

Брягиня Дмитрий Леонидович

студент

Московский технический университет связи и информатики

г. Москва, Россия

Савостин Сергей Дмитриевич

к.т.н., доцент

Московский технический университет связи и информатики

г. Москва, Россия

Ерофеева Виктория Вячеславовна^{1,2}

к.б.н., доцент

¹Московский технический университет связи и информатики

г. Москва, Россия

²Российский университет дружбы народов имени Патриса Лумумбы

г. Москва, Россия

Экологическая безопасность и последствия крупнейших аварий на АЭС: сравнительный анализ

Аннотация. В статье представлен обобщенный сравнительный анализ трёх крупнейших аварий в истории ядерной энергетики: на АЭС «Три-Майл-Айленд» (США, 1979), Чернобыльской АЭС (СССР, 1986) и АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011). Исследование базируется на современных эпидемиологических, экологических и социологических данных, а также на материалах международных агентств по ядерной безопасности. Рассматриваются различия в сценариях выбросов радионуклидов, специфика формирования дозовых нагрузок на население и окружающую среду, а также долгосрочные психосоциальные последствия. Особое внимание уделено тому, как события повлияли на пересмотр мировых стандартов безопасности, развитие культуры ответственности на атомных объектах и совершенствование систем реагирования при чрезвычайных ситуациях.

Ключевые слова: ядерная безопасность, радиационные аварии, Чернобыль, Фукусима, Три-Майл-Айленд, дозиметрия, психосоциальные последствия, радиоэкология.

Bryagina Dmitry Leonidovich

student

Moscow Technical University of Communications and Informatics

Moscow, Russia

Savostin Sergey Dmitrievich

PhD, Associate Professor

Moscow Technical University of Communications and Informatics

Moscow, Russia

Erofeeva Viktoria Vyacheslavovna^{1,2}

PhD, Associate Professor

¹Moscow Technical University of Communications and Informatics

Moscow, Russia

²Peoples' Friendship University of Patrice Lumumba

Moscow, Russia

Environmental safety and the consequences of major nuclear power plant accidents: a comparative analysis

Abstract. The article presents a comprehensive comparative analysis of the three largest

nuclear power accidents in history: at the Three Mile Island Nuclear Generating Station (USA, 1979), the Chernobyl Nuclear Power Plant (USSR, 1986), and the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant (Japan, 2011). The study is based on contemporary epidemiological, environmental, and sociological data, as well as materials from international nuclear safety agencies. It examines the differences in radionuclide release scenarios, the specifics of dose formation for the population and the environment, and the long-term psychosocial consequences. Particular attention is paid to how these events influenced the revision of global safety standards, the development of a culture of responsibility at nuclear facilities, and the improvement of emergency response systems.

Keywords: nuclear safety, radiological accidents, Chernobyl, Fukushima, Three Mile Island, dosimetry, psychosocial consequences, radioecology.

Введение

Ядерная энергетика является ключевым элементом в низкоуглеродной генерации, но её появление и развитие всегда сопровождалось вопросами обеспечения должного уровня безопасности. За всю историю атомной энергетики произошло свыше ста аварий различной степени тяжести, но лишь три считаются наиболее масштабными и затрагивают экологические, экономические, социальные и политические сферы жизни. Каждая катастрофа оказала собственное влияние на развитие данной отрасли и затронула сотни людей. События на атомных станциях: «Три-Майл-Айленд» (расположена в штате Пенсильвания, вблизи города Гаррисберг, США), катастрофа на Чернобыльской АЭС (город Припять, Украинская ССР) и АЭС «Фукусима-1» (город Окума – Япония) являются не только трагическими авариями, которые характеризуются значительными масштабами последствий, но и важными уроками, после которых эксплуатация атомных станций потерпела значительные изменения.

Исторический контекст и причины аварий

Каждое событие имеет уникальный характер и носит различный тип уязвимостей. **АЭС "Три-Майл-Айленд" (США, 28 марта 1979 год):** авария на атомной станции стала первым крупным инцидентом в истории ядерной энергетики (пятый уровень по шкале INES). Началось всё с небольшого технического сбоя в системе охлаждения, сбой повлек за собой более серьёзные проблемы. Произошел отказ клапана, отвечавшего на сброс давления из-за чего произошла утечка, далее ручное отключение аварийного охлаждения, что привело к частичному расплавлению активной зоны. Стоит отметить, что гермооболочка смогла выдержать давление и практически полностью сдержала выбросы. Произошедшие события побудили власти США пересмотреть систему подготовки персонала в сфере ядерной промышленности.

Чернобыльская АЭС (СССР, 26 апреля 1986 год): авария на Чернобыльской АЭС стала катастрофой 7-го уровня по шкале INES и является крупнейшим техногенным происшествием в истории человечества. Всё началось с эксперимента на четвёртом энергоблоке, когда мощность реактора была снижена, а часть систем безопасности отключён. В сочетании с конструктивными особенностями реактора РБМК-100 это привело к взрыву и дальнейшему пожару, разрушившему верхние этажи здания. Без полноценного контеймента продукты деления были выброшены в атмосферу и стали распространяться в атмосфере на обширные территории СССР и Европы, вынудив эвакуировать сотни тысяч людей и остановить долгосрочное загрязнение среды. Авария наглядно продемонстрировала, как человеческий фактор и не безопасная конструкция самого реактора может привести к катастрофическим последствиям.

АЭС «Фукусима-1» (Япония, 11 марта 2011 год): данная авария также считается аварией 7-го уровня согласно шкале INES, но, в отличие от двух других, была инициирована внешними природным факторам. Землетрясение магнитудой 9 спровоцировало остановку реакторов. Вслед за ним возникло мощное цунами высотой волн 13-15 м; защитное сооружение было рассчитано на 5.7 м, что привело к затоплению резервных дизель-генераторов, питавших систему охлаждения. Потеря охлаждения послужила к перегреву

активных зон реакторов, что привело к образованию водорода и сериям взрывов. Верхние части зданий реакторов были разрушены, что привело к попаданию радиоактивных веществ в воду и воздух. Катастрофа развивалась стремительно, доказав несовершенство современных инженерных решений перед стихийными бедствиями.

Воздействие радиации и его влияние на здоровье человека.

Сравнительная характеристика выбросов

Медицинские последствия трёх крупных аварий на АЭС отличались в зависимости от состава выбросов и их масштабов.

На Три-Майл Айленд выброс в основном состоял из инертных газов – около 13 млн кюри, ^{131}I было меньше 20 кюри. Для жителей в радиусе 16 км средняя доза облучения составила 0,08 мЗв, что примерно соответствует одной рентгеновской процедуре грудной клетки. Долгосрочные исследования, проведённые спустя 40 лет, не выявили значительного увеличения числа онкологических заболеваний, связанных с аварией.

Чернобыльская катастрофа имела совершенной иной масштаб. В атмосферу были выброшены радионуклиды, включая ^{131}I , ^{137}Cs и ^{90}Sr . Особенно опасным оказалось то, что население не было вовремя поставлено в известность и не была проведена йодная профилактика. В результате этого, среди детей развился всплеск заболеваний раком щитовидной железы – зафиксировано свыше 6000 случаев. Кроме того, был диагностирован острый лучевой синдром у 134 ликвидаторов и сотрудников АЭС.

На Фукусиме выброс ^{137}Cs составил примерно 10-20% от Чернобыльского. Благодаря оперативной эвакуации и своевременному контролю продуктов питания, средняя доза облучения щитовидной железы у детей составила 10–15 мГр, что существенно ниже уровней, зарегистрированных при Чернобыльской аварии. случаев острого лучевого синдрома зафиксировано не было.

Таблица 1.

Сравнительный анализ общих выбросов выбросов и случаев заболевания среди населения в трёх катастрофах

АЭС	Общий выброс (радиоактивные элементы)	Размер выброса ^{131}I	Случаи рака щитовидной железы	ОЛС
Три-Майл Айленд	$\approx 4.8 \times 10^{18}$ Бк инертных газов	$< 7.4 \times 10^{12}$ Бк	Не выявлено	Не выявлено
Чернобыль	$\approx 5.2 \times 10^{18}$ Бк ^{131}I , ^{137}Cs и ^{90}Sr	1.8×10^{18} Бк	Более 6000 случаев у детей	134 случая среди ликвидаторов
Фукусима	$\approx 0.5 - 1.0 \times 10^{18}$ Бк	$< 0.1 \times 10^{18}$ Бк	Не выявлено	Не выявлено

Долгосрочные медицинские риски

Современные исследования [6, 10] показывают то, что последствия Чернобыльской аварии проявились в основном через случайные эффекты, заключались они в основном в росте заболеваемости раком, в то время как радиационные для жителей, связанных с аварией на Фукусиме оцениваются как низкие. Согласно глобальным данным, рост вероятности развития онкологических заболеваний среди населения Японии в мировом масштабе остаётся минимальным и практически не отличается от показаний в других странах, но, всё же, некоторые группы остаются более уязвимыми и требуют постоянного наблюдения [10]. Детям уделяют особое внимание, так как их организм особенно чувствителен к воздействию ионизирующего излучения, что подтверждается анализом последствий всех трёх крупных аварий [16].

Экологические последствия: сравнительный анализ сред.

Влияние на окружающую среду имеет разные характеристики выбросов в зависимости от географии и характера выбросов.

Наземные экосистемы и биоаккумуляция

Чернобыль: радиоактивное загрязнение после аварии распространилось на значительную часть Европы, охватывая порядка 200 тыс. км². Наиболее известной зоной экологического воздействия стал так называемый «Рыжий лес», который расположен западнее 4-го энергоблока. Высокий уровень облучения привёл к гибели хвойных деревьев. В долгосрочной перспективе остаётся проблема, связанная с перемещением ¹³⁷Cs и ⁹⁰Sr в почвенно-растительных комплексах. Особенно, что касается лесных экосистемах, где радиация сохраняется дольше, наибольшему воздействию подвержены грибы, ягоды и дикие животные, что связано с лесным круговоротом веществ [2, 12].

Фукусима: в отличие от Чернобыля, основная часть загрязнения пришлась на горнолесные территории, которые в общей сложности занимают около 70% всей затронутой зоны. Сложный рельеф и густая растительность делают дезактивацию лесов практически невозможным из-за водных стоков, которые повторно загрязняют очищенные низинные территории [2, 8].

Три-Майл Айленд: в экологическом аспекте последствия аварии минимальны. Результаты длительного наблюдения не выявили значимых концентраций радионуклидов в почте или в ближайшем к станции биоразнообразии.

Водная среда

Ключевое различие между аварией в Чернобыле и на Фукусиме заключается преимущественно в том, куда именно попали радиоактивные вещества. В Чернобыле основную опасность представляло загрязнение рек Припять и Десна, которые обеспечивали питьевой водой крупные населённые пункты. Для Фукусимы же совершенно иное распространение: 80% всех радиоактивных выпадений пришлось на акваторию Тихого океана, тем самым, это стало крупнейшим разовым поступлением радионуклидов в морскую воду. После выброса, в природных рыбах поблизости станции, наблюдалось повышенное содержание цезия, что требовало ужесточения контроля в области рыболовства [2, 8].

Социально-экономические и психологические эффекты

Эвакуация и переселение

Социальные и психологические аспекты различных аварий могут оказаться куда масштабнее, чем ущерб от самой катастрофы.

Эвакуация и переселения

Масштабы вынужденного переселения были значительными: после аварии в Чернобыле были эвакуированы порядка 335 тыс. человек, а после аварии на Фукусиме – около 160 тыс. человек. Различные исследования показывают, что эвакуация, особенно людей пожилого возраста из больниц и домов престарелых во время событий в Фукусиме привело к повышению смертности, связанной со стрессом, ухудшением хронических заболеваний и резким изменением условий жизни. В ряде работ такая избыточная смертность рассматривается как превышающая предполагаемые риски от радиационного воздействия [13].

Психологические последствия

Вне зависимости от масштабов всех трёх аварий, психологические нарушения имели схожий характер.

Три-Майл-Айленд: физический ущерб из всех трёх аварий можно оценить, как наиболее незначимый, но несмотря на это, среди местных жителей фиксировали повышение уровня тревожности и стресса. Так же не мало важную роль сыграло недоверие к официальным источникам и неопределённость по отношению к возможным последствиям.

Чернобыль и Фукусима: данные катастрофы имеют более выраженные психические реакции, которые также включают в себя признаки ПТСР, депрессии и различных других тревожных расстройств. Наиболее значимым оказался факт утраты жилья и привычной социальной жизни, экономической нестабильности, изменения образа жизни, а также психологическое давление, связанное с группами пострадавших

(«хибакуся» в Японии и «чернобыльцы» в СССР). Согласно ряду исследований, страх перед радиацией оказывал куда более значимое негативное влияние, нежели оно было на самом деле [5, 6].

Таблица 2.

Сравнение медицинских рисков, типа и среды загрязнения, кол-во эвакуированных жителей и психологических последствий в трёх авариях

Аспект	Чернобыль	Фукусима	Три-Майл-Айленд
Долгосрочные медицинские риски	Существенный рост случаев онкологии, особенно среди населения, подвергшегося облучению	Радиационные риски оцениваются как низкие; значимого роста рака не выявлено	Радиационный вред минимален
Основной тип загрязнения суши	Обширные лесные и сельскохозяйственные территории Европы; длительная миграция ^{137}Cs и ^{90}Sr	Загрязнение горнолесных массивов, 70% наземной территории	Значимого загрязнения почвы не выявлено
Влияние на водную среду	Опасность загрязнения бассейнов Припяти и Днестра	До 80% выпадений - в Тихий океан; биоаккумуляция цезия в придонных рыбах	Существенного влияния на воду не отмечено
Эвакуация	~335 000 человек	~160 000 человек	Локальная эвакуация, значительно меньше
Психологические последствия	Высокие уровни ПТСР, тревожности, депрессий; сильная стигматизация	Аналогично Чернобылю: ПТСР, тревожность, стигма «хибакуся»	Длительная тревожность и стресс при отсутствии физического вреда

Меры реагирования и стратегия восстановления Управления чрезвычайными ситуациями

Три-Майл-Айленд: авария показала, что коммуникации и решения между сотрудниками и властями могут быть несогласованными. Это побудило создать независимые надзорные органы, которые могли бы быстро реагировать и обеспечить согласованность информации. В США была сформулирована функция NRC (Nuclear Regulatory Commission), которая стала контролировать безопасность АЭС и отвечать за выдачу лицензий, также был создан INPO (Institute of Nuclear Power Operations) – отраслевое объединение, задача которого заключается в повышении стандартов безопасности, обучением персонала и обмена опытом между станциями. Данные меры смогли улучшить координацию действий в аварийных ситуациях позволили внедрить новые стандарты для недопущения подобных инцидентов.

Чернобыльская катастрофа: в особенности продемонстрировала, насколько важны международное сотрудничество и обмен данными. Авария побудила создать и укрепить международные и национальные органы надзора за ядерной безопасностью. В Советском Союзе были усилены функции Министерства атомной энергии (Minatom), а позже (5 декабря 2000 года) был создан Государственный инспекторат ядерного регулирования (SNRIU), которые отвечал за контроль и политику безопасности в сфере ядерной энергетики. На международном уровне была основана Всемирная ассоциация операторов АЭС (WANO), задача которой состоит в обмене опытом и повышением стандартов безопасности на атомных станциях по всему миру.

Фукусима: стратегия дезактивации была построена на зонировании всей территории и постепенного снятия верхнего слоя почвы в населённых пунктах, однако после появилась проблема в хранении миллионов мешком с загрязнённым грунтом и обращении с очищенной водой, содержащей в себе тритий [3, 8]. В 2012 году был создан Nuclear Regulation Authority (NRA) независимый регулятор, отвечающий за безопасность на АЭС и разделяет функции надзора и развития ядерной отрасли. Также был сформулирован Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation (NDF), занимающаяся компенсацией пострадавшим и управлением программой вывода из эксплуатации реакторов.

Культура безопасности

Все три аварии стали основополагающим фактором в разные времена, которые побуждали пересматривать подходы к безопасности в отрасли ядерной энергетики. Инцидент на Три-Майл-Айленд сосредоточил внимание на снижении рисков операторов и более тщательной подготовке персонала.

Чернобыльская катастрофа подчеркнула, что прежде всего должна быть обеспечена должная безопасность объекта.

Авария на Фукусиме выявила необходимость учитывать редкие, но катастрофические природные явления, что привело к пересмотру нагрузочного тестирования на станциях и введению пассивных систем безопасности, способных функционировать даже при полном обесточивании [3].

Заключение

Сравнительный анализ аварий на АЭС «Три-Майл-Айленд», Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1» позволяет выделить несколько ключевых выводов.

Медицинские последствия. Существенные прямые радиационные эффекты, включая острый лучевой синдром и рак щитовидной железы, наблюдались в значительных масштабах только в Чернобыле. В случаях Фукусимы и ТМІ основное влияние на здоровье населения связано с психосоциальными факторами и косвенными последствиями эвакуации.

Экологические последствия. Характер загрязнения в каждом случае был уникален: масштабное и воздушное распространение радионуклидов в Чернобыле, сочетание океанического и лесного загрязнения в Фукусиме и минимальное экологическое воздействие на Три-Майл Айленде.

Социальные последствия. Все три аварии показали, что техническая катастрофа неизбежно перерастает в сложный социально-психологический кризис. Восстановление доверия общества, поддержка эвакуированных жителей и снижение уровня стресса и стигматизации оказываются не менее важными, чем физическая дезактивация территорий.

Будущее атомной энергетики во многом зависит от способности отрасли учитывать все эти уроки, переходя от чисто технического контроля к комплексному управлению рисками, которое учитывает человеческий фактор, природные угрозы и социальные последствия.

Список источников

1. Капарич Дж. С., Донор Л., Досманос Е. Б., Эсторико Г. С. Сравнительный обзор рисков крупнейших ядерных катастроф: анализ облучения, воздействия на окружающую среду и последствий для здоровья в результате наиболее серьёзных аварий. *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, 2025.
2. Штайнхойзер Г., Брандл А., Джонсон Т. Сравнение Чернобыльской и Фукусимской ядерных аварий: обзор воздействий на окружающую среду. *The Science of the Total Environment*, 2014.
3. Хуан Б. и др. Оценка риска и управление утечкой радионуклидов на атомных электростанциях. *National Science Open*, 2024.
4. Мамун М. Недавний ядерный взрыв на Фукусиме, чернобыльские

радиоактивные осадки, авария на Три-Майл-Айленде и взрыв атомной бомбы – переосмысление воздействия ядерного излучения на здоровье человека. *Iranian Journal of Radiation Research*, 2013.

5. Оэ М. и др. Последствия для психического здоровья ядерных катастроф на Три-Майл-Айленде, в Чернобыле и на Фукусиме: обзорный анализ. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2021.

6. Хасегава А. и др. От Хиросимы и Нагасаки до Фукусимы 2: Влияние радиации на здоровье и другие проблемы со здоровьем после ядерных аварий, с акцентом на Фукусиму.

7. Длугош-Лисецка М. и др. Судьба и последствия для здоровья радиоактивных ультрадисперсных аэрозолей в воздухе. *Scientific Reports*, 2025.

8. Онда Ю. и др. Радионуклиды с АЭС «Фукусима-1» в наземных системах. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2020.

9. Уилсон Р. Т. и др. Что мы узнали о последствиях для здоровья спустя более 40 лет после аварии на Три-Майл-Айленде? Анализ и процессный обзор. *Risk, Hazards & Crisis in Public Policy*, 2022.

10. Хуве Дж. Э. Т., Джейкобсон М. З. Глобальные последствия для здоровья аварии на АЭС «Фукусима-1». *Energy and Environmental Science*, 2012.

11. Улановский А. и др. Внешнее облучение населения радионуклидами, осаждающимися в наземной среде после аварии на АЭС «Фукусима-1»: модель НКДАР ООН 2020 года. *Annals of the ICRP*, 2024.

12. Балонов М. Влияние на здоровье аварий на реакторах с особым вниманием к Чернобылю. *Japanese Journal of Health Physics*, 2019.

13. Хасегава А. и др. Чрезвычайные меры реагирования и последствия для здоровья после аварии на Фукусиме; Эвакуация и переселение. *Clinical Oncology*, 2016.

14. Ори К. и др. Последствия загрязнения атмосферы радиоактивным йодом: аварии в Чернобыле и на Фукусиме. *Endocrine*, 2020.

15. Онищенко Г. Г. и др. Радиологические последствия и уроки радиационных аварий на Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1». *Радиационная гигиена*, 2021.

16. Фусики С. Радиационная опасность для детей – Уроки Чернобыля, Три-Майл-Айленда и Фукусимы. *Brain and Development*, 2013.