для более подробного изучения этого вопроса, ученые Харрисон (Harrison), Харшид (Khursheed) и Ламберт (Lambert) опубликовали в 2002 году научную работу, где рассматривались предположения, которые используются в действующих моделях. Коэффициенты преобразования доз для различных возрастных групп, рассчитанные в данном отчете, показывают коэффициент ОБЭ выше одного как для тритиевой воды, так и для органически связанного трития (см. таблицу 1).

Таблица 1: Комплексная относительная биологическая эффективность тритиевой воды и органически связанного трития

Возрастная группа	Форма трития	Доверительный предел 5%	Среднее значение	Доверительный предел 95%
Взрослый	НТО	1,2	2,3	3,8
	ОСТ	2,3	5,0	11,6
Внутриутробный плод (всасывание организмом матери в период беременности)	НТО	2,1	4,4	8,1
	ОСТ	4,0	9,8	23,1

Примечание: НТО – это тритиевая вода, в которой один атом обычного водорода замещен на атомом трития. ОСТ – это органически связанный тритий. Цифры, указанные в колонках доверительных интервалов, означают, что коэффициенты ОБЭ могли быть меньше указанной цифры, поскольку процент времени, обозначенный с помощью доверительного интервала, был серией одинаковых экспериментов, которые следовало провести.

Источник: Оценка в работе ученых Харрисона (Harrison), Харшида (Khursheed) и Ламберта (Lambert) за 2002 год, таблица 8. Комплексные коэффициенты ОБЭ были рассчитаны с помощью деления доз трития, которые показаны в этой работе, на коэффициент преобразования дозы для тритиевой воды из отчета Федерального отчета EPA №11 о нормативах.

Эта научная работа подчеркивает значимость химической формы трития и возраста при облучении в определении вреда, нанесенного тритием. Например, используя средние оценки таблицы, мы обнаружим, что вред, нанесенный плоду органически связанным тритием, более чем в четыре раза превышает вред, нанесенный взрослому человеку тритиевой водой, и почти в десять раз превышает цифры действующих моделей.

Влияние органически связанного трития

Органически связанный тритий представляет более серьезные факторы риска, чем тритиевая вода при одинаковом количестве поглощения трития по двум основным причинам. Во-первых, химическая форма влияет на вероятность проникновения трития в состав ДНК или другие биомолекулы. Поскольку бета-частицы малой энергии трития не распространяются на большие расстояния, то разница в повреждениях, нанесенных тритием, который сконцентрирован в ядре клетки (где находится ДНК), и тем, который находится в цитоплазме, будет велика. Например, органически связанный тритий, попадающий в организм с пищей, более вероятно войдет в состав биомолекул, чем тритий, который проникает в организм с питьевой тритиевой водой.

Второй причиной более опасного влияния ОСТ является то, что по сравнению с тритиевой водой он, как правило, дольше задерживается в организме. Исследования

людей показывают, что половина тритиевой воды выходит из организма каждые 10 дней, при этом удаление половины ОСТ из организма занимает от 21 до 76 дней. Для некоторых молекул с очень медленной скоростью перехода это время может увеличиться до 280-550 дней. Более длительное время удержания ОСТ в организме вызывает особое беспокойство, если тритий проникает в такие ткани, как нейроны (основные клетки нервной системы) или ооциты (незрелые яйцеклетки). Учитывая, что формирование яичников у женщин происходит раз в жизни, воздействия радиации на репродуктивную систему внутриутробного плода женского пола, а также возможное воздействие на детей, матери которых были облучены внутриутробно, могут быть значительными.

Особым примером явного влияния ОСТ является тритиевый тимидин. Эксперименты показывают, что тритиевый тимидин, органическое соединение, которое может быть инкорпорировано в состав ДНК, на определенных стадиях эмбрионального развития у мышей наносит вреда более чем в 1000 раз по сравнению с тритиевой водой при одинаковых концентрациях. Такая огромная разница не может быть примером для всех форм ОСТ, поскольку тимидин – это предшественник ДНК. Однако этот случай демонстрирует крайнюю необходимость в изучении особых химических форм трития, в особенности, органически связанных.

Последней проблемой, касающейся описанных моделей, является замещение в ДНК атома водорода тритием. Поскольку гелий-3 плохо связывается с углеродом, распад этого атома трития создает свободный ион гелия, который отделяется от молекулы. Это может привести к различным эффектам, например, разрушению односторонних ДНК. Также возможны точечные мутации, при которых превращение трития в гелий способно трансформировать один из четырех стандартных блоков ДНК (т.е. цитозин) в другой (тимин). Однако действующие модели предполагают, что прямое повреждение от бета-частиц будет более значительным, чем вред, нанесенный при образовании гелия-3.

Нераковые воздействия

Помимо вопросов, связанных с моделями для оценки раковых рисков, оценки факторов риска от трития, которые ориентированы лишь на раковые заболевания, преуменьшают его реальные воздействия. К повышенным рискам у беременных и эмбриона/плода относятся ранние выкидыши, пороки развития и генетические нарушения. Риски также могут передаваться через много поколений, учитывая, что яичники у женщины формируются еще в утробе.

Необходимо провести еще много дополнительных исследований тритиевых воздействий на здоровье. Например, поскольку мы не располагаем информацией о количестве ранних выкидышей, то на сегодняшний день невозможно дать и количественную оценку этому фактору риска. Далее, модель МКРЗ по дозе облучения на первых неделях беременности не распространяется на дозу трития. К тому же, необходимо изучать эффекты внутриутробного облучения тритием в комбинации с токсинами, например, химикатами, нарушающими эндокринную систему, - также, как изучаются потенциальные неврологические эффекты.

Тритий в окружающей среде

Поскольку в природе тритий встречается в очень небольших концентрациях, использование трития в ядерном оружии, а также его получение на коммерческих атомных электростанциях привело к особым поводам для беспокойства. Например,

река Саванна заражена тритием в основном из-за деятельности, связанной с производством ядерного оружия в промышленном ядерном комплексе Саванна-Ривер-Сайт (Savannah River Site).

К тому же, после обнаружения тритиевых утечек с атомной электростанции в штате Иллинойс, стало понятно, что умышленные выбросы и случайные утечки могут стать более широкой проблемой для коммерческих атомных электростанций, чем было принято считать раньше. Примечательно, что, будучи в самом центре скандала, который произошел летом 2006 года, Комиссия США по ядерному регулированию так до конца и не узнала обо всех источниках проникновения трития в окружающую среду, а также о реальном масштабе этих утечек.

Заключение

В свете недостатков в действующих моделях и разнообразия потенциальных нераковых воздействий на здоровье, необходим, возможно, более высокий защитный уровень от воздействия трития, нежели он существует сегодня. Мы пришли к выводу, что уровень в 400 пикокюри на один литр для поверхностных вод должен рассматриваться, как промежуточный целевой предел дозы для внешних поверхностных вод на всех атомных электростанциях и ядерных комплексах министерства энергетики США. При этом формируется лучшее понимание вредных воздействий трития. Этот уровень в 50 раз ниже, чем действующий предельный уровень для питьевой воды, установленный ЕРА, и соответствует опасному для жизни риску раковых заболеваний с летальным исходом примерно один человек на миллион населения.⁶

Необходимо отметить, что министерство энергетики уже согласилось на предельно допустимую концентрацию трития в поверхностных водах на уровне 500 пикокюри на один литр при очистительных мероприятиях на заводе «Роки Флэтс» (Rocky Flats). Этот уровень соответствует норме трития в поверхностных водах штата Колорадо. Он основан на коэффициенте преобразования дозы для трития в Федеральном отчете № 11 о нормативах (ФОН № 11) ЕРА. Если использовать последний ФОН № 13, то предельным уровнем может быть 400 пикокюри на литр, который принят в штате Калифорния для охраны здоровья людей. Уровни в Колорадо и Калифорнии установлены с применением тезиса один случай на миллион людей опаснейших для жизни рисков раковых заболеваний со смертельным исходом, что является целью очистительных мероприятий по закону «Superfund law», который официально называется «Всеобъемлющий закон об окружающей среде, компенсации и ответственности (Comprehensive Environmental Response, Compensation, and Liability Act, или CERCLA).

Аргументы в пользу ужесточения предельных доз для трития в качестве превентивной меры еще более убедительны, когда учитывается повышенная ОБЭ трития, его возможные нераковые воздействия, возможный синергизм с токсичными химикатами, а также потенциальные эффекты в результате внутриутробного облучения плода на определенных особенно важных сроках беременности.

⁶ Рассчитан с помощью коэффициентов преобразования доз на различные возрастные группы, компакт диск отчета FGR 13 (ЕРА 2002 г.), приблизительные варианты потребления воды с учетом возраста, а также средний коэффициент риска раковых заболеваний со смертельным исходом, равный 0,057 раковых заболеваний на один зиверт.