

Научная статья

УДК 614.876; DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-25-36

## **ОБОСНОВАНИЕ НОВОЙ ПРИЧИННО-СЛЕДСТВЕННОЙ ТРАКТОВКИ РАЗВИТИЯ И ТРАНСФОРМАЦИИ ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ПРИМЕРЕ АВАРИИ НА АТОМНОЙ ЭЛЕКТРОСТАНЦИИ «ФУКУСИМА-1»**

✉ Ивахнюк Сергей Григорьевич;

Королева Людмила Анатольевна.

Санкт-Петербургский университет ГПС МЧС России, Санкт-Петербург, Россия.

Лугавцов Олег Валентинович.

Санкт-Петербургский государственный технологический институт

(технический университет), Санкт-Петербург, Россия

✉ [sgi78@mail.ru](mailto:sgi78@mail.ru)

*Аннотация.* На примере радиационной аварии на атомной электростанции «Фукусима-1» и последующих мероприятий по сбросу тритийсодержащего водного теплоносителя в океан рассмотрена адекватность новой причинно-следственной трактовки – «треугольник чрезвычайной ситуации», обосновывающей и объясняющей сценарии взаимного перехода чрезвычайных ситуаций одного вида в другие, а также ее графической интерпретации. Исследованы вопросы существующих и возможных последствий, связанных как непосредственно с аварией, так и со сбросом теплоносителя. Представлены результаты расчета изменения радиоактивности трития в объеме воды, планируемом к сбросу, на срок, равный десяти его периодам полураспада.

Рассмотрены перспективы применения концепции «треугольника чрезвычайной ситуации», усматриваемые в построении «пространства чрезвычайной ситуации», представляющего собой массив данных о чрезвычайных ситуациях, собираемый в целях анализа, интерпретации информации, установления причинно-следственных связей и прогнозирования, а также принципы его формирования.

*Ключевые слова:* возникновение чрезвычайной ситуации, развитие чрезвычайной ситуации, трансформация чрезвычайной ситуации, треугольник чрезвычайной ситуации, пространство чрезвычайной ситуации, радиационная авария, Фукусима, тритийсодержащий теплоноситель

**Для цитирования:** Ивахнюк С.Г., Королева Л.А., Лугавцов О.В. Обоснование новой причинно-следственной трактовки развития и трансформации чрезвычайных ситуаций на примере аварии на атомной электростанции «Фукусима-1» // Проблемы управления рисками в техносфере. 2024. № 1 (69). С. 25–36. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-25-36.

Scientific article

## **SUBSTANTIATION A NEW CAUSAL INTERPRETATION OF THE DEVELOPMENT AND TRANSFORMATION OF EMERGENCY SITUATIONS ON THE EXAMPLE OF THE ACCIDENT AT THE FUKUSHIMA-1 NUCLEAR POWER PLANT**

✉ Ivakhnyuk Sergey G.;

Koroleva Lyudmila A.

Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia, Saint-Petersburg, Russia.

Lugavtsov Oleg V.

Saint-Petersburg state institute of technology (technical university), Saint-Petersburg, Russia

✉ [sgi78@mail.ru](mailto:sgi78@mail.ru)

*Abstract.* Using the example of the radiation accident at the Fukushima-1 nuclear power plant and subsequent measures to discharge tritium-containing aqueous coolant into the ocean, the adequacy of a new causal interpretation – the «triangle of emergencies», justifying and explaining scenarios of mutual transition of one type of emergency into another, as well as its graphical interpretation is considered. The issues of existing and possible consequences related both directly to the accident and to the discharge of the coolant are investigated. The results of calculating the change in the radioactivity of tritium in the volume of water planned for discharge for a period equal to ten of its half-life are presented.

The prospects of applying the concept of an «emergency triangle» are considered, which are seen in the construction of an «emergency space», which is an array of emergency data collected for the purpose of analyzing, interpreting information, establishing cause-effect relationships and forecasting, as well as the principles of its formation.

*Keywords:* occurrence of an emergency, development of an emergency, transformation of an emergency, emergency triangle, emergency space, radiation accident, Fukushima, tritium-containing coolant

**For citation:** Ivakhnyuk S.G., Koroleva L.A., Lugavtsov O.V. Substantiation a new causal interpretation of the development and transformation of emergency situations on the example of the accident at the Fukushima-1 nuclear power plant // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere = Problems of risk management in the technosphere. 2024. № 1 (69). P. 25–36. DOI: 10.61260/1998-8990-2024-1-25-36.

### **Введение**

В соответствии с воззрениями ряда видных ученых, в том числе основоположника теории экономических циклов Н.Д. Кондратьева, кризисы, войны и революции определяются в первую очередь сменой технологических укладов [1]. Из этого следует, что попытки реализации прорывных наукоемких технологий неотвратимо будут сопровождаться возникновением и развитием различных чрезвычайных ситуаций (ЧС), в том числе и биолого-социальных ЧС (БСЧС), к которым ряд исследователей относит массовые акции протеста, акты экстремизма и терроризма, а также военные конфликты.

Предпринятая попытка систематизации и установления связи этапов развития научно-технического прогресса с возникновением и взаимными трансформациями различных видов ЧС [2] позволила предложить новые сценарии возникновения и развития ЧС и разработать новый дидактический подход к объяснению их генезиса и взаимодействия.

Проанализированные данные об имевших место ЧС и их последствиях четко формируют тезис о том, что крупномасштабные природные ЧС (ПЧС), например, лесные пожары, наводнения, землетрясения, как и техногенные ЧС (ТЧС), вызывают отклик в виде различных социальных проявлений (БСЧС) – от протестных акций населения до актов экологического и политического терроризма, и наоборот.

Действительно, проведение анализа предпосылок и последствий различных типов ЧС позволяет утверждать, что любой из них может стать своеобразным ключом, «триггером» для взаимного каскадного перехода, о чем свидетельствуют резонансные события последних лет.

Примером может послужить разгерметизация топливного резервуара (ТЧС) в Кайеркане (районе г. Норильска) в 2020 г. Согласно итогам расследования к подвижности свай и оседанию конструкции резервуара привело таяние вечной мерзлоты (ПЧС). Широкий общественный резонанс, несмотря на подробную и объективную подачу в средствах массовой информации, вызвал у прозападно настроенных российских политиков и изданий желание привлечь «Гринпис» и «Беллону» в попытке «раскачать» ситуацию до уровня массовых социальных протестов (БСЧС).

Также можно привести в пример горение и тление торфяников (ПЧС), причиной которых зачастую служат просчеты при реализации мелиоративных мероприятий, приведших к переосушению болот (ТЧС). Все это накладывается на «плодородную почву», когда любой негативный информационный повод масштабируется и распространяется среди определенных социальных групп, вплоть до призыва «под знамена» несогласованных митингов и пикетов (БСЧС).

Другим примером могут стать милитаризованные террористические атаки на гражданские объекты хранения нефтепродуктов в приграничных с Украиной областях (БСЧС). Повреждения, причиненные резервуарам, послужили причиной поступления токсичных компонентов нефтяных углеводородов в окружающую среду (ТЧС), негативное воздействие которых приведет к разрушению слаженных взаимодействий внутри сформировавшихся биоценозов, на что рано или поздно последует ответная реакция природы (ПЧС).

Попытка мысленного размещения трех основных типов ЧС в вершинах треугольника и анализа их возможного взаимодействия обнаруживает верность новой графической трактовки каскадного развития и взаимной трансформации ЧС – граф в виде «треугольника ЧС» (рис. 1).

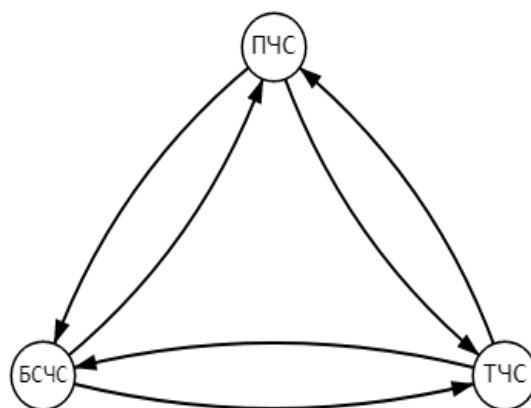


Рис. 1. Графическая интерпретация процессов возникновения и взаимной трансформации различных видов ЧС

Стоит отметить, что различные виды ЧС способны не только взаимно трансформироваться, но и «клонировать» себе подобных. Так, тление торфяников может привести к возникновению лесного пожара; террористический акт в отношении представителей конкретной религиозной конфессии незамедлительно вызывает вооруженный ответ; аварийный выброс облака топливно-воздушной смеси в цехе одного предприятия может привести к его взрыву на территории другого. В связи с изложенным графическая интерпретация процессов возникновения и взаимной трансформации различных видов ЧС может быть модернизирована в виде графа, представленного на рис. 2.

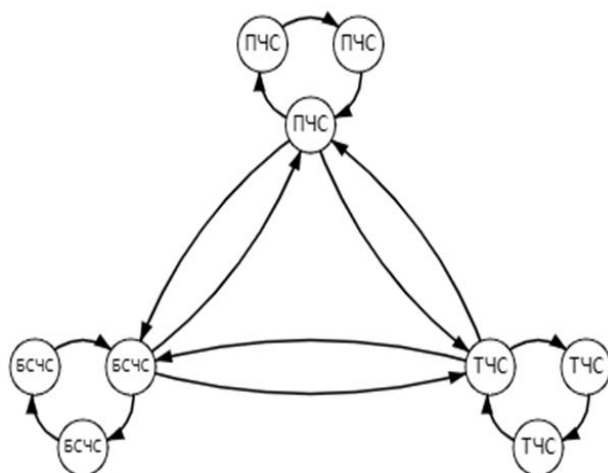


Рис. 2. Графическая интерпретация процессов возникновения и взаимной трансформации различных типов ЧС (модернизированный вариант)

Представленные на рис. 1, 2 визуализации новой трактовки возникновения и взаимной трансформации различных видов ЧС в виде графа – «треугольника ЧС» («emergency triangle») логически доступны для понимания и устанавливают причинно-следственные связи в их каскадном развитии.

Цель работы заключается в обосновании возможностей и перспектив применения новой причинно-следственной трактовки развития и трансформации ЧС – «треугольника ЧС» на примере аварии на атомной электростанции (АЭС) «Фукусима-1».

### Исследовательская часть

Ярким примером адекватности концепции «треугольника ЧС» их реальному каскадному развитию могут послужить резонансные события на АЭС «Фукусима-1». Сильнейшее в истории Японии землетрясение, произошедшее 11 марта 2011 г., и последовавшее за ним цунами (ПЧС) привело к аварии на атомной электростанции (ТЧС), отнесенной впоследствии к радиационным авариям максимального (седьмого) уровня по Международной шкале ядерных событий (INES) [3]. Авария на АЭС «Фукусима-1» спровоцировала массовые негативные социальные проявления по всему миру (БСЧС).

В отличие от Чернобыльской аварии 1986 г., на АЭС «Фукусима-1» были разрушены не один, а три реактора из шести. Важно отметить, что в исследуемом случае их активные зоны не разрушились, что обусловило практическое отсутствие в выбросах продуктов деления ядерного топлива, кроме йода и цезия в виде изотопов  $^{131}\text{I}$  и  $^{137}\text{Cs}$ , соответственно. Первый имеет период полураспада всего 8,04 сут и опасен исключительно на ранних стадиях аварии. Второй имеет период полураспада 30 лет и определяет длительные радиоактивные загрязнения. Суммарные выбросы  $^{131}\text{I}$  (до 200 ПБк) и  $^{137}\text{Cs}$  (до 16 ПБк) составили около 10–15 % от чернобыльского загрязнения [4]. До 80 % выбросов с АЭС «Фукусима-1» попали в океан, а не на сушу. Проникновение  $^{137}\text{Cs}$  в океан через атмосферу оценивается в 5–8 ПБк, а еще от 1 до 6 ПБк  $^{137}\text{Cs}$  – путем прямых сбросов жидких радиоактивных отходов с территории станции непосредственно во время аварии [4].

Основное загрязнение прилегающей территории представляет собой след загрязнений на северо-запад от АЭС на расстоянии около 40 км. При этом площадь территории с загрязнением более  $185 \text{ кБк/м}^2$  (или  $5 \text{ Ки/км}^2$ ) составила в 2011 г. около  $1700 \text{ км}^2$ , это примерно 6 % от площади загрязнения такого же уровня после чернобыльской катастрофы [5]. Из них 75 % приходится на леса, около 20 % – на сельхозугодия и 5 % – на территории населенных пунктов (рис. 3). К 2014 г. площади указанных загрязнений сократились до  $600 \text{ км}^2$  [4].

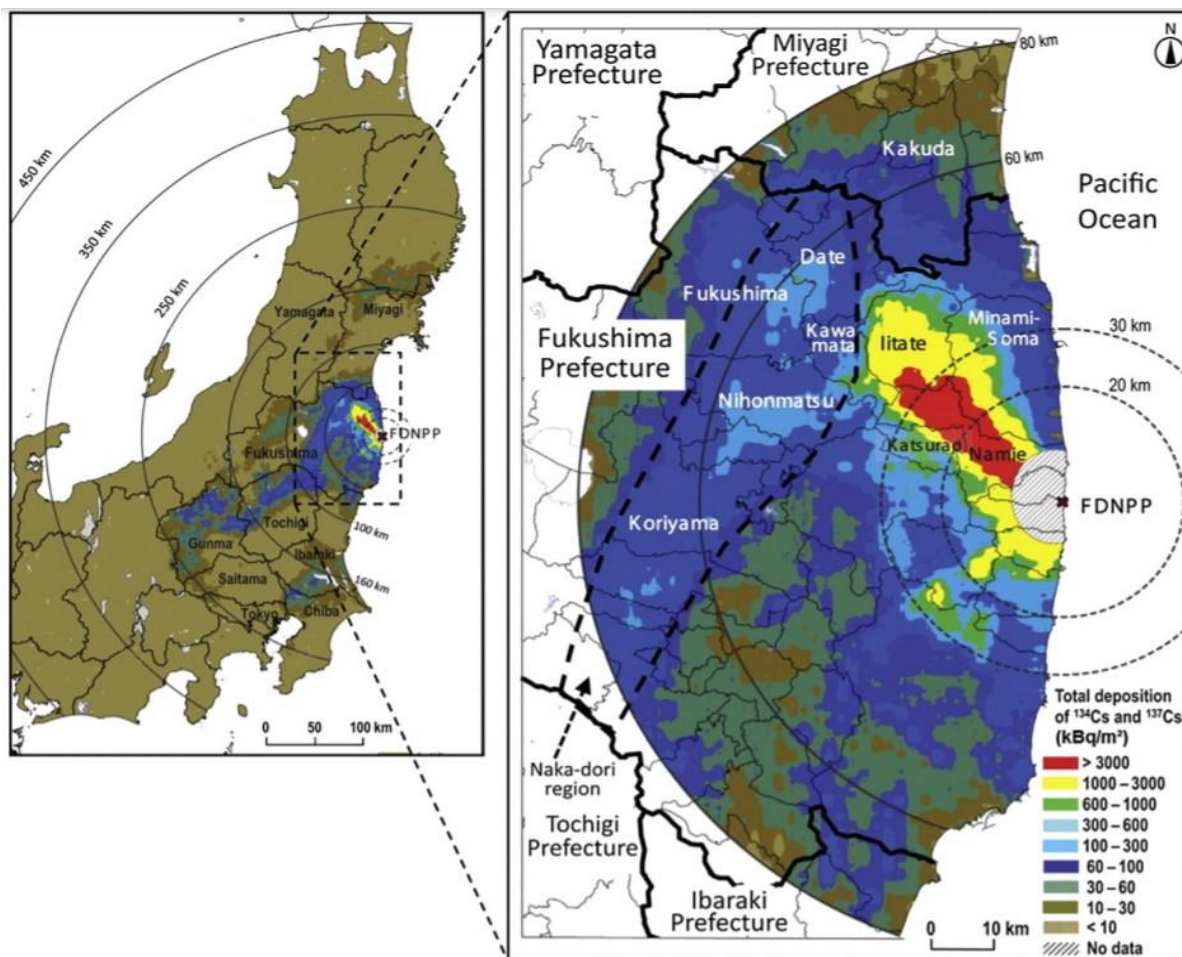


Рис. 3. Карта измерений мощности дозы ионизирующего излучения по состоянию на 29 апреля 2011 г. [4]

Последствия аварии (ТЧС) вызвали в 2011 г. бурные протесты во многих странах (БСЧС) с требованием немедленного прекращения строительства новых атомных электростанций и отмены планов продления срока службы существующих. Авария на АЭС «Фукусима-1», по сути, сменила мировую «атомную» повестку.

Необходимо отметить, что  $^{137}\text{Cs}$  в океане был и до аварии на АЭС «Фукусима-1». Подобного «искусственного» радионуклида, благодаря атмосферным испытаниям ядерного оружия, в мировом океане скопилось уже более 300 ПБк. Конкретно в северной части Тихого океана – около 70 ПБк, то есть почти в пять раз больше, чем внесла авария на АЭС «Фукусима-1» [4].

Изображения на рис. 4 свидетельствуют, что поступивший в океан  $^{137}\text{Cs}$  довольно быстро снизил свою активность до концентрации  $1 \text{ Бк}/\text{м}^3$  и ниже. Для сравнения, норматив для питьевой воды по требованиям Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ) в 3 000 раз выше – до  $10\,000 \text{ Бк}/\text{м}^3$  ( $10 \text{ Бк}/\text{л}$ ) [6]. Таким образом, следы  $^{137}\text{Cs}$  возможны к диагностированию высокочувствительными приборами даже у берегов Северной Америки, однако опасность для здоровья людей в указанных концентрациях они не представляют. Впрочем, не стоит забывать, что  $^{137}\text{Cs}$  способен к биомагнификации в гидробионтах. Процессы накопления изотопов бентосом, зоопланктоном и рыбами способны разрушить устоявшиеся трофические цепи питания и привести к вымиранию отдельных представителей животного мира, что, несомненно, вызовет ответные реакции природы (ПЧС).

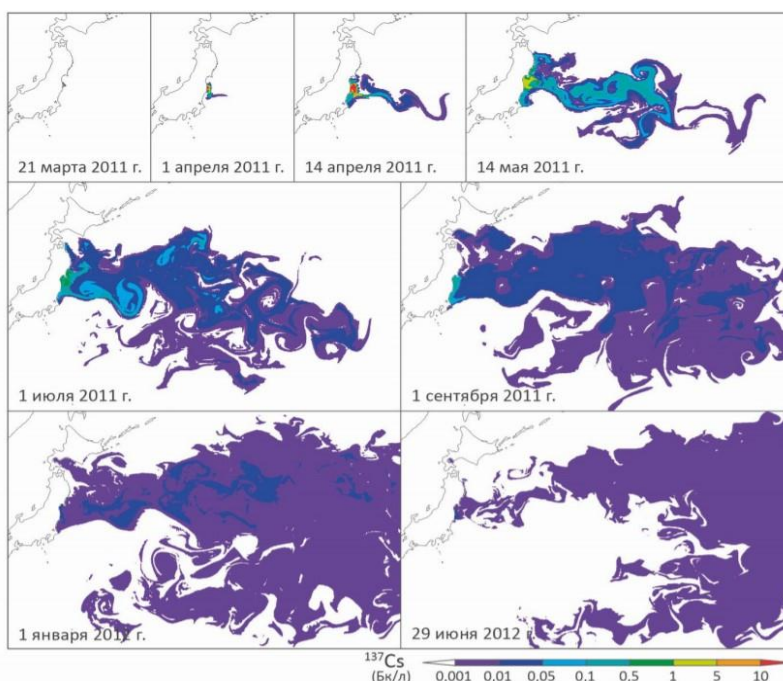


Рис. 4. Моделирование этапов распространения  $^{137}\text{Cs}$  от АЭС «Фукусима-1» [4]

Одним из основных потребителей рыбы является человек, это объясняет, почему рыболовство в районе АЭС «Фукусима-1» поначалу было запрещено, а в дальнейшем – вся выловленная аквакультура подвергалась тщательному дозиметрическому контролю. Уровень содержания  $^{137}\text{Cs}$  в рыбной продукции с годами снижался. Если после аварии до 57 % отобранных проб характеризовались превышением нормативов в 100 Бк  $^{137}\text{Cs}$  на килограмм сырого веса рыбы, то уже с апреля 2015 г. таких превышения не выявлялись, а в большинстве образцов содержание  $^{137}\text{Cs}$  было ниже 5 Бк/кг (рис. 5) [7]. При этом рекомендации ВОЗ по содержанию  $^{137}\text{Cs}$  в пище даже для детей составляют до 1 000 Бк/кг [6], что послужило основанием для снятия ограничений на вылов рыбы в префектуре Фукусима.

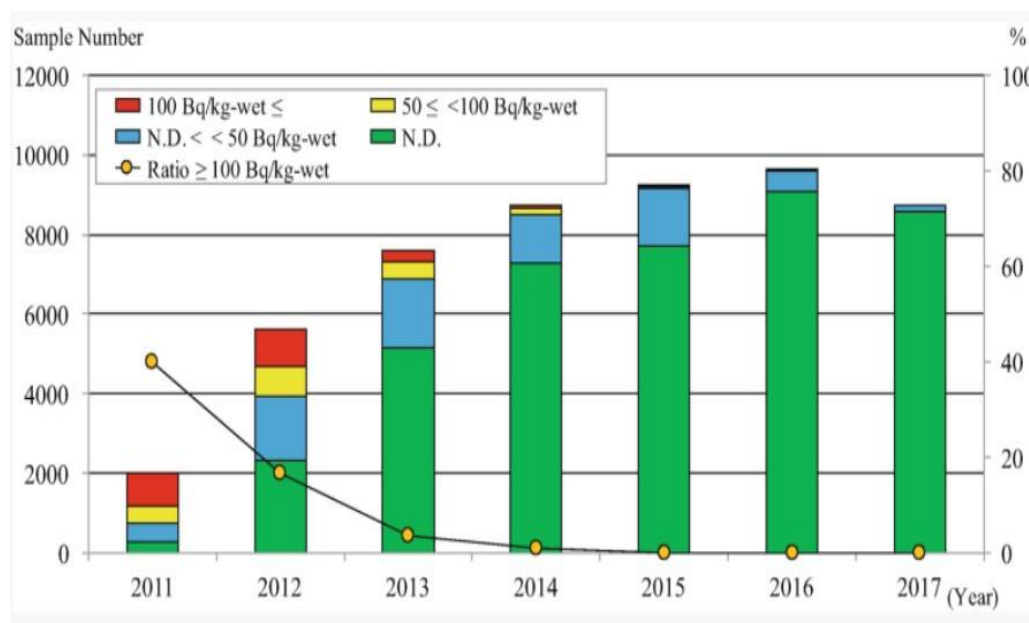


Рис. 5. Результаты мониторинга содержания  $^{137}\text{Cs}$  в рыбе из префектуры Фукусима по годам (N.D. – предел обнаружения в 5 Бк/кг) [7]



История с «Фукусимой-1», однако, на этом не закончилась. Впервые планы осуществить сброс тритийсодержащего водного теплоносителя в океан (по сути, искусственно вызванной ПЧС), Япония озвучила в 2021 г.: тогда в хранилищах скопилось около 1,25 млн т жидких радиоактивных отходов. Любопытно, что эту идею поддержали и в Международном агентстве по атомной энергии (МАГАТЭ). Россия и Китай, напротив, направили Японии перечень технических проблем, связанных со сбросом загрязненной воды АЭС «Фукусима-1», и требования по уточнению информации.

В Токио утверждали, что вода в целом очищена и содержит только тритий – радиоактивный изотоп водорода  $^3\text{H}$ , который практически трудно отделить от воды. Тритий достаточно подвижный изотоп, он способен диффундировать сквозь металлы, особенно при высоких температурах, чем он отличается от других изотопов – продуктов деления ядерного топлива.

Период полураспада трития составляет 12,32 г. [8]. При распаде тритий испускает бета-частицы, превращаясь в  $^3\text{He}$ . При этом выделяется 18,59 кэВ энергии, из них на электрон приходится в среднем 5,7 кэВ, а на электронное антинейтрино – оставшаяся часть. Образовавшиеся бета-частицы распространяются в воздухе всего на 6,0 мм и не могут преодолеть даже верхний слой кожи человека [9]. В силу малой энергии распада трития испускаемые электроны хорошо задерживаются даже простейшими преградами, например, одеждой или резиновыми хирургическими перчатками. Он считается «мягким» радиоизотопом и его излучение не настолько опасно, как от других радионуклидов.

Тем не менее  $^3\text{H}$  представляет радиационную опасность при ингаляционном, пероральном и кожно-резорбтивном проникновении в человеческий организм. В случае попадания трития в организм в допустимых концентрациях заметного вреда не будет, но высокие залповые или перманентные поступления ведут к его накоплению, последствия которого будут весьма серьезными [10].

Попадая быстро с водой в организм человека, тритий существует в виде двух отдельных соединений: оксида трития (НТО) и органических соединений трития (ОСТ). Кинетика метаболизма радионуклида в тканях характеризуется биологическим периодом полувыведения ( $T_{1/26}$ ) – временем, в течение которого выделяется половина поступившего в организм радиоактивного вещества. Период полувыведения трития из организма человека в виде НТО составляет около 10 дней (у рыб – два дня), а для ОСТ биологический период полувыведения составляет более года и зависит от вида органического соединения [11–14]. Опасения, связанные с возможным накоплением в морепродуктах радиоактивного трития, прежде всего в рыбе, вряд ли оправданы. Причина в специфике этого изотопа. Единичный случай употребления тритиевой воды не приведет к его существенному накоплению в организме ввиду его незначительного периода полувыведения  $T_{1/26}$ .

Опасность трития в качестве источника внутреннего облучения определяется возможностью его иммобилизации в любых тканях биологического объекта, включая генетический материал клетки. Круговорот трития в природе изучен достаточно детально. Тритий ведет себя как вода в экосистемах и включается во все биологические объекты, такие как растения, животные, пищевые продукты [15].

В настоящее время проблема загрязнения вод Тихого океана радиоактивным тритием от источника АЭС «Фукусима-1» – одна из главных в радиоэкологии прибрежных территорий. Его высокая миграционная способность вследствие таких физических явлений, как водные течения и диффузионные процессы, определяет этот радионуклид как загрязнитель водных экосистем и прилегающих береговых территорий. Радиационная опасность этого радионуклида в объеме воды намного больше, чем в газовой фазе (до 400 раз) [16].

24 августа 2023 г. Япония начала сброс в Тихий океан технической воды, которую использовали для охлаждения поврежденных реакторов на АЭС «Фукусима-1». Очистка воды осуществлялась системой Advanced Liquid Processing System (ALPS), позволяющей избавиться от 62 видов радионуклидов, кроме трития [17]. Вода сбрасывается через построенный подводный туннель на расстоянии одного километра от берега. Каждую тонну предварительно

разбавляют 1,2 тыс. т морской воды. Общий объем сброшенной воды до 31 марта 2024 г. составит 31,2 тыс. т с концентрацией радиоактивного трития в  $5,0 \cdot 10^9$  Бк. Власти Японии утверждают, что сброс воды не угрожает окружающей среде и людям. Такого же мнения придерживаются и в МАГАТЭ, однако протестные акции по всему миру (БСЧС) масштабны, поддерживаются ангажированными политическими движениями и находятся в фокусе средств массовой информации.

Анализ изменений радиоактивности трития в объеме воды, планируемом к сбросу до 31 марта 2024 г., проиллюстрируем несложными расчетами при следующих условиях и допущениях:

1. Начиная с 31 марта 2024 г. не будет учитываться, что в дальнейшем, например, через 5, 10, 50, 123,2 (это десять периодов полураспада трития) лет, сбрасываемая в океан вода с концентрацией трития  $5,0 \cdot 10^9$  Бк будет разбавляться миллионами тонн океанической воды.

2. Общий объем воды  $V$ , планируемой к сбросу до 31 марта 2024 г., составит 31,2 тыс. т или  $V=31\,200\,000$  л.

3. Исходная радиоактивность  ${}^3\text{H}$  в воде, планируемой к сбросу до 31 марта 2024 г.:

$$A_0 = 5,0 \cdot 10^9 \text{ (Бк)} / 31\,200\,000 \text{ (л)} = 160,2564 \text{ (Бк/л)}.$$

Согласно закону радиоактивных превращений, имеющему следующий вид:

$$A_t = A_0 \cdot e^{(-0,693 \cdot t / T_{1/2})},$$

радиоактивность трития  $A_t$  через время  $t$  будет принимать значения, указанные в таблице.

Таблица

#### Кинетика изменения радиоактивности трития в воде, планируемой к сбросу до 31 марта 2024 г.

№ п/п	Дата	Период $t$ , прошедший от 31.03.2024, (лет)	Радиоактивность трития	
			Бк/л	Ки/л
1	31.03.2024	0	160,26	$4,33 \cdot 10^{-9}$
2	31.03.2029	5	121,00	$3,27 \cdot 10^{-9}$
3	31.03.2034	10	91,31	$2,47 \cdot 10^{-9}$
4	31.03.2074	50	9,62	$2,6 \cdot 10^{-10}$
5	31.05.2147	123,2	0,157	$4,24 \cdot 10^{-12}$

Таким образом, радиоактивность трития со временем значительно (на порядки) уменьшится по сравнению с предельно допустимыми концентрациями.

Сброс воды с АЭС «Фукусима-1» прямого влияния на безопасность людей не окажет, но возможно опосредованное влияние вследствие миграций гидробионтов, организмы которых способны накапливать радиоактивные вещества и переносить их посредством океанических течений.

С учетом изложенного чтобы полностью исключить возможность попадания на стол добытых в океане загрязненных радионуклидами продуктов и вызываемых этим протестов со стороны населения всего земного шара, следует на определенный период установить радиометрический контроль за морепродукцией. Со временем, когда обстановка улучшится, режим контроля можно будет значительно смягчить.

Перспективы широкого применения концепции «треугольник ЧС» («emergency triangle») усматриваются в построении «пространства ЧС» («emergency space»), представляющего собой массив данных о ЧС, собираемый в целях анализа и интерпретации информации, а также установления причинно-следственных связей и прогнозирования.



Принцип формирования «пространства ЧС» основывается на выявлении связей как внутри «треугольников ЧС», так и между ними. На сегодня массив данных можно представить в виде двумерного пространства, визуализированного на рис. 6.

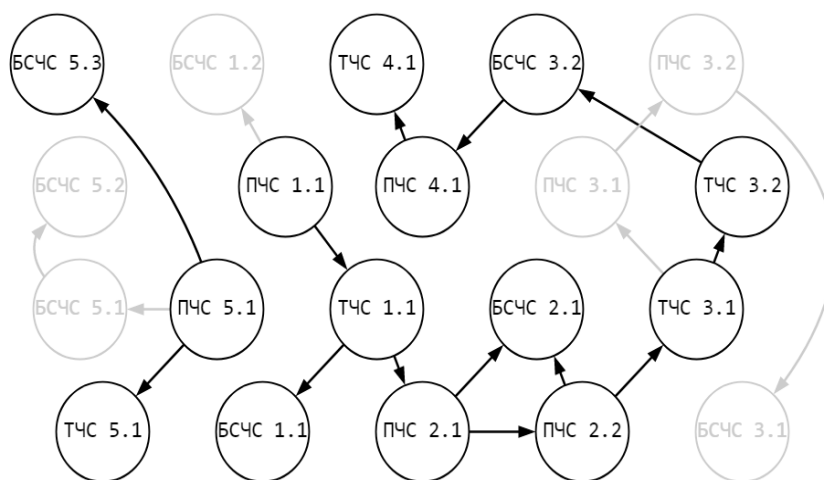


Рис. 6. Двумерное представление «пространства ЧС»

При формировании «пространства ЧС» авторы предлагают исходить из гипотезы, что причинно-следственные связи внутри и между «треугольниками ЧС» не условно возможны, а объективно существуют. Вероятно, некоторые из них остаются либо незамеченными специалистами, например, по причине низкой общественной активности или засекреченности, либо «спящими», проявления которых мир ощутит спустя годы (обозначены на рис. 6 серым цветом). Их своевременное выявление и прогнозирование предупредит планету о будущих катастрофах.

Построение «пространства ЧС» в системе Единой государственной системы предупреждения и ликвидации ЧС предлагается осуществить с применением технологии Больших данных (BigData). Процесс формирования Больших данных имеет начало и не имеет конца. Они создаются из «ядра» первоначальных данных и разворачиваются во времени во всех направлениях.

### Заключение

Авария 2011 г. на АЭС в японском г. Фукусима (ТЧС) спустя 12 лет вызывает активизацию протестов в разных уголках планеты (БСЧС) как реакцию на сброс тритийсодержащего водного теплоносителя в океан, способного вызывать различные ПЧС. Это на конкретном примере подтверждает применимость новой причинно-следственной трактовки развития и трансформации ЧС – «треугольника ЧС».

Ситуация с «Фукусимой-1» показывает, что одна ЧС способна оказать влияние на каскадный генезис других не только в текущем временном интервале или одной территориальной локации. Так, например, технологию добычи сланцевой нефти можно рассматривать как ТЧС, результатом которой через десятки лет станут экологические деформации – предвестники ПЧС, которые, с учетом запредельной, теперь уже глубоко политизированной активности «зеленых» движений, несомненно, приведут к БСЧС.

Принятие за отправные точки первых выявленных природных, техногенных и биолого-социальных ЧС, фиксация в хронологическом порядке по принципу «домино» последующих аварий и природных катаклизмов, их негативных проявлений и развитий обеспечат, с учетом концепций «треугольника ЧС» и «пространства ЧС», значительные преимущества в вопросах прогнозирования ЧС.

**Список источников**

1. Кондратьев Н.Д. Избранные сочинения. М.: Экономика, 1993.
2. Ивахнюк С.Г. Каскадность взаимных возникновения и развития чрезвычайных ситуаций – результат научно-технического прогресса // Проблемы управления рисками в техносфере. 2022. № 1 (61). С. 67–77.
3. Khazai B., Daniell J., Wenzel F. The March 2011 Japan earthquake: analysis of losses, impacts, and implications for the understanding of risks posed by extreme events // TATuP-Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis. 2011. Т. 20. № 3. С. 22–33.
4. The Fukushima Daiichi accident. Vienna: IAEA, 2015. 262 p.
5. Steinhauser G., Brandl A., Johnson T.E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts // Science of the total environment. 2014. Т. 470. С. 800–817.
6. IAEA. Criteria for radionuclide activity concentrations for food and drinking water. Vienna: IAEA, 2016. 60 p.
7. Impacts of the Fukushima nuclear accident on fishery products and fishing industry / T. Morita [et al.] // Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems: Long-Term Study on the Fukushima Nuclear Accident. 2020. С. 31–41.
8. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties / G. Audi [et al.] // Nuclear physics A. 2003. Т. 729. № 1. С. 3–128.
9. Tritium, Radiation Protection Limits, and Drinking Water Standards. U.S.NRC, 2011. 7 p.
10. Fairlie I. Tritium hazard report: pollution and radiation risk from Canadian nuclear facilities // Greenpeace. June. 2007.
11. Журавлёв В.Ф. Распределение, биологическое действие и ускорение выведения радиоактивных изотопов / под ред. Ю.И. Москалева. М.: Медицина, 1964. С. 202–209.
12. Калистратова В.С. Радиационная медицина: рук-во / под ред. Л.А. Ильина. М.: ИздАТ, 2004. Т. 1. С. 604–613.
13. Кочетков О.А., Монастырская С.Г., Кабанов Д.И. Проблемы нормирования техногенного трития // Саратовский научно-медицинский журнал. 2013. Т. 9. № 4. С. 815–818.
14. Robin L., Hilland J., Johnson R. Metabolism and dosimetry of tritium // Health Phys. 1993. № 65 (6). P. 628–647.
15. Уровень и характер распределения трития в воздушном бассейне СИП / О.Н. Ляхова [и др.] // Тезисы докладов V Междунар. конф. Курчатова, 2012. С. 30.
16. Рихванов Л.П. Радиоактивные элементы в окружающей среде и проблемы радиоэкологии: учеб. пособие. Томск: STT, 2009. 430 с.
17. The science and global standards behind Fukushima's ALPS treated water // Reuters Plus, 2023. URL: <https://www.reuters.com/plus/the-science-and-global-standards-behind-fukushimas-alps-treated-water> (дата обращения: 18.12.2023).

**References**

1. Kondrat'ev N.D. Izbrannye sochineniya. M.: Ekonomika, 1993.
2. Ivahnyuk S.G. Kaskadnost' vzaimnyh voznikoveniya i razvitiya chrezvychajnyh situacij – rezul'tat nauchno-tehnicheskogo progressa // Problemy upravleniya riskami v tekhnosfere. 2022. № 1 (61). S. 67–77.
3. Khazai B., Daniell J., Wenzel F. The March 2011 Japan earthquake: analysis of losses, impacts, and implications for the understanding of risks posed by extreme events // TATuP-Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis. 2011. Т. 20. № 3. S. 22–33.
4. The Fukushima Daiichi accident. Vienna: IAEA, 2015. 262 p.
5. Steinhauser G., Brandl A., Johnson T.E. Comparison of the Chernobyl and Fukushima nuclear accidents: a review of the environmental impacts // Science of the total environment. 2014. Т. 470. S. 800–817.

6. IAEA. Criteria for radionuclide activity concentrations for food and drinking water. Vienna: IAEA, 2016. 60 p.
7. Impacts of the Fukushima nuclear accident on fishery products and fishing industry / T. Morita [et al.] // *Low-Dose Radiation Effects on Animals and Ecosystems: Long-Term Study on the Fukushima Nuclear Accident*. 2020. S. 31–41.
8. The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties / G. Audi [et al.] // *Nuclear physics A*. 2003. T. 729. № 1. S. 3–128.
9. Tritium, Radiation Protection Limits, and Drinking Water Standards. U.S.NRC, 2011. 7 p.
10. Fairlie I. Tritium hazard report: pollution and radiation risk from Canadian nuclear facilities // *Greenpeace*. June. 2007.
11. Zhuravlyov V.F. Raspredelenie, biologicheskoe dejstvie i uskorenie vyvedeniya radioaktivnyh izotopov / pod red. Yu.I. Moskaleva. M.: Medicina, 1964. S. 202–209.
12. Kalistratova B.C. Radiacionnaya medicina: ruk-vo / pod red. L.A. Il'ina. M.: IzdAT, 2004. T. 1. S. 604–613.
13. Kochetkov O.A., Monastyrskaya S.G., Kabanov D.I. Problemy normirovaniya tekhnogenogo tritiya // *Saratovskij nauchno-medicinskij zhurnal*. 2013. T. 9. № 4. S. 815–818.
14. Robin L., Hilland J., Johnson R. Metabolism and dosimetry of tritium // *Health Phys.* 1993. № 65 (6). P. 628–647.
15. Uroven' i harakter raspredeleniya tritiya v vozdušnom bassejne SIP / O.N. Lyahova [i dr.] // *Tezisy dokladov V Mezhdunar. konf. Kurchatov*, 2012. S. 30.
16. Rihvanov L.P. Radioaktivnye elementy v okruzhayushchej srede i problemy radioekologii: ucheb. posobie. Tomsk.: STT, 2009. 430 s.
17. The science and global standards behind Fukushima's ALPS treated water // *Reuters Plus*, 2023. URL: <https://www.reuters.com/plus/the-science-and-global-standards-behind-fukushimas-alps-treated-water> (data obrashcheniya: 18.12.2023).

**Информация о статье:**

Статья поступила в редакцию: 11.01.2024; одобрена после рецензирования: 26.02.2024;  
принята к публикации: 04.03.2024

**The information about article:**

The article was submitted to the editorial office: 11.01.2024; approved after review: 26.02.2024;  
accepted for publication: 04.03.2024

*Информация об авторе:*

**Ивахнюк Сергей Григорьевич**, заместитель начальника научно-исследовательского института перспективных исследований и инновационных технологий в области безопасности жизнедеятельности Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), кандидат технических наук, e-mail: [sgi78@mail.ru](mailto:sgi78@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4651-8211>, SPIN-код: 2144-4276

**Королева Людмила Анатольевна**, профессор кафедры пожарной, аварийно-спасательной техники и автомобильного хозяйства Санкт-Петербургского университета ГПС МЧС России (196105, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 149), доктор технических наук, доцент, e-mail: [koroleva.l@igps.ru](mailto:koroleva.l@igps.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN-код: 6101-9772

**Лугавцов Олег Валентинович**, доцент кафедры инженерной защиты окружающей среды Санкт-Петербургского государственного технологического института (технического университета) (190013, Санкт-Петербург, Московский пр., д. 24-26/49), кандидат технических наук, e-mail: [cnsr-lov@mail.ru](mailto:cnsr-lov@mail.ru)

*Information about the authors:*

**Ivakhnyuk Sergey G.**, deputy head of the Research institute of advanced research and innovative technologies in the field of life safety of the Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), candidate of technical sciences, e-mail: [sgi78@mail.ru](mailto:sgi78@mail.ru), <https://orcid.org/0000-0003-4651-8211>, SPIN: 2144-4276

**Koroleva Lyudmila A.**, professor of the department of fire, rescue equipment and automobile economy of Saint-Petersburg university of State fire service of EMERCOM of Russia (196105, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 149), doctor of technical sciences, associate professor, e-mail: [koroleva.l@igps.ru](mailto:koroleva.l@igps.ru), <https://orcid.org/0000-0001-5661-5774>, SPIN: 6101-9772

**Lugavtsov Oleg V.**, associate professor of the department of engineering environmental protection Saint-Petersburg state technological institute (technical university) (190013, Saint-Petersburg, Moskovsky ave., 24-26/49), candidate of technical sciences, e-mail: [cnsr-lov@mail.ru](mailto:cnsr-lov@mail.ru)