

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «РОССИЙСКИЙ ЭКОНОМИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМ. Г.В. ПЛЕХАНОВА»

На правах рукописи

Арон Дмитрий Викторович

**МЕТОДЫ ОЦЕНКИ ЭФФЕКТИВНОСТИ СТРАТЕГИЙ РЕАБИЛИТАЦИИ
РАДИАЦИОННО ЗАГРЯЗНЕННЫХ ТЕРРИТОРИЙ**

08.00.13 – Математические и инструментальные
методы экономики (экономические науки)

Диссертация
на соискание ученой степени
кандидата экономических наук

Научный руководитель
Доктор экономических наук
профессор **Тихомиров Н.П.**

Москва – 2019

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
Глава 1 Теоретико-методологические проблемы организации и проведения реабилитации радиационно загрязненных территорий	13
1.1 Анализ практики ликвидации последствий радиационных аварий	13
1.2 Теоретические подходы к обеспечению безопасности населения при радиационных авариях	33
1.3 Теоретические подходы к оценке экономического ущерба при радиационном воздействии на население и загрязнении территории	49
1.4 Метод оценки эффективности дезактивации территорий с учетом изменяющейся радиационной обстановки	58
1.5 Методы моделирования экономических последствий радиационных аварий	68
Глава 2 Методы рационализации и оптимизации стратегий реабилитации радиационно загрязненных территорий	72
2.1 Критерии эффективности стратегий вмешательства на радиационно загрязненных территориях	72
2.2 Практические оценки целесообразности вмешательства при радиационном загрязнении территорий	80
2.3 Совершенствование подходов к формированию эффективных стратегий вмешательства за счет уточнения состава и оценок ущербов	83
Глава 3 Информационное обеспечение управления ликвидацией последствий радиационной аварии	92
3.1 Структура информационной системы для оценки последствий радиационного загрязнения территорий	92
3.2 Первичные оценки радиационных и социально-экономических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1»	96
3.3 Информационная система оценки экономических последствий радиационной аварии на основе реляционной базы данных	101
3.4 Выбор методов оценки экономического ущерба при реализации мер поставарийного вмешательства	112
3.5 Анализ эффективности стратегии вмешательства при ликвидации радиационной аварии на АЭС «Фукусима-1»	115
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	128

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ	133
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	135
ПРИЛОЖЕНИЕ А (СПРАВОЧНОЕ)	149

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования. Использование ядерных технологий и радиоактивных материалов во всем мире сопровождается рисками радионуклидного загрязнения территорий, на которых ведется активная экономическая деятельность. Наиболее значимыми из них являются риски аварий на объектах атомной энергетики, инцидентов с промышленными и медицинскими радиоизотопными источниками излучения большой мощности, злонамеренных актов распространения радиоактивных материалов.

При относительной редкости инцидентов с радиационным фактором их последствия могут характеризоваться масштабным и трудноустраняемым загрязнением местности, нарушением санитарных норм проживания населения, вынужденными ограничениями или приостановкой многих видов экономической деятельности, а, в особо тяжелых случаях, острыми либо отдаленными негативными эффектами для здоровья населения и аварийного персонала. В этой связи большое внимание со стороны государственных служб и компаний, использующих ядерные технологии, уделяется вопросам предупреждения и устранения последствий аварийных ситуаций, сопровождающихся радиационным загрязнением территорий.

Российскими нормативными правовыми актами и международными нормативными документами в области обеспечения радиационной безопасности, в частности, НРБ – 99/2009, ОСПОРБ-99 и Публикациями 90 и 103 МКРЗ, предписывается принимать решения по реализации мер масштабного вмешательства в случае аварии на основании предварительного заключения об их положительном суммарном радиологическом и социально-экономическом эффекте, руководствуясь принципами нормирования доз облучения граждан, а также обоснования и оптимизации сопутствующих затрат. Вместе с тем, теоретическое обоснование и практическая реализация этих принципов не проработаны в полной мере, что обусловлено неопределённостью критериев принятия решений по защите населения и реабилитации загрязненных территорий, подходов к оценке результатов поставарийного вмешательства, а также сложностью прогнозирования негативных последствий для здоровья людей в условиях воздействия радиационного фактора. Этим обусловлена нерациональность отдельных решений о вмешательстве при ликвидации последствий радиационного загрязнения, в частности, при авариях на предприятии «Маяк», СХК, Чернобыльской АЭС и АЭС «Фукусима-1», которая также связана с несовершенством систем информационной поддержки, обеспечивающих сбор и первичную обработку исходных данных по обстановке на затрагиваемых территориях.

Недостаточная проработанность проблем определения и обоснования базирующихся на оптимизации экономических издержек рациональных стратегий защиты населения и реабилитации территорий, пострадавших в результате масштабного радиационного загрязнения, а также несовершенство систем информационного обеспечения процедур их формирования, определяют актуальность данного исследования.

Степень научной разработанности проблемы. Проблемы обеспечения радиационной безопасности и методологические подходы к обоснованию решений по защите населения и реабилитации территорий при техногенных авариях с радиационным фактором, а также вопросы оценки экономических последствий таких аварий рассматривались специалистами Международной комиссии по радиационной защите (МКРЗ), Международного агентства по атомной энергии (МАГАТЭ), Всемирной организации здравоохранения (ВОЗ), Научного комитета по действию атомной радиации (НКДАР) ООН, Комиссии США по ядерному регулированию (US NRC), Департамента энергетики США (DoE), Института ядерных технологий и радиационной защиты (НЦНИ «Демокрит», Греция), Сандийских национальных лабораторий (SNL, США), Принстонского университета (США), Открытого университета и Университета Бристоля (Великобритания), Технического исследовательского центра Финляндии (VTT), Института проблем безопасного развития атомной энергетики (ИБРАЭ РАН), РЭУ им. Г.В. Плеханова, Сумского государственного университета и некоторых других организаций.

Среди них отметим А.В. Аклеева, Р.М. Алексахина, Р.В. Арутюняна, С.Ф. Ашля, О.Ф. Балацкого, И.В. Белову, Б. Беннета, Р.П. Бёрка, Н.Е. Бикслера, Л.А. Большова, Ю.Л. Воробьева, А.А. Гусева, И.Ю. Даванкова, С.П. Киселеву, С.Н. Козьменко, М.М. Косенко, Г.Л. Коффа, М.Д. Крика, А.К. Круглова, И.И. Линге, М. Мураками, А.Л. Новоселова, С.И. Носова, И.М. Потравного, Б. Реичмута, Г.Н. Романова, И.А. Терновского, Н.П. Тихомирова, Н.А. Хиггса, Ф.Н. вон Хипшеля, Л.Е. Хольма, Д.И. Чанина, К. Экермана и многих других исследователей, результаты работ которых отражены в нормативных документах и законах Российской Федерации и многих стран мирового сообщества, регламентирующих деятельность по защите населения при техногенных чрезвычайных ситуациях. Эти результаты учитывают исторический опыт ликвидации последствий крупных радиационных аварий и других чрезвычайных ситуаций техногенного характера, их влияние на здоровье населения и экономику пострадавших регионов, включая аварии на предприятии «Маяк» (Челябинская область, 1950-е гг.), Чернобыльской АЭС (Украина, 1986 г.), Северском Химическом Комбинате (Томская область, 1993 г.), АПЛ в бухте «Чажма» (Приморский край, 1985 г.), АЭС «Фукусима-1» (Япония, 2011 г.) и менее масштабных инцидентов.

Практика ликвидации последствий радиационных аварий, на наш взгляд, свидетельствует о том, что реализованные реабилитационные мероприятия характеризуются достаточно низкой эффективностью, обусловленной значительно большей величиной затрат на их проведение по сравнению с потенциальным экономическим ущербом от загрязнения территорий и предотвращаемым вредом для здоровья населения. Это особенно явно проявляется на территориях с относительно невысокими уровнями радионуклидного загрязнения, проживание на которых не влечет клинически выявляемых негативных эффектов для здоровья. Чрезмерная затратность применяемых на практике стратегий в подобных обстоятельствах во многом обуславливается выбором необоснованно жестких дозовых критериев вмешательства, недостаточным учетом при обосновании отдельных мероприятий особенностей экономики затрагиваемых регионов, жизненного уклада их населения, закономерностей долгосрочного изменения радиационной обстановки в естественных условиях и при внешнем воздействии, а также несовершенством принимаемых методов оценки стоимости ущерба, сопряженного с радиационными рисками.

В этой связи предлагается уточнить содержание применяемых при ликвидации радиационных аварий мер вмешательства, состав связанных с ними издержек и выгод с учетом необходимости компенсации населению возникающих рисков; выработать теоретические подходы, позволяющие оптимизировать затраты и ущербы при вмешательстве за счёт управления его масштабами; проработать методику оценки изменяющейся за счет природных и антропогенных процессов радиационной обстановки, как основного фактора, определяющего эффективность дезактивации загрязненных территорий; усовершенствовать системы сбора и первичной обработки данных, обеспечивающие информационную поддержку принятия решений по реабилитации загрязненных территорий.

Относительная нерешенность проблем выработки эффективных стратегий вмешательства, а также оценки, прогнозирования и управления социальными и экономическими последствиями радиационных аварий, включая защиту населения и реабилитацию затронутых территорий в целом, определяют цели и задачи данного диссертационного исследования.

Цель и задачи исследования. Целью диссертационного исследования является разработка и верификация методологических подходов и методов обоснования эффективных стратегий по реабилитации радиационно загрязненных территорий и защите населения при ликвидации последствий радиационных аварий.

В соответствии с данной целью в работе были поставлены и решены следующие задачи:

- уточнены содержание и структура мероприятий, предпринимаемых для защиты населения и реабилитации загрязненных территорий при ликвидации последствий радиационных аварий, а также составы издержек и выгод, связанных с их реализацией;
- выявлена низкая экономическая эффективность стратегий реализации поставарийных мер защиты населения и реабилитации загрязненных территорий при ликвидации крупных радиационных аварий;
- предложены варианты условий эффективности и критериев оптимизации сценариев вмешательства при радиационных авариях;
- разработаны подходы к обоснованию эффективных стратегий поставарийного вмешательства и определению рационального состава мероприятий по защите населения и реабилитации территорий;
- разработан метод оценки закономерностей изменения уровня радиационного фона как основной характеристики, определяющей экономический эффект от дезактивации загрязненных территорий, с учетом одновременного влияния на него природных процессов и внешнего вмешательства;
- предложены постановки задач по рационализации и оптимизации стратегий вмешательства, включающих дезактивацию, временную эвакуацию или отселение жителей с радиационно загрязненных территорий, и разработаны методы их решения с учетом действующих нормативов радиационной безопасности;
- разработана информационная система оценки социально-экономической и радиационной ситуации на загрязненных территориях, обеспечивающая повышение достоверности исходных данных, используемых при принятии решений по реализации мер поставарийного вмешательства;
- получены численные оценки последствий принятых мер по защите населения и реабилитации территорий, пострадавших при аварии на АЭС «Фукусима-1», и оценена эффективность их реализации, с учетом которых и в согласии с действующими требованиями обеспечения радиационной безопасности населения предложены рекомендации по рационализации сценария поставарийного вмешательства в префектуре Фукусима.

Объект и предмет исследования. Объектом диссертационного исследования является радиационная обстановка на территориях, подвергшихся аварийному радиационному загрязнению, а также социально-экономические последствия, издержки и выгоды, сопряженные с управлением радиационной безопасностью. Предметом исследования выступают модели и методы оценки экономической и радиологической эффективности стратегий и решений по обеспечению радиационной безопасности населения и реабилитации загрязненных территорий.

Область исследования. Результаты диссертационного исследования соответствуют областям исследования п. 1.1 – Разработка и развитие математического аппарата анализа экономических систем: математической экономики, эконометрики, прикладной статистики, теории игр, оптимизации, теории принятия решений, дискретной математики и других методов, используемых в экономико-математическом моделировании и п. 2.4 – Разработка систем поддержки принятия решений для обоснования общегосударственных программ в областях: социальной; финансовой; экологической политики Паспорта специальностей ВАК при Министерстве науки и высшего образования Российской Федерации по специальности 08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики.

Теоретическая и методологическая основа исследования. Теоретической и методологической основой исследования являются работы отечественных и зарубежных специалистов в области экономики природопользования, теории принятия решений, методов оптимизации, оценки экологических и социально-экономических последствий и эффективности мер вмешательства при чрезвычайных ситуациях, радиационной и ядерной безопасности, радиологии, математической статистики.

В ходе исследования использовались законодательные, нормативные и методические указания МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН, ВОЗ, ИБРАЭ РАН, Правительства Российской Федерации, МЧС России, Министерства окружающей среды Японии, Департамента энергетики США, Сандийских национальных лабораторий, Комиссии США по ядерному регулированию, и ряда других отечественных и зарубежных организаций, занимающихся проблемами радиационной безопасности населения и ядерного аварийного реагирования.

Информационная база исследования. Информационную основу диссертационного исследования составляли:

- акты, методические указания и рекомендации МКРЗ, МАГАТЭ, НКДАР ООН, ВОЗ, законы и государственные подзаконные нормативные правовые акты Российской Федерации, внутригосударственные акты других государств, регламентирующие порядок мер защиты населения и реабилитации территорий при радиационных авариях;
- исторические данные о радиационной обстановке и социально-экономических последствиях крупных радиационных аварий на предприятии «Маяк», СХК, ЧАЭС, АЭС «Фукусима-1» и мерах, предпринятых для ликвидации их последствий, представленные в научных трудах отечественных и зарубежных исследователей;
- данные отчетов Министерства окружающей среды Японии о ходе и результатах дезактивации и реабилитации территорий;

– статистические данные Бюро статистики Японии по демографии, экономическим и хозяйственным показателям муниципальных образований префектуры Фукусима (Японии) за периоды 2004-2014 гг.;

– детализированные данные по демографии, застройке и землепользованию, предоставляемые Министерством земли, инфраструктуры, транспорта и туризма Японии на регулярной пространственной сетке высокого разрешения;

– данные Геологического общества Японии по естественному радиационному фону в префектуре Фукусима до аварии 2011 года и данные по радиационной обстановке на ее территории за период 2011-2017 гг., предоставляемые Органами ядерного регулирования Японии и Агентством по атомной энергетике Японии;

Методы исследования. В процессе исследования применялись: исторический и нормативный методы управления и оценки в экономике; методы математического моделирования физических процессов; картографические методы, в частности, метод статистической обработки многомерных данных, имеющих географическую привязку (алгоритмы интерполяции на плоскости); методы экономико-математического моделирования, включая методы математической статистики, оптимизации, экономического анализа и др. Для обработки данных использовались программные средства MS Excel, СУБД MS Access, ГИС Mapinfo, ГИС QGIS, Autodesk MathCad.

Научная новизна. Разработаны и верифицированы на реальных данных методологические подходы и методы обоснования эффективных стратегий реабилитации территорий и защиты населения при радиационных авариях, базирующиеся на сопоставлении издержек и выгод от реализации отдельных мер вмешательства, уточненных с учетом особенностей изменения радиационной обстановки, обусловленных проведением дезактивационных мероприятий и естественными процессами распада и миграции радионуклидов в окружающей среде.

Наиболее существенные результаты исследования, полученные лично автором и выдвигаемые на защиту, состоят в следующем:

– структурирован состав основных мер, применяемых при радиационных авариях для защиты населения и реабилитации загрязненных территорий (общий контроль обстановки без вмешательства, временная эвакуация жителей, ограничения на ведение экономической деятельности, долгосрочное отселение, дезактивация территорий), по стадиям ликвидации последствий аварии и действующим дозовым нормативам их применения, а также уточнен состав издержек и выгод, связанных с их реализацией, среди которых выделены: прямые затраты на проведение дезактивации, эвакуации и отселения, ущерб от облучения населения, упущенная выгода жителей из-за оставления места проживания и вводимых ограничений на

ведение экономической деятельности, утрата недвижимого имущества при отселении, приобретаемые выгоды от достигнутого за счет вмешательства снижения и предотвращения доз облучения;

– на основе анализа опыта ликвидации последствий крупных радиационных аварий выявлена низкая экономическая эффективность стратегий вмешательства при реализации поставочных мер защиты населения и реабилитации загрязненных территорий, обуславливаемая значительным превышением связанных с ними издержек над выгодами от снижения радиационного воздействия при изначально невысоком потенциальном ущербе от загрязнения;

– разработан подход к формированию рациональных стратегий вмешательства при радиационных авариях, характеризующихся превышением связанных с ними выгод над издержками, доказана целесообразность использования при их оптимизации эквивалентных критериев на максимум пользы от вмешательства, определяемой по разнице выгод и издержек, и содержательная некорректность критериев, определяемых их соотношением;

– разработан метод оценки изменения радиационного фона при дезактивации радиационно загрязненных территорий как основного параметра, определяющего экономический эффект от ее реализации, с учетом особенностей влияния на его величину хода дезактивационных работ и протекания природных процессов радиационного распада и заглупления радионуклидов в почве;

– определены условия рациональности стратегий вмешательства на радиационно загрязненных территориях для комбинации мер дезактивации, временного и долгосрочного отселения жителей по параметрам мощности дозы гамма-излучения на момент принятия решения о вмешательстве, остаточной и предотвращаемой дозы облучения населения и найдены решения задачи их оптимизации; рассмотрены возможности уточнения этих условий за счет учета компенсации населению дополнительных нерадиационных рисков и ухудшения условий проживания при оценке эффективности и оптимальности сценариев вмешательства, а также предложены альтернативные процедуры принятия решений по вмешательству, базирующиеся на попарном сравнении его конкурирующих сценариев;

– разработана информационная система оценки социально-экономической и радиационной ситуации в зонах потенциального аварийного радиационного загрязнения, обеспечивающая сбор, хранение и первичную обработку актуальных данных по радиационной обстановке, численности населения, экономике, землепользованию и зонам реализации мер поставочного вмешательства (эвакуации и отселения жителей, дезактивации территорий), принципиальная возможность реализации которой была верифицирована на данных для территорий, пострадавших при аварии на АЭС «Фукусима-1» в период 2011-2017 гг. Получены

численные оценки затрат, выгод и ущербов, связанных с последствиями данной аварии, позволяющие обосновать рациональные стратегии вмешательства в префектуре Фукусима. Сделаны выводы о эффективности реализации стратегии временной эвакуации населения и дезактивации отдельных территорий в префектуре;

– предложены рекомендации по рационализации сценария поставарийного вмешательства в префектуре Фукусима, позволяющие снизить издержки при эвакуации населения с учетом действующих нормативных ограничений на годовые дозы облучения.

Теоретическая и практическая значимость диссертационного исследования.

Теоретическая значимость данного исследования заключается:

– в развитии теории, методологии и подходов к оценке социально-экономических последствий аварийного радиационного загрязнения территорий, оптимизации затрат на реализацию мер по их реабилитации и защите населения в части уточнения структуры состава издержек и выгод, связанных с их реализацией, постановки и методов решения оптимизационных задач с критериями на максимум пользы и минимум издержек от вмешательства с учетом действующих нормативов радиационной безопасности;

– в получении детальных оценок экономических затрат, выгод и сопутствующих ущербов при ликвидации последствий крупной радиационной аварии в результате анализа актуальных данных по социально-экономической и радиационной ситуации на пострадавших территориях на примере аварии на АЭС «Фукусима-1».

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования полученных результатов и методологических подходов службами МЧС России, системой РСЧС, АО «Концерном «Росэнергоатом», а также организациями, оказывающими им научно-техническую поддержку, при прогнозировании радиационных рисков и обоснования рациональных стратегий по защите населения и реабилитации территорий при авариях на объектах атомной энергетики на территории Российской Федерации и сопредельных стран.

Апробация и внедрение результатов исследования. Основные научные положения и результаты работы докладывались и получили одобрение на Международных научно-практических конференциях: МНПК имени А.И. Китова «Информационные технологии и математические методы в экономике и управлении (ИТиММ-2016)» (Россия, г. Москва, ФГБОУ ВПО «РЭУ им. Г.В. Плеханова», май 2016 г.); VIII International Conference Optimization and Applications (ОРТИМА-2017) (Черногория, Петровац, ФИЦ ИУ РАН, Черногорская академия наук и искусств, Университет Черногории, Университет Эворы, октябрь 2017 г.); 11-я международная научно-техническая конференция «Безопасность, эффективность и экономика атомной энергетики» (Россия, г. Москва, АО «Концерн «Росэнергоатом», май 2018 г.).

Основные результаты диссертационного исследования используются в работе ИБРАЭ РАН на 2018-2020 гг. по выполнению госзадания ФАНО «Разработка фундаментальных основ, методов и моделей анализа и прогнозирования последствий радиационных аварий. Разработка информационно-моделирующих и экспертных систем поддержки принятия решений по защите населения и окружающей среды при радиационных авариях».

Отдельные результаты исследования использовались для обучения отечественных и зарубежных специалистов на базе Центрального института повышения квалификации Росатома России (г. Обнинск, 2012-2014 гг.).

Полученные в ходе диссертационного исследования результаты были апробированы автором работы в рамках участия в качестве исполнителя в грантах:

- «Разработка инструментария «зеленой» экономики с учетом совершенствования оценок ущерба от экологических нарушений» (№15-06-00535, РФФИ, 2015 г.);
- «Оценка и управление рисками потерь здоровья и жизни населения при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации» (№15-02-00412а, РГНФ, 2015-2016 гг.).

Публикации. По теме диссертационного исследования опубликовано 13 печатных работ общим объемом 5,96 п.л. (из них авторские – 4,27 п.л.), в том числе 6 печатных работ в изданиях из Перечня рецензируемых научных изданий, в которых должны быть опубликованы основные научные результаты на соискание ученой степени кандидата наук – общим объемом 2,58 п.л. (из них авторские – 1,66 п.л.) и 4 работы в изданиях из перечня Scopus общим объемом 2,03 п.л. (из них авторские – 1,74 п.л.).

Структура и объем диссертационной работы. Работа состоит из введения, трех глав, заключения, списка сокращений и условных обозначений, списка литературы и приложения. Общий объем диссертации составляет 148 страниц, включая 9 рисунков, 18 таблиц, список литературы из 143 наименования и список сокращений. Приложение на 17 страницах содержит 17 рисунков.

Глава 1 Теоретико-методологические проблемы организации и проведения реабилитации радиационно загрязненных территорий

1.1 Анализ практики ликвидации последствий радиационных аварий

Развитие и внедрение атомной энергетики во всем мире сопряжено с рисками возникновения инцидентов, следствием которых может являться радиационное загрязнение территорий, на которых ведется активная экономическая деятельность. Среди них потенциально наиболее масштабными и значимыми по своим последствиям являются аварии на объектах атомной энергетики, инциденты с промышленными и медицинскими радиоизотопными источниками большой мощности, злонамеренные акты распространения радиоактивных материалов в целях нанесения экономического ущерба и создания социальной напряженности в обществе.

При относительной редкости самих инцидентов с радиационным фактором их последствия могут характеризоваться нарушением санитарных норм проживания населения, вынужденными ограничениями или остановкой многих видов экономической деятельности, а, в особо тяжелых случаях, острыми либо отдаленными негативными эффектами для здоровья населения, что вызывает необходимость проводить высокочрезвычайные мероприятия по его эвакуации, переселению или реабилитации загрязненных территорий. В этой связи большое внимание со стороны органов власти, государственных служб и компаний, использующих ядерные технологии, уделяется вопросам предупреждения аварийных ситуаций, а также планированию стратегий преодоления радиационных и социально-экономических последствий радиационного загрязнения территорий.

Практика ликвидации последствий крупных радиационных аварий, в частности, на предприятии «Маяк» в 1950-х годах, на ЧАЭС в 1986 году и на АЭС «Фукусима-1» в Японии в 2011 году, сопровождавшихся масштабной эвакуацией, отселением жителей и введением жестких экономических ограничений, демонстрирует, что предпринятые меры позволили значительно снизить уровни радиационного воздействия на население в краткосрочной перспективе, однако зачастую они были избыточны либо не были своевременно рационализированы в соответствии с дальнейшим изменением радиационной обстановки, из-за чего был нанесен значительный урон как социальной сфере, так и экономике затронутых территорий и государства в целом. Отмечался значительный перерасход затрачиваемых средств на реализацию мер вмешательства в сравнении с предотвращаемым за их счет ущербом от

облучения населения. Избыточность и нерациональность при реализации отдельных мер проявлялась в отселении жителей в районах с низкими уровнями облучения или его проведение вместо краткосрочной эвакуации, введении строгих ограничений на экономическую деятельность и производство продуктов питания без учета долгосрочного изменения радиационной обстановки, непропорционально большому по сравнению с полученным эффектом вложению средств в дезактивацию и в другие меры реабилитации территории, организации системы выплаты компенсаций без соответствующего учета изменения реальных рисков в долгосрочной перспективе. Помимо этого, введенные ограничения на проживание и хозяйственную деятельность на затронутых территориях не были адекватно скорректированы по мере естественного улучшения радиационной обстановки, что в долгосрочной перспективе повлекло к их глубокому социальному и экономическому упадку. Принятие экономически неэффективных решений во многом было обусловлено слабой проработанностью теоретических подходов к оценке и прогнозированию социальных и экономических последствий как самих аварий, так и отдельных мероприятий по ликвидации их последствий.

Одним из первых в мире громких инцидентов на предприятии атомной промышленности с масштабными радиационными последствиями была последовательность аварийных сбросов жидких радиоактивных отходов (ЖРО) предприятия «Маяк» в период 1950-1951 годов в р. Теча. Следствием загрязнения стало хроническое облучение населения, выявленное только спустя годы. В первые годы активного функционирования ПО «Маяк» сбросы ЖРО были вызваны спешкой из-за экстренной необходимости запуска оружейного производства плутония в послевоенный период. Недоработки и неполадки в системах очистки и явные промахи в проектировании этих сооружений на ранних стадиях работы предприятия спровоцировали ряд мелких аварий. Также причиной сбросов стоит считать тот факт, что предприятие оказалось не готово принять и переработать столь большое, образующееся в процессе отладки технологической системы, количество ЖРО. Так, изначально запланированные лимиты переработки в 0,1 ТБк/сут были многократно превышены. Пик сбросов предприятия в р. Теча пришелся на период 1950-1951 годы – тогда в сутки заводы ПО «Маяк» сбрасывали по 160 ТБк (52 ПБк/год) бета-активных и 2,2 ГБк (420 МБк/год) альфа-активных ЖРО [58, 69]. В целом же, сейчас можно сказать, что специалистам того времени не хватило опыта обращения с РАО и знаний о экологических последствиях радиационного загрязнения водных систем и поведении таких веществ в окружающей среде.

После радиационного обследования населенных пунктов по течению р. Теча в 1949 году необходимость прекращения сбросов и дальнейшего загрязнения стала очевидной. Результаты выборочного дозиметрического и медицинского обследования населения, проживавшего по ее берегам, показали чрезвычайно высокие уровни радиационного загрязнения реки и территории

населенных пунктов, но только с 1951 года начали разрабатываться планы по защите жизни и здоровья жителей. В первую очередь удалось прекратить сбросы в реку за счет сооружения, силами «Маяка», Минсредьмаша и других министерств, каскада фильтрационных водоемов и добиться снижения содержания радионуклидов по всему ее протяжению.

В момент проведения интенсивных сбросов по берегам р. Теча располагалось 39 сельских населенных пунктов, из которых 25 – в Челябинской области и 14 – в Курганской. В них проживало 28 тысяч человек [108]. Последствия сбросов для здоровья населения оказались чрезвычайно серьезными, несмотря на то, что они не были внезапными и воспринимались продолжительное время как вынужденная мера. Удельная активность радионуклидов по ряду растительных культур была высокой как в верховьях реки – у пруда в с. Метлино, так и ее низовьях. Были загрязнены источники питьевой воды и местные продукты питания, что создавало угрозу здоровью населения. Потребовалось принятие ряда срочных мер по дополнительной защите населения и сельского хозяйства в зоне загрязнения, помимо прекращения самих сбросов:

- запретить использовать воду из р. Теча для питья и полива;
- обеспечить жителей и сельскохозяйственные предприятия чистой питьевой водой за счет создания новых источников;
- создать прибрежную санитарную зону, закрытую для населения и домашнего скота (в том числе, заготовки кормов);
- изменить характер деятельности предприятий в санитарной зоне;
- провести локальное переселение жителей с берегов р. Теча либо полностью отселить с ликвидацией всех предприятий и инфраструктуры.

Так в 1955 году водопользование р. Теча было полностью запрещено. С 1957 по 1960 год в Челябинской и Курганской областях было проведено полное отселение около 8 тыс. жителей 14 населенных пунктов и частично из 10 пунктов в верхнем течении реки. Порядка 20 тыс. человек были переселены от берегов в пределах своих населенных пунктов.

Оценки предпринятых мер показали, что прекращение сбросов и отселение позволили предотвратить от 94,3% до 98,9% прогнозируемой дозы для населения [6, 7, 8], преимущественно из-за прекращения облучения за счет водопользования.

Помимо затрат на переселение и обустройство водоснабжения в 1960-е годы, ущерб от загрязнения позже продолжил дополняться потерями за счет ухудшения экологии и невозможности использовать в хозяйстве загрязненные территории. Эти издержки, как и расчеты трудовых потерь, обусловленных ухудшением здоровья населения, официально так и не были рассчитаны.

Причиной столь серьезных последствий можно назвать несвоевременно принятые меры по прекращению протекания аварийной ситуации, то есть, не были приняты превентивные меры по предотвращению чрезвычайной ситуации (ЧС).

К началу 1954 года на восстановление водоснабжения в прибрежных районах р. Теча в Челябинской области было израсходовано (в пересчете на 2014 г.) 31,5 млрд руб. [65], а прямые суммарные затраты, включающие расходы на полное и частичное переселение жителей до 1957 года, оцениваются в 358 млрд руб. [39, с. 119-134].

По оценкам 2001 года, суммарный экологический ущерб, вызванный загрязнением р. Теча (за вычетом стоимости работ по восстановлению водоснабжения), в Челябинской области не должен был превысить 55 млрд руб., а в сумме с Курганской областью – не более 92 млрд руб. Согласно [52] разумная оценка прямого ущерба, исходя из экономических предпосылок и современного анализа, должна составлять порядка 4-9 млрд руб. В таблице 1.1 представлены относительные составляющие издержек по стоимости в этих двух регионах [41].

Последующие исследования показали, что большая часть проживающего по берегам р. Теча населения, получила индивидуальную эффективную дозу на все тело менее 200 мЗв. Порядка 12% набрали дозу более 500 мЗв, 8% – от 1000 мЗв и выше, а в единичных случаях – 3-4 Зв [20]. Следует отметить, что именно после этого обследования в радиологии был официально принят диагноз «хроническая лучевая болезнь» (ХЛБ), который был поставлен 940 жителям – 2,3% от всех обследованных. В трех верхних селах по реке диагноз ХЛБ был поставлен 20% всех обследованных и около 11% жителей с нижнего и среднего течения.

Таблица 1.1 – Оценка состава издержек от радиационного загрязнения р. Теча

Статья	Доля в суммарных издержках, %	
	Челябинская обл.	Челябинская и Курганская обл.
Переселение жителей	20,0	14,1
Реабилитация территорий	32,9	23,7
Потеря поселений	14,4	7,0
Потеря сельскохозяйственных земель	5,6	6,5
Последствия миграции населения	16,6	28,1
Недобор сельскохозяйственной продукции	–	12,0
Потери здоровья населения	10,5	8,7

Источник: составлено на основе [41]

Клинические исследования в первые шесть лет наблюдений продемонстрировали рост естественной смертности среди жителей верховья р. Теча на 0,5% в год. Впоследствии они позволили выявить и общие пороговые величины доз ионизирующего излучения для проявления детерминированных эффектов при облучении красного костного мозга у взрослого населения [56]:

- для ХЛБ – 800 мЗв;
- гематологический синдром – 550 мЗв;
- подавление иммунитета – 600 мЗв.

По ряду синдромов подобные зависимости выявить не удалось.

По совокупности вышеописанных эффектов можно утверждать, что по медицинским последствиям и воздействию на здоровье жителей вовлеченных территорий аварийное загрязнение р. Теча является самым крупным радиационным инцидентом за все время наблюдений, несмотря на относительно небольшую площадь загрязнения на суше и общее число официально пострадавших.

После того, как были завершены основные мероприятия по ограничению облучения жителей стали проявляться некомпенсированные прямой и косвенный ущербы от облучения: затраты на медицинскую реабилитацию серьезно пострадавших, реабилитация загрязненной поймы реки, а также решение ряда прогрессирующих социальных и экономических региональных проблем. Результатом проводимой политики властей в затронутых районах стало то, что данные территории подошли к 1990-м годам с худшими экономическими показателями по сравнению со средними региональными из-за низких объемов производства в сельском хозяйстве, падения плодородия земель и численности поголовья домашнего скота и птицы, что было вызвано общей деградацией ставшего неперспективным региона, а вовсе не следствием радиационного воздействия. В итоге, вложения государства и развитие хозяйственных секторов пострадавших районов были фактически прекращены, за исключением специальных программ 1996-1998 годов, которые, уже по общеэкономическим и политическим причинам, также не были выполнены [9].

Уже в 1957 году снова на предприятии «Маяк» происходит другой крупный радиационный инцидент. Взрыв в заглубленном хранилище радиоактивных отходов эквивалентный 25-29 т тринитротолуола стал следствием скопления 70-80 т перегретых сухих солей и вызвал масштабный выброс радиоактивных фрагментов, пыли и аэрозолей в атмосферу [21]. Суммарная площадь загрязнения по ^{90}Sr свыше $3,7 \text{ кБк/м}^2$ к настоящему времени оценивается в 20 тыс. км^2 , а свыше 74 кБк/м^2 – около 1000 км^2 или 5% всей площади сформировавшегося восточно-уральского радиоактивного следа (ВУРС) [70]. Официальный статус радиоактивно загрязненной зоны был утвержден для этой узкой (до 6 км шириной и длиной 105 км) полосы, на которой после аварии был введен запрет на ведение любой хозяйственной деятельности и закрыт доступ на территорию образовавшейся таким образом санитарной зоны [70].

Через полторы недели после аварии по решению Минсредмаша были эвакуированы жители населенных пунктов на расстоянии 12-22 км от предприятия, где по предварительным

оценкам они могли получить дозу до 1 Зв уже за первый месяц, при проживании в данной местности [66]. Эвакуация, перешедшая в отселение, была разбита на этапы и завершена через 670 дней после аварии. В итоге, было оперативно отселено 24 населенных пункта с общей численностью 12 763 человек, включая с. Метлино, которое было до этого заново отстроено после ликвидации старого с. Метлино после аварии на «Маяке» в начале 50-х. Это отселение, проведенное в первые десять дней после начала инцидента, позволило предотвратить от 93,4% до 96,1% прогнозируемой эффективной дозы облучения жителей [45]. С учетом более поздних этапов отселения свои дома покинули жители 51 и частично 10 населенных пунктов, а из хозяйственного оборота первично вывели 95 га земель, 25 га из них – навсегда [53]. Несколько отложенные этапы отселения, проводимые через 250 и 330 дней, позволили предотвратить в среднем до одной трети ожидаемой дозы, а этапы, проведенные еще через два года, только 5-15%.

За последующие 30 лет наблюдений средняя годовая доза у эвакуированного населения варьировалась от 30 до 530 мЗв. У постоянно проживающих за пределами санитарной зоны в среднем отмечали дозы от 5 до 60 мЗв/год [23]. Клинические исследования показывают, что проживание в зоне ВУРС увеличило смертность от радиационно-индуцированных злокачественных новообразований на 0,94-1,27% относительно наблюдавшейся спонтанной смертности, а для жителей отселенных деревень – на 12-16% [46]. В то же время, наблюдения по всей Челябинской области демонстрируют, что статистика смертности от онкологических заболеваний коррелирует с местами расположения предприятий металлургической и химической промышленности, а не с зонами радиоактивного загрязнения.

В таблице 1.2 представлена структура затрат, понесенных государством в ходе отселения территорий в зоне ВУРС (в сумме 777 млн руб. в пересчете на 2014 год). Считается, что все затраты на переселение и ущерб от потери личного имущества жителей были полностью компенсированы.

Таблица 1.2 – Прямые затраты на переселение и обустройство быта жителей в период 1957-1959 гг. с территории ВУРС

Статья затрат	Доля затрат, %
Переселение	80,5
Изъятие продукции	13,0
Отчуждение земель	1,5
Дезактивация	5,0

Источник: составлено на основе [68].

Нужно также отметить, что по результатам разграничения зон отселения был достигнут довольно высокий уровень радиационной безопасности населения: к настоящему времени в

районах проживания вблизи наиболее загрязненных зон ВУРС соблюдается содержание ^{90}Sr в продуктах питания многократно ниже допустимых уровней [10, табл. 6.5].

Сельское хозяйство всего региона в результате аварии понесло существенные потери, в первую очередь вследствие отчуждения части обрабатываемых земель и введения ограничений на потребление части продукции, выращиваемой и производимой в том числе и за пределами санитарной зоны. Региональные власти попытались сохранить сельское хозяйство в неотселенной части ВУРС на прежнем уровне, для чего в 60-70-х годах были разработаны и внедрены специальные процедуры для поддержания его ведения в условиях радиоактивного загрязнения ^{90}Sr . Значительные государственные вложения были направлены на массовую обработку земельных угодий и внедрение в практику эффективных агротехнических и зоотехнических приемов для снижения содержания радионуклидов в продукции. Была введена практика создания спецсовхозов, функционировавших и выдававших удовлетворяющий санитарным нормам продукт на загрязненных территориях вплоть до начала 1990-х годов. Однако спецхозяйства были малоэффективны с точки зрения экономики и в период 1990-х, на фоне общего упадка отрасли по стране, их положение еще больше ухудшилось [47].

В долгосрочной перспективе авария 1957 года привела к сокращению численности населения в регионе за счет миграции и ликвидации неперспективных населенных пунктов. Изъятие земель из оборота и усложнение сбыта продукции способствовало деградации местного сельского хозяйства, в котором преимущественно было занято местное население. Общий ущерб (в эквиваленте 2014 года) оценивается приблизительно в 2 млрд руб. [53]. По совокупности ряда показателей район размещения ПО «Маяк», а также Челябинская и отдельные районы Курганской области и в настоящее время из-за экологических и экономических причин считаются неблагоприятными для проживания, несмотря на относительно малый ущерб здоровью, который мог бы быть вызван за счет присутствующего радиационного фактора.

К настоящему времени авария, произошедшая на Чернобыльской АЭС в 1986 году, считается наиболее масштабной как по объемам радиоактивных выбросов, так и по численности задействованных на ликвидацию аварии сил. В результате нарушения хода эксперимента на АЭС и халатного отношения к безопасности рабочего процесса на 4-м энергоблоке станции произошел тепловой взрыв, повлекший за собой мгновенное разрушение реактора, пожар и выброс содержимого активной зоны в атмосферу. Эта авария также остается самой тяжелой в истории атомной энергетики по масштабам экологического загрязнения и доказанным негативным медицинским эффектам, в том числе, случаям гибели ликвидаторов. За последующие 8 лет наблюдений и клинических обследований группы из более 143 тысяч ликвидаторов было выявлено 1 026 случаев онкологических заболеваний и 341 случай смерти

от них (помимо случаев смерти от острого облучения в первые месяцы аварии). Результаты исследований позволили сделать выводы о возможном негативном влиянии на здоровье человека, начиная с доз облучения свыше 500 мЗв [104, 85, 67]. Совокупная коллективная доза для всей когорты ликвидаторов оценивается сегодня в 15 тыс. чел.-Зв при средней индивидуальной дозе на все тело в 50 мЗв.

Несмотря на то, что заключения исследований демонстрировали, что радиационное воздействие не должно было привести к массовому проявлению негативных эффектов на здоровье ликвидаторов и населения, неграмотная политика по работе со СМИ и критические ошибки при принятии мер по защите населения на начальной стадии аварии привели к панике в обществе и к тотальному списыванию всех выявляемых заболеваний на территории СССР на последствия воздействия радиационного фактора, независимо от фактических уровней загрязнения или величины полученной дозы облучения.

В связи с масштабом ЧС решения по защите населения принималась на уровне правительства. Так, в связи наблюдаемой тяжелой радиационной обстановкой и возможным превышением существовавших критериев, уже 27 апреля оперативно и организованно была проведена эвакуация населения г. Припяти [54], впоследствии перешедшая в постоянное отселение. 2 мая было принято решение эвакуировать 30-км зону АЭС в связи с опасностью повторных взрывов из-за разрушения основания реактора.

Проведенная эвакуация в совокупности позволила предотвратить облучение эвакуированных до пороговых уровней возникновения негативных эффектов. Так из 116 тысяч жителей этой группы дозу свыше 250 мЗв получили менее 1%. Коллективная эффективная доза в группе эвакуированных за первые дни оценивается в 4 тыс. чел.-Зв. (при средней – 35 мЗв) и 55 тыс. чел.-Гр на щитовидную железу (средняя 500 мГр).

Серьезные негативные эффекты у лиц, постоянно проживающих на подверженных первичному воздействию выброса территориях, были связаны с облучением инкорпорированными радиоизотопами йода, попадавшим в организм преимущественно через пищевые цепочки. Суммарно по данной группе населения в России, Беларуси и Украине доза на щитовидную железу составила порядка 1 200 тыс. чел.-Гр или около 2 Гр в среднем на человека [49; 71; 121 с. 487-488]. Такое воздействие проявилось в последующем росте заболеваемости раком щитовидной железы (РЩЖ) у группы жителей, которым на момент аварии было менее 15 лет [120; 121, с. 543-547]. Всего к 1999 году было зарегистрировано 1036 случаев РЩЖ в наблюдаемой группе, что превышает уровни спонтанной заболеваемости в 5,7 раза [42, 123, 105]. Главной причиной столь тяжелых последствий явилось запоздалое проведение йодной профилактики из-за несвоевременного поступления самого препарата и распоряжения о его применении.

Всего до 5,2 млн человек в России, Украине и Белоруссии продолжают проживать на загрязненной в результате аварии на ЧАЭС территории. Оценки индивидуальной дозы за первые десять лет для этой группы показывают, что порядка 10 тыс. человек получили дозу свыше 100 мЗв и около 1 тыс. человек – свыше 200 мЗв при среднем показателе по группе 8 мЗв [38, 48]. За тот же срок для этой категории коллективная доза оценивается в 42 тыс. чел.-Зв. Здесь, безусловно, рассматривается только доза от внешнего облучения от долгоживущих радионуклидов в почве, так как фактор радиоактивного йода исчерпал себя в первые месяцы после аварии. Наблюдения как за 10, так и за 15 лет также не выявили никаких радиационно обусловленных стохастических эффектов (кроме рака щитовидной железы) [62, 63, 64]. На территориях с различными уровнями загрязнения почвы по ^{137}Cs не были выявлены различия по эффектам, связанным с рождаемостью [75, с. 42-50, с. 126-135]. В итоге, в процессе выработки решений по долгосрочному отселению, именно по результатам «чернобыльских» исследований была принята «35-бэрная» концепция, утверждающая безопасность дозы на все тело в 350 мЗв на протяжении всей жизни. Современные нормы [10, п. 3.1.4] принимают безопасным, не требующим вмешательства уровень дозы в 70 мЗв за 70 лет для населения.

Сама процедура переселения жителей из г. Припять, отдельных районов 30км зоны ЧАЭС и некоторых особо загрязненных зон в других областях, которая включала строительство жилья и компенсации за утраченное имущество, обошлась государству в \$230 млн (в пересчете на 2014 год). Стоимость переселения одного человека в течение первого года после аварии можно оценить в 1,68 млн руб. (в ценах 2014 года), а при более позднем отселении она возрастала примерно в 10 раз.

По результатам измерений уровней радиационного загрязнения на территории СССР были установлены четыре зоны разграничения загрязненной территории в соответствии с уровнями концентрации ^{137}Cs в почве [111 с. 389-390; 1]. Закрытие ряда территорий и введение ограничений на различные виды деятельности, безусловно, отразилось на жизнедеятельности населения и экономике ряда регионов.

Дальнейшие действия по защите населения и реабилитации загрязненных территорий во многом оказались нескоординированы, избыточны, а установленные в период ликвидации аварии критерии зонирования и предоставления социальной защиты оказались не обоснованы с точки зрения базовых принципов радиационной защиты, что проявилось в дальнейшем в значительном превышении вреда от вмешательства над пользой от снижения радиационного ущерба [33].

В частности, если работы в 30-километровой зоне АЭС координировались Правительственной комиссией и НПО «Припять», то за ее пределами работы по защите населения и реабилитации территорий в разных республиках и областях проводились на основе

различных подходов и критериев, что повлекло принятие необоснованных решений. В частности, помимо введения в зоне аварии регулярного радиационного контроля, были применены ограничительные меры, включая изъятие скота и домашней птицы, запрета на сбор грибов и ягод, лекарственных трав, ограничена заготовка сена. Все это в совокупности закрывало возможность развития сельского хозяйства, с учетом ограниченной возможности сбыта продукции, так как на государственном уровне были предприняты меры, чтобы исключить производство сельхозпродукции с превышением допустимых уровней по содержанию радионуклидов. Окончательно это удалось достигнуть в Украине к 1992 году и в России – к 1994 году [19]. Более поздние исследования показали, что своевременное и полноценное проведение защитных сельскохозяйственных мероприятий, включающих перепрофилирование производства и меры по снижению содержания радионуклидов в конечной продукции, позволило бы в 4-5 раз снизить коллективную дозу облучения, полученную за счет потребления произведенных на этих территориях продуктов питания.

Дезактивация на загрязненных территориях активно проводилась в первые годы после аварии, что позволило снизить дозы для населения в зонах жесткого контроля на 1500 чел.-Зв. Уже через три года возможности инженерной дезактивации были исчерпаны, и она продолжала проводиться только выборочно в небольших объемах.

В результате осадения радиоактивного облака загрязнению подверглись так же водосборные территории Днепра и Припяти с последующим загрязнением самих рек. До 8 млн человек оказались подвержены риску дополнительного облучения за счет потребления воды и до 32 млн – за счет потребления рыбы и использования воды рек при орошении [60]. В итоге, коллективная доза от водопользования для этих категорий населения за последующие за аварией 70 лет оценивается в 3 тыс. чел.-Зв. В среднем же, вклад водопользования в формирование дозы оценивается от 4-5 % до 20-60% в отдельных областях.

Показательными по своей невысокой эффективности были попытки снизить дозы облучения за счет дополнительных работ по охране водной среды в период 1986-1998 годов. При стоимости мероприятий около \$30 млн стоимость предотвращенной дозы составляла от \$30-60 тыс. до \$2-3 млн на 1 чел.-Зв [112].

Аналогично, меры по запрету сбора грибов и ягод на ряде территорий позволили предотвратить всего порядка 18 чел.-Зв/год при этом сопутствующий экономический ущерб за счет контроля соблюдения ограничений и недосбора продукции для наименее загрязненных территорий мог достигать до \$100-800 тыс. на один предотвращенный чел.-Зв/год.

Отсутствие к моменту аварии отлаженных механизмов страхования радиационного риска привели к значительному росту необоснованных затрат, связанных с возмещением ущерба, которые, вместе с затратами на другие мероприятия, были крайне велики в

сопоставлении с коллективной дозой облучения, то есть с объективными оценками ущерба, понесенного населением. В частности, наблюдалось непропорциональное перераспределение выплат, когда затраты в пересчете на 1 чел.-Зв годовой дозы облучения по наиболее обширным территориям в зоне льготного социально-экономического статуса в 3,2 и 2,3 раза соответственно превышали затраты по зонам отселения и ограниченного проживания, где радиационные риски были выше [59].

В ходе принятия мер по защите и восстановлению уровня жизни населения были сформированы несколько категорий лиц, по настоящее время продолжающие получать компенсационные выплаты как пострадавшие в результате радиационной аварии:

- большую группу, порядка 600 тыс. человек составили гражданские и военные, участвовавшие в ее ликвидации;
- порядка 116 тыс. чел. эвакуированных в 1986 году;
- около 220 тыс. чел., отселенных с 1989 по 1995 год;
- до 5,2 млн чел., постоянно проживающих в зонах загрязнения.

Несмотря на то, что уровни загрязнения территорий за десятилетия значительно снизились, а полученные дозы в подавляющем числе случаев, никак не могли отразиться на здоровье лиц из льготных категорий, отменить выплаты оказалось невозможно по социальным и политическим причинам. При этом, грубые оценки показывают, что на каждый предотвращенный чел.-Зв за 10 лет проживания на загрязненных территориях должно было в виде компенсаций в совокупности выплачено заведомо более \$100 тыс. (в соответствии с нормами выплат в России на 2018 г.). Часть выплат также неявно были переложены государством на экономику в форме различных льгот, которые действуют по настоящее время. В этом проявляется одна из проблем принятия решений по мерам реабилитации в части введения регулярных выплат, критерии ввода или отмены которых являются неявными или не привязаны к конкретным показателям.

Кроме того, несмотря на улучшение радиационной обстановки и снижение радиационного риска, за период с 2005 по 2015 год численность получателей ежемесячных денежных выплат, вследствие аварии на ЧАЭС, увеличилась в России на 30 тыс. человек. Отменить ранее введенные выплаты со временем становится сложно, так как они прочно встраиваются в структуру экономики отдельных регионов и составляют заметную часть дохода слишком большого числа граждан.

На поздних стадиях реабилитации территорий отсутствие единой стратегии в регионах привело к неуклонному снижению объема средств, направляемых на реализацию коллективных мер защиты и реабилитации, являющихся более результативными и эффективными с точки зрения минимизации последствий радиационного воздействия, чем предоставление

индивидуальных льгот и компенсаций. Анализ реализации программ реабилитации за 2002-2005 гг. продемонстрировал, что более 90% направляемых средств используется для решения задач социально-экономического развития регионов, не отвечающим целям преодоления негативных последствий радиационной аварии [44, с. 124-132].

Авария на ЧАЭС, как и ЧС на ПО «Маяк», в итоге привела к большому негативному социальному и экономическому эффекту, который в значительной степени сказался на населении, проживавшем в районах со средним и малым уровнями загрязнения – в местах, где вводились различного рода ограничения. Эти факторы, вместе со сворачиванием экономической и производственной деятельности на затронутых территориях, лишили смысла дальнейшее пребывание на них сельского населения и дестабилизировали социально-психологическую обстановку, что привело к массовой миграции и последующему переселению жителей в более экономически благоприятные регионы. Причиной этого во многом стала неграмотная политика введения ограничений и запретов, которую Международный консультационный комитет позже оценил, как избыточную, наряду с другими проводимыми мерами.

С точки зрения анализа действий и проводимых мероприятий по ликвидации последствий радиационной аварии стоит рассмотреть ЧС, произошедшую на Сибирском химкомбинате (СХК) 6 апреля 1993 года, в результате которого единственным населенным пунктом, оказавшимся в зоне радиационных выпадений, стала д. Георгиевка, где на тот момент постоянно проживало 73 человека. Прогнозируемая коллективная доза для жителей деревни оценивалась в 0,021 чел.-Зв и 0,0072 чел.-Зв – для временно проживающих, что не могло привести к сколь угодно значимому ущербу для здоровья [22, с. 528-567]. Средняя индивидуальная доза оценивалась до 5 мЗв/год и до 30 мЗв/год на отдельные органы, что хоть и превышало уровни для вмешательства [10, п. 5.2], но не требовало срочных мер по эвакуации или отселению в перспективе. По итогам проведенной дезактивации удалось предотвратить дозу в 0,012 чел.-Зв, при этом доза ликвидаторов составила 0,014 чел.-Зв за время работ. Кроме этого, были предприняты действия по минимизации доз для населения за счет устранения фактора потребления загрязненных продуктов питания: был выкуплен деревенский скот, введен запрет на посещение лесов, сбор грибов и ягод, введен завоз продуктов питания, что предотвратило еще приблизительно 0,0021 чел.-Зв/год. 0,023 чел.-Зв было предотвращено за счет вывоза из деревни 18 детей. По совокупности этих и других мероприятий стоимость предотвращения одного чел.-Зв составила \$610 млн по ценам 1993 года [22, с. 528-567]. Анализируя данный инцидент и с точки зрения современных норм реагирования, и с позиции экономической эффективности, можно утверждать, что не было никакой объективной необходимости в проведении описанных защитных мероприятий.

Авария на АЭС «Фукусима-1», произошедшая в 2011 году в Японии – последняя из крупных радиационных аварий, сопровождавшаяся массовой эвакуацией и отселением жителей. В рамках данной работы она требует особо детального рассмотрения уже ввиду того, что благодаря современным технологиям и открытому информационному пространству в настоящее время есть возможность оперативно получать практически любую информацию о развитии ситуации в зоне аварии и о ходе ее развития и ликвидации. Начиная с 2011 года автором исследуются вопросы ее радиационных, социальных и экономических последствий в аспекте соразмерности предпринимаемых государством мер по защите населения [26, 27, 31, 28, 24, 72, 30, 32]. Преимущественно, именно анализ экономических затрат и ущербов при реабилитации пострадавших территорий в Японии привел к заключению о необходимости оптимизации критериев принятия решений по мерам защиты населения и восстановления территорий с точки зрения их экономической эффективности. В 2017 году был завершен основной этап реабилитации наиболее пострадавших территорий, что позволяет подвести определенные итоги по экономическим затратам и произведенному эффекту за весь период наблюдений с 2011 года.

11 марта 2011 года в результате вызванного землетрясением мощного цунами была выведена из строя система охлаждения всех действующих энергоблоков АЭС «Фукусима - 1» (Фукусима Даичи). В результате вызванных сбоев в нормальной работе систем и барьеров безопасности станции начался перегрев реакторов, что изначально привело к аварийному стравливанию в атмосферу скопившихся в его корпусе радиоактивных газов и аэрозолей, а затем привело к трем взрывам образовавшегося в зданиях энергоблоков водорода, что вызвало их частичное разрушение и залповый выброс скопившихся в зданиях радиоактивных примесей. После активного вмешательства противоаварийных сил и средств удалось замедлить активное разрушение реакторов, однако атмосферные выбросы радиоактивных примесей продолжали регистрироваться почти до середины апреля 2011 г.

Совокупная активность выбросов АЭС «Фукусима - 1» оценивается в 10-35% от выброса при аварии на ЧАЭС по основным радиологически значимым радионуклидам, а сама авария получила наивысшую оценку по шкале ядерных событий ИНЕС [16; 26]. В девяти префектурах Японии были отмечены выпадения на почву долгоживущих радиоизотопов цезия с уровнями более 60 кБк/м^2 . На этих территориях проживало до 30% всего населения страны и создавалось до 35% ее ВВП. Более 80% всех радиоактивных выпадений пришлось на восточную часть префектуры Фукусима, где размещалась аварийная АЭС.

Правительством Японии была в несколько этапов оперативно проведена эвакуация населения:

- к 15 марта в 20 км зоне АЭС;

- в зоне отложенной эвакуации в радиусе от 20 до 30 км вокруг АЭС, которая осталась необязательной на весь период проведения эвакуационных мероприятий;
- в области северо-западного следа выпадений, простирающегося почти до 40 км от АЭС, где эвакуацию планировалось завершить до середины мая 2011 года, но фактически она была растянута до конца года.

В результате, обязательная эвакуация, которая соблюдалась достаточно строго, была запланирована на территориях, где, предварительно, ожидалось индивидуальные дозы за первый год более 20 мЗв (по оценкам японской стороны, которые, по мнению автора, завышены). Окончательная карта зон эвакуации, сложившаяся к апрелю 2011 года представлена в приложении А на рисунке А.1.

Численность эвакуированных или добровольно уехавших из зон бедствия в разных источниках оценивалась очень приблизительно и доходила до 270 тысяч [135], куда можно отнести и людей из 30-50 км зоны, уехавших от разрушений, вызванных цунами, и тех, кто просто был дезориентирован противоречивой информацией об аварии на АЭС. По официальным же данным, в связи с аварией на АЭС было эвакуировано 146 520 жителей [143]. Эта цифра постоянно корректировалась с учетом того, что жители имели возможность местами посещать на время свои дома, а миграция в зоне отложенной эвакуации вовсе не подвергалась жесткому учету. В итоге, к августу 2011 года, когда начал формироваться план по возвращению населения, отселенными на долгое время оставались только 20 км зона и территории северо-западного следа (порядка 86,6 тыс. человек).

Первые оценки показали, что оперативно проведенная эвакуация позволила за первый год предотвратить дозу облучения населения до 4,5 тыс. чел.-Зв, а также дозу 25,4 чел.-Гр на щитовидную железу для детей до 2-х лет. В 20 км зоне в отсутствие эвакуации до 48,2 тыс. человек могли получить эффективную дозу облучения выше 20 мЗв за первый год, из них 13,6 тыс. человек – более 100 мЗв/год [31].

Помимо эвакуации, был предпринят ряд беспрецедентных мер по защите населения и запрету распространения радиоактивности с продуктами питания, производимыми как на загрязненных территориях, так и в ряде ближайших районов, включая вылов рыбы в прилегающей к префектуре акватории. В восточной части префектуры Фукусима и отдельных соседних регионах фактически было приостановлено все сельскохозяйственное производство, так как были отдельные случаи обнаружения техногенных радиоизотопов в растительной продукции и рыбе. В то же время, строгий и оперативно налаженный санитарный контроль показал уже в течение 2011 года скорый спад по загрязненности продуктов питания и питьевой воды. Можно утверждать, что дозы, полученные населением, так же не могут нести какого-либо риска для здоровья в плане возникновения детерминированных или статистически

выявляемых стохастических эффектов. Несмотря на значительные объемы выбросов по йоду, вполне сопоставимые с чернобыльскими, в Японии удалось избежать значимых доз облучения щитовидной железы, так как молочный путь поступления его радиоизотопов в организм человека не играл там такой значимой роли.

Ликвидация самой аварии на АЭС к 2019 году не завершена, а работы по выводу АЭС из эксплуатации предварительно продлеваются на десятки лет вперед.

Вопрос дезактивации территорий, пострадавших в результате аварии на АЭС «Фукусима-1», ее возможная эффективность, а также общий социальный и экономический эффект от ее проведения вызывал крайнюю озабоченность у всех заинтересованных сторон, наблюдавших за развитием инцидента, так как от принятых решений по объемам работ зависели и объемы необходимого финансирования, которое должно было распределиться между государственными и муниципальными фондами, страховыми компаниями, а также собственно компанией-оператором АЭС. Все это должно было проходить на общем фоне приостановки работы ряда АЭС в Японии и удорожании электроэнергии. Кроме того, еще в 2011 г. стало очевидно, что на некоторых территориях в префектуре Фукусима, где уже была проведена эвакуация, радиационное загрязнение незначительно и не требует срочного вмешательства. В то же время, в силу политических и социальных аспектов, отменить на них режим эвакуации без дополнительного обоснования и проведения восстановительных работ было уже невозможно.

В августе 2011 года правительство Японии издает акт «о принятии специальных мер по устранению радиоактивного загрязнения» [124], вступивший в силу с января 2012 года и определяющий программу действий на ближайшие годы по нормализации обстановки и реабилитации пострадавших территорий. В соответствии с ней, на загрязненных радионуклидами территориях планировалось провести работы по общей дезактивации и снижению радиационного фона.

В рамках плана были выделены две основные зоны дезактивации – это «особая зона дезактивации» (далее Особая зона), куда частично или полностью были отнесены территории 11 муниципалитетов префектуры Фукусима, и «зона интенсивного загрязнения», куда изначально вошли территории 104 муниципалитетов (позже число было снижено до 92) префектур Фукусима, Ибараки, Мияги, Чиба, Точиги, Гунма, Сайтама, Иватэ [116, 129, 81].

К Особой зоне были отнесены территории, где эвакуация была проведена в обязательном порядке, в нее не вошли отдельные площади с 20 до 30 км вокруг АЭС, где эвакуация была, фактически, добровольной и не была массовой. Ожидаемые дозовые нагрузки для населения в данной зоне в первый год по оценкам японской стороны превышали 20 мЗв/год, но местами не достигали и 5 мЗв/год. «Зона интенсивного загрязнения» определялась по текущему уровню

радиационного фона и к ней были отнесены все территории, где он превышал 0,23 мкЗв/час. В обеих зонах были запланированы мероприятия по дезактивации различной интенсивности и с различными целевыми показателями. Так, для «особой зоны дезактивации» была озвучена цель снизить средние индивидуальные дозовые нагрузки для населения от техногенных радионуклидов до уровня 1 мЗв/год с учетом понижающих коэффициентов за счет экранирования при нахождении в зданиях [129, 81]. Подобный результат можно было получить за счет повсеместного (или среднего) снижения фона до 0,23 мкЗв/час, тем не менее, такой задачи не было поставлено, а достигнуть цели планировалось не только за счет проведения разовой дезактивации территории, но и всего комплекса мер: регулярного радиационного мониторинга, контроля продуктов питания, проведения политики информирования населения о рисках при проживании на данных территориях и прочих мер. Отмена режима эвакуации и возвращение населения предполагались возможными только при достижении запланированных целей.

Задачи дезактивации в «зоне интенсивного загрязнения» не были озвучены, но известно, что на ее территориях не проводилось обязательной эвакуации, а экономическая деятельность не была серьезно нарушена. В связи с этим в рамках данной диссертационной работы мероприятия и результаты реабилитации данной территории не рассматривались детально и приводятся для справки.

К декабрю 2011 года составитель акта «о специальных мерах» Министерство защиты окружающей среды Японии выработало руководящие документы для «особой зоны дезактивации», включающие детальные инструкции и правила проведения всех видов работ по реабилитации территорий на всех ее этапах [126]. Порядок работ предполагал определение районов для проведения первичного обследования, выявление зон с повышенным загрязнением и определение для них способов дезактивации, проведение работ по дезактивации в соответствии с планом, вывоз и захоронение загрязненного грунта и отходов, повторный контроль радиационной обстановки.

Первые работы по реабилитации проводились на наименее загрязненных участках и первые сообщения о завершении локальной дезактивации были получены в июле 2013 г. (муниципалитет Тамура префектуры Фукусима), а режим эвакуации был отменен на них к 1 апреля 2014 г. Окончательный план по территориям Особой зоны дезактивации был представлен осенью 2017 г., где она была разделена на территории, на которых после реабилитации ожидалось возвращение, и зону, где реабилитация и возвращение были признаны нецелесообразными из-за высоких уровней загрязнения и радиационных рисков. Карта Особой зоны на сентябрь 2017 г. представлена на рисунке А.2 приложения А.

В ходе мероприятий по реабилитации дезактивации подвергались только зоны проживания и периодического пребывания населения, а также прилегающие к ним участки. Всего к осени 2017 г. объемы работ в Особой зоне составили: 22 тыс. жилых зданий; 8,5 тыс. га сельскохозяйственных площадей; 5,8 тыс. га лесных площадей, прилегающих к жилым зонам; 1,4 тыс. га дорог и придорожных территорий [81]. Совокупный объем загрязненного грунта, направленный на дезактивацию, достиг 8,4 млн м³. По оценкам автора, проведенная дезактивация должна была привести к возвращению в свои дома почти 64 тыс. жителей из 86,6 тыс. эвакуированных ранее с территории всей Особой зоны [25].

Напрямую данные о стоимости проведенных мероприятий долгое время не публиковались. Только в 2017 г. в документе [81] был опубликован совокупный бюджет Министерства защиты окружающей среды, направленный на реабилитацию после аварии, который составил к апрелю 2017 г. \$24 млрд (с трудозатратами в 30 млн чел.-дней), из которых \$12 млрд составили бюджет реабилитации в Особой зоне (13 млн чел.-дней).

Контроль качества дезактивации проводился независимо на каждом из локальных участков проведения работ. Оценивалось снижение уровня мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД) по сравнению с измерениями до начала мероприятий. Дополнительно качество работ оценивалось по уровням загрязнения поверхностей методом бета-радиометрии, однако совокупный эффект оценивался именно по кратности спада МЭД. Контрольные замеры также производились спустя несколько месяцев после завершения работ. По результатам дезактивации в Особой зоне заявленная средняя кратность снижения радиационного фона составила от 1,4 в лесополосе до 3,5 в жилых зонах [81].

Тема радиологической и экономической эффективности дезактивации в префектуре Фукусима поднималась автором в работах [30] и [32], где предпринималась попытка оценки реального эффекта снижения МЭД и доз для населения по результатам проведенных мероприятий. Так как на момент исследований достаточно подробные данные по результатам дезактивации были известны только по первой площадке Особой зоны – части муниципалитета Тамура (Рисунок А.2 приложения А), то оценки эффективности проводились только для этой территории. По мнению автора, официально заявленные уровни снижения МЭД по результатам дезактивации неадекватно отражали собственный эффект произведенных работ по очистке из-за того, что они не учитывали влияние естественных процессов на снижения МЭД. Это не позволяло адекватно соотнести стоимость работ с произведенным эффектом и численно оценить адекватность финансовых вложений в дезактивацию. Расчеты для участка в муниципалитете Тамура, где до аварии проживало 400 жителей, показали реальный коэффициент снижения МЭД за счет проведения дезактивационных работ на уровне 1,72. При заявленных трудозатратах 120 тыс. чел.-дней (при минимальной оценке стоимости таких работ

\$27,2 млн) реальный эффект предотвращения дозы за счет дезактивации для данной территории был оценен автором менее чем в 2 чел.-Зв в перспективе за период наблюдений в 25 лет [32].

Как на уровне отдельного муниципалитета, так и при анализе всей «зоны возвращения», где проводилась дезактивация, можно отметить крайне низкий совокупный эффект по снижению доз для населения на фоне заявленных объемов и стоимости произведенных работ, которые кажутся неоправданно высокими. В среднем на возвращение одного жителя было только в дезактивацию территории вложено \$187,6 тыс./чел.

Наиболее очевидным кажется объяснение, что сами работы были чрезмерны по своему исполнению для поставленных задач, а подходы к дезактивации, выбранные японской стороной, существенно отличались от применявшихся ранее в схожих ситуациях. Так, значительный объем работ по дезактивации зданий, придомовых территорий, водосточных коммуникаций проводился строго по порядку, начиная с верхних и заканчивая нижними ярусами с применением ручного труда в больших объемах. Значительные трудозатраты и дополнительные операции были связаны с защитой задействованных работников, локализацией радиоактивных аэрозолей, пыли и воды в местах проведения работ, а также с непрерывным радиационным контролем. Применялись такие меры защиты как экранирование мест проведения работ, отдельный сбор грунта и мусора для разных ярусов строений, фильтрация и сбор технической воды и т.п.

Ручные работы применялись часто при обработке поверхностей, при удалении пыли в местах общего пользования, на детских площадках и в школах, а также при ряде работ, которые радикально не могли повлиять на улучшение радиационной обстановки. В то же время проведение работ по удалению легкоснимаемой активности в дальнейшем снижало риски прямого контакта жителей с радиоактивными отложениями и вторичного загрязнения зоны проживания, что способствовало улучшению условий их проживания после возвращения. Фактическое снижение уровней радиационного фона (показаний МЭД) достигалось преимущественно за счет масштабных земельных работ с применением техники: вспашки, удаления верхнего слоя грунта, удаления растительности.

По совокупности факторов можно утверждать, что целью реабилитации территории была подготовка зон проживания к возвращению населения, а именно, устранение того ущерба, который получили здания и места общего пользования за период простоя. Вместе с тем, известно, что процесс возвращения населения хоть и был инициирован, но проходит сложно, так как жители не имеют возможности найти работу на старом месте и при этом теряют дотации, которые получали за время действия режима эвакуации. Несмотря на высокие издержки и относительно небольшие, даже в долгосрочной перспективе, предотвращенные дозы облучения, некорректно говорить о, в целом, низкой эффективности или ненужности

дезактивации без изучения экономической и социальной ситуации, которой и руководствовало Министерство охраны окружающей среды при разработке плана мер.

Авария на АЭС «Фукусима-1» безусловно оказала значительный эффект на экономику не только префектуры Фукусима, где серьезно были подорваны производство и сельское хозяйство, но и всей атомной энергетики, которая является важным компонентом экономики Японии и большинства развитых государств. Однако в рамках данной диссертационной работы представляют интерес экономические ущербы и затраты, связанные непосредственно с загрязнением территории и принимаемыми в связи с ним решениями.

Официальные данные от органов власти Японии по суммам выплат или оценкам экономического ущерба в открытом доступе публиковались крайне нерегулярно, а их назначение часто не уточнялось. Так, в первый год после аварии в СМИ озвучивались суммарные цифры ущерба для Японии от десятков до \$310 млрд. 15 апреля 2011 года впервые были озвучены возможные суммы компенсаций для пострадавшего населения (на тот момент уже была проведена эвакуация) в диапазоне от \$600 млн до \$1 200 млн. 3 мая этого же года сумма выплат населению оценивалась уже в \$49 млрд. Всего к 3 июня 2011 года опубликованные суммы компенсации потери имущества населения в сумме с потерями из-за полной остановки АЭС Японии оценивалось в сумму от \$9 млрд до \$192 млрд. К июню 2013 года сумма уже выплаченных компенсаций (без уточнения, выплачивались они населению или также предприятиям) достигала приблизительно \$22 млрд и продолжала расти [128, с. 34; 82]. В марте 2014 года, когда начиналась процедура возвращения жителей из эвакуации, стало известно, что эвакуированным ежемесячно выплачивалась сумма, эквивалентная \$980 для найма жилья и компенсации текущих расходов, а при возвращении правительство обязуется выплачивать «подъемные» в размере \$7,2 тыс. на семью. В декабре 2016 года в последний раз озвучивались официальные суммы затрат на ликвидацию последствий аварии, включая стоимость вывода из эксплуатации – от \$180 млрд до \$200 млрд, из которых государство предоставит в кредит компании ТЕРСО, оператору аварийной станции, около \$122,7 млрд [127].

Косвенно потери экономики префектуры Фукусима автор оценивает по среднему спаду производства и совокупным доходам префектуры, вычисленным на основании данных статистики [140]. Так в 2013 году общие доходы префектуры снизились по сравнению с данными за 2007 год на \$50 млрд, а объемы производства продукции – на \$12 млрд. На рисунках А.3 и А.4 приложения А приводятся карты, демонстрирующие изменения в процентах совокупных доходов и объемов товарного производства по муниципалитетам префектуры Фукусима.

Более детально установить официальные итоговые суммы расходов к 2019 г. автору не удалось, во многом за счет того, что те же компенсации пострадавшим (жителям и предприятиям) выплачиваются как государством, так и компанией-оператором, в различных объемах и в соответствии с разными планами. Оценка возможных объемов компенсаций, а также затрат и ущербов, связанных с загрязнением территории, временной и долгосрочной эвакуацией, является серьезной задачей, требующей сбора и обработки значительного объема статистических данных. Результаты расчетов автора по данному исследованию приводятся в 4 главе диссертационной работы.

Анализ рассмотренного исторического опыта приводит к заключению, что несвоевременное или несоразмерное принятие мер по предотвращению облучения населения ведет к негативным последствиям для здоровья людей и чрезмерному материальному ущербу для государства и населения. В большинстве рассматриваемых случаев применения мер реабилитации территорий и защиты населения были многократно превышены объемы средств, рекомендуемые международными и российскими нормами в области радиационной безопасности для предотвращения облучения населения. В этой связи, неоптимальные решения по реализации мер поставарийного вмешательства при ликвидации последствий радиационных аварий могут являться основным источником необоснованных экономических затрат и вносить ключевой вклад в сумму накопленного экологического ущерба в долгосрочной перспективе. Необоснованные затраты и ущербы являются следствием низкой экономической эффективности реализуемых мер при ликвидации последствий радиационных аварий, что усугубляется отсутствием адекватных инструментов ее оценки для различных сценариев аварийного реагирования.

Низкая экономическая эффективность принимаемых решений по вмешательству особенно характерна для территорий с относительно невысокими уровнями загрязнения, для которых критерии реализации мер вмешательства на основе показателей радиационной обстановки, как правило, жестко не установлены или предполагают необходимость дополнительного социально-экономического обоснования. В этой связи для большей части затрагиваемых при аварии территорий, где радиационные риски могут считаться незначительными, возникают экономические риски, обусловленные необоснованным вмешательством.

Основной причиной невысокой экономической эффективности и несоответствия отдельных реализованных мер базовым принципам радиационной защиты при ликвидации крупных радиационных аварий является отсутствие единого методологического подхода к выработке эффективных решений для различных мер вмешательства, включающего четкие рекомендации по их принятию на всех этапах реагирования и основанного на сопоставлении

возможных издержек и выгод. Такие рекомендации должны базироваться на действующих нормативах по радиационной безопасности и сопоставлении сопутствующих реализации мер вмешательства оценках затрат и выгод, с учетом социально-экономических особенностей пострадавших территорий.

1.2 Теоретические подходы к обеспечению безопасности населения при радиационных авариях

Основные меры вмешательства при радиационной аварии

Современные российские и международные законы и рекомендации в области радиационной безопасности, включающие необходимые радиологические условия и критерии, а также экономические подходы, которыми необходимо руководствоваться при управлении реагированием в условиях радиационной ЧС, были составлены с учетом исторического опыта ликвидации последствий радиационных аварий. Методология принятия решений в случае радиационных аварий, а также особенности их протекания и воздействия на население на данный момент наиболее полно описана в отношении АЭС [55]. Меры реагирования на инциденты радиационного характера, направленные на защиту населения и противодействие последствиям, можно разделить по срокам применения:

- превентивные меры, направленные на поддержание готовности сил и средств спасательных формирований, развитие сетей радиационного мониторинга, информирование населения, а также меры, применяемые в ситуации повышенной готовности, когда существует сиюминутная вероятность возникновения ЧС из-за нарушения в работе АЭС или другого объекта. Это мероприятия по поддержанию в готовности специальных служб, систем автоматизированного контроля радиационной обстановки, систем оповещения и других элементов аварийного реагирования при радиационных авариях;
- ситуационные меры, применяемые как реакция на свершившийся факт аварии с радиационным выбросом в атмосферу в условиях ограниченной информации. Это меры по обеспечению укрытия населения, профилактического приема препаратов стабильного йода, проведению эвакуации на основании прогноза развития ситуации;
- поставарийные меры, вводимые в условиях достаточного объема информации, когда уже имеются результаты измерений радиационной обстановки, предприняты первые защитные действия, введены временные ограничения и необходимо переводить временные решения в долгосрочные, связанные со значительно большими затратами и потенциальными

ущербами. На этом этапе могут решаться вопросы о проведении оперативной дезактивации без отселения, проведении или продлении временного отселения с проведением дезактивации на территории до возвращения жителей, выплата части компенсаций жителям и экономическим агентам или другие меры, принимаемые на основании краткосрочного прогноза радиационной обстановки;

– долгосрочные меры, принимаются на основании имеющейся информации, результатов среднесрочных и долгосрочных прогнозов. Они направлены на минимизацию и, в отдельных аспектах, ликвидацию радиационных, негативных социальных и экономических последствий в долгосрочной перспективе. Это решения по отмене режимов временной эвакуации, долгосрочному закрытию доступа жителей на территории, масштабные (иногда многолетние) программы по реабилитации территорий, организация процедуры выплат компенсаций крупным экономическим агентам.

При объявлении ЧС вследствие радиационного инцидента на какой-либо территории требуется определить область применения мер на основе ряда объективных критериев, оценить количество эвакуируемых или укрываемых лиц, ожидаемое время их пребывания на переселении, а также возможные последствия предпринимаемых мер от временного прекращения экономической деятельности на покинутой территории. В условиях недостатка информации о протекании и возможных последствиях развивающейся радиационной аварии, оправданными, в рамках существующих нормативов и рекомендаций, могут быть как высокозатратные в финансовом плане решения, так и относительно недорогие. Структурированная нами по принципу стоимости и стадии применения схема мер и мероприятий при реагировании на радиационные аварии представлена в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Структура мер и мероприятий, направленные на защиту населения и реабилитацию территорий при радиационных авариях

	Меры и мероприятия		
	Малозатратные	Среднезатратные	Высокозатратные
Превентивные	Информирование населения о действиях в условиях аварии	Поддержание в готовности существующих аварийных систем, сил и средств.	Создание систем аварийного мониторинга радиационной обстановки и оповещения.
Ситуационные	Краткосрочное (до 2 сут.) укрытие. Йодная профилактика населения.	Краткосрочная эвакуация жителей. Радиационный мониторинг загрязненных территорий.	Эвакуация жителей с приостановлением ряда видов экономической деятельности.

Продолжение таблицы 1.3

	Меры и мероприятия		
	Малозатратные	Среднезатратные	Высокозатратные
Поставарийные	Информирование населения об особенностях поведения и ведения хозяйства на пострадавших территориях. Медицинский мониторинг населения.	Отмена краткосрочной эвакуации и возвращение населения. Оперативная дезактивация без отселения. Ограничения на ведение некоторых видов экономической деятельности.	Длительная дезактивация территории с временным отселением. Выплаты компенсаций за потерю доходов и утрату некоторых видов собственности.
Долгосрочные		Возвращение населения из эвакуации. Отмена долгосрочного отселения. Выплата компенсаций за потерю недвижимости. Компенсации за проживание на загрязненных территориях.	Утверждение долгосрочного отселения. Долгосрочная экологическая и социально-экономическая реабилитация территорий. Адаптация экономической деятельности к условиям радиационно загрязненных территорий.

Всегда существует вероятность, что, при несвоевременном принятии мер и неблагоприятном развитии событий жители могут пострадать или оказаться в условиях, при которых будут затруднены другие действия по их защите, что может повлечь за собой панику, а впоследствии и долгосрочные социальные проблемы. Избыточные меры, такие как объявление эвакуации на большой территории в случае переоцененной опасности, приведут к перерасходу средств и отложенные финансовые потери, что опять же вызовет негативную реакцию населения.

В таких условиях основной задачей является формирование рационального, а далее оптимального состава мероприятий, обеспечивающих минимизацию негативных социальных и гуманитарных последствий инцидента, а также сопутствующего экономического ущерба.

Существующие дозовые критерии реализации мер вмешательства и их предпосылки

В связи с тем, что всесторонний анализ протекания и отдаленных последствий аварий слишком сложен и требует одновременного участия специалистов из разных сфер деятельности, требуется иметь набор базовых критериев по различным видам вмешательства при ЧС с радиационным фактором и простые методики, позволяющие грамотно их применять в конкретных обстоятельствах с учетом их социальных и экономических особенностей.

В начальный период аварии, когда фактически могут отсутствовать какие-либо данные о возможных последствиях, могут приниматься решения о масштабных мерах защиты населения на основании рекомендаций экспертов по радиационной безопасности и специалистов, способных прогнозировать финансовые и социальные последствия такого вмешательства. На

этой стадии имеются риски влияния на принятие таких решений сторонних организаций или заинтересованных лиц, которые не обладают достаточными знаниями и информацией по мерам и критериям защиты населения. Поэтому первым фактором, на основании которого должно приниматься решение об эвакуации населения, а позднее – об отселении или отмене эвакуации, должны служить результаты измерений и прогнозы параметров радиационной обстановки, получаемые расчетными методами, а именно: динамика МЭД, дозы облучения населения, удельная активность или концентрация радиоактивных выпадений на почве.

Сам по себе параметр МЭД, который может быть легко измерен на месте, не является критерием для принятия каких-либо мер. В отдельных случаях на основании его значений проводят зонирование участка радиационной аварии, а также могут ограничивать строительство жилых либо хозяйственных зданий [15, 79]. В общем же случае превышение МЭД над естественным природным фоном свидетельствует о возникновении нештатной ситуации или наличии радиационной аномалии, что требует дальнейшего детального исследования, в частности, прогнозирования дозы для населения на ближайшие сроки [10, п. 6].

В условиях действующей концепции радиационного риска, единственным критерием радиационной опасности для человека является индивидуальная доза облучения, полученная за определенный обозримый период времени, а критерием возникновения негативных последствий при облучении группы людей – риск (вероятность) возникновения негативных последствий для здоровья, как правило, тесно связанный при групповом облучении с величиной коллективной дозы за заданный период времени. Таким образом, все критерии либо условия принятия мер вмешательства в аварийной ситуации тесно связаны с величиной накопленной либо предотвращаемой за счет реализации этих мер дозы облучения.

Относительно внешнего облучения для эффективной эквивалентной дозы на все тело человека на практике чаще используют простое приближение (1.1):

$$D(t) = K \cdot \int_{t_1}^{t_2} \dot{D}(t) dt, \quad (1.1)$$

где $\dot{D}(t)$ – мощность эквивалентной дозы, которая может быть измерена на месте (на высоте 1 м над уровнем земли или на уровне груди, если речь идет о дозе конкретного человека и измерении с помощью индивидуального дозиметра [13]), Зв/ч; t_1 и t_2 – начало и конец периода, за который оценивается доза, час; K – фактор экранирования внешнего гамма-излучения, который учитывает снижение уровня радиационного фона в помещениях и в целом может характеризовать поведение человека при проживании на загрязненной территории, б/р.

Негативные последствия для здоровья подразделяют на детерминированные и стохастические.

Под детерминированными эффектами подразумеваются последствия острого и хронического облучения (за длительность острого облучения обычно принимают срок не более 2 суток [10 табл. 6.1, 102, 103]), для которых характерен конкретный дозовый порог и рост тяжести последствий с ростом дозы. С точки зрения воздействия на население при радиационных авариях, детерминированные эффекты чаще свойственны случаям острого или хронического облучения на ограниченной территории радиационного воздействия, где легко обнаруживаются источники облучения или имеет место потребление сильно загрязненных продуктов питания. В таких местах почти всегда единственной обоснованной мерой вмешательства является отселение [22, с. 570-581]. В соответствии с международными рекомендациями [17, с. 46-49, с. 192-193], в ситуациях, при которых могут быть превышены пороги доз проявления детерминированных эффектов, защитные мероприятия должны проводиться практически при любых обстоятельствах. Дозовые критерии для таких ситуаций прописаны свои для каждого органа и, в целом, при клинических исследованиях такие эффекты могут выявляться при разовых дозах на все тело свыше 200 мЗв.

Для стохастических эффектов характерно увеличение вероятности их проявления с ростом доз облучения, но не тяжести. Для их прогнозирования обычно применяют понятие коллективной дозы облучения, так как количество эффектов зависит одновременно от дозы и численности облучаемой группы. Номинально, коэффициент радиационного риска, учитывающий вероятность заболевания всеми видами рака и возникновения наследственных эффектов, составляет $0,057 \text{ Зв}^{-1}$ [17, с. 188] и может корректироваться по мере поступления обновленных данных. Стохастические эффекты являются предметом глубоких клинических исследований на территориях с относительно невысоким уровнем загрязнения и невысокими дозами облучения большого числа жителей, где облучение преимущественно внешнее либо обусловлено потреблением продуктов питания, радионуклидное загрязнение которых находится в допустимых пределах (в противном случае должно вводиться ограничение на их потребление без отселения), но превышены их естественные уровни. Для снижения риска стохастических эффектов в условиях радиоактивного загрязнения больших территорий ставятся задачи и по снижению значений индивидуальных доз, и по числу облучаемых лиц, то есть могут использоваться меры по отселению и дезактивации территории. При дозах менее 100 мЗв при остром или аварийном облучении рекомендации строятся с учетом рисков только отдаленных стохастических эффектов. В таких случаях при ожидаемых дозах свыше 100 мЗв защитные мероприятия будут всегда обоснованы, при дозах от 20 до 100 мЗв необходимо принимать меры по их снижению за счет введения ограничений и дезактивации, при дозах от 1

до 20 мЗв рекомендуется ограничиваться их контролем и информированием населения [17, с. 102-104].

В настоящее время в задачах по выработке защитных мер действует беспороговая концепция радиационного риска [98, с. 7-8], базирующаяся на гипотезе о возможности заболевания человека при сколь угодно малой дозе облучения, в частности, имеются в виду только стохастические эффекты – онкологические заболевания и врожденные пороки у потомства. Во многом такой подход был обусловлен малой накопленной статистикой по долгосрочным эффектам при малых дозах облучения. Накопленный к настоящему времени опыт и материалы клинических исследований позволяют утверждать, что отдельные эффекты достоверно обнаруживаются только при дозах облучения (на ткани, органы или все тело) свыше 100 мЗв [17, с. 47]. Статистически значимое выявление злокачественных новообразований выявляется только при дозах свыше 200 мЗв [17, с. 192]. Превышение смертности до 10% по сравнению с контрольной группой обнаруживается при дозах 1-2 Зв [17, с. 170]. Остальные, острые эффекты облучения, такие как лучевая катаракта, острая лучевая болезнь, бесплодие, имеют пороговый характер и проявляются при дозах от 3 Зв и выше. При прогнозировании доз облучения, при которых вероятны пороговые эффекты облучения, очевидно, могут быть приняты самые радикальные и затратные меры по защите здоровья и жизни населения. Однако при их значениях в районе 100 мЗв и ниже решения принимаются с учетом беспороговой концепции в расчете на отдаленные стохастические эффекты.

Беспороговая концепция предполагает линейную зависимость между возникновением, в частности, злокачественных новообразований, генетических эффектов и дозой облучения даже при природных уровнях радиационного фона. В то же время, современные исследования показывают, что эффекты от облучения в пересчете на единицу дозы все же ниже при ее малых абсолютных значениях и, следовательно, принимаемая сегодня линейная концепция и рассчитанные на ее основе риски переоценены по мнению ряда специалистов [17, с. 177-180; 100]. В частности, выведенные риски заболеваемости и смертности от злокачественных образований не коррелируют с соответствующими естественными наблюдаемыми уровнями заболеваемости при природном радиационном фоне [76, 78, 77]. Таким образом, действующая беспороговая концепция позволяет получить некоторые численные оценки риска смертности и заболеваемости при облучении групп людей, однако руководствоваться полученными данными для выработки решений при проведении эвакуации и других затратных мер, особенно, при относительно малых прогнозируемых индивидуальных дозах, некорректно, что безусловно вызывает затруднения в процессе выработки решений.

Отечественные и международные рекомендации в области радиационной безопасности [10, 102, 103, 101, 96, 97] различают уровень вмешательства и уровень действий при выработке

мер вмешательства при превышении естественных уровней радиационного фона. Под уровнем вмешательства понимают значение предотвращаемой дозы, при котором целесообразно осуществлять конкретные защитные или восстановительные мероприятия. Под уровнем действий понимают критическое значения параметра мощности дозы излучения или концентрации радиоактивного загрязнителя, при превышении которого должны предприниматься восстановительные меры или проводиться защитные мероприятия. Оба уровня актуальны как для острой фазы аварии, так и в ситуации хронического облучения. Подобное разграничение играет свою роль при анализе эффективности вмешательства с учетом его своевременности и прочих факторов.

В международных рекомендациях [102, 103, 101, 96, 97] разделяют два принципа предотвращения радиологических эффектов облучения: принцип обоснования и принцип оптимизации. Принцип обоснования нацелен на предотвращение клинически определяемых детерминированных эффектов облучения. При определении угрозы их возникновения принцип требует особого обоснования для решения о непроведении срочных защитных мероприятий. Обоснованием может служить ситуация, когда вред здоровью от вмешательства превышает вред от облучения. Принцип оптимизации нацелен на снижение риска стохастических эффектов облучения. Согласно ему чистая польза от снижения радиационного ущерба (выражающаяся как правило в величине дозы облучения) за вычетом ущерба от самого вмешательства, должны быть максимальной.

Облучение населения и персонала предприятий в России, как в штатных условиях, так и при радиационных ЧС, регламентируется Нормами радиационной безопасности 99/2009 [10]. Принятые в [10] правила преимущественно опираются на международные нормы и отсюда критерии по принятию экономически затратных мер во многом в них дублируются. Меры по укрытию населения, йодной профилактике и экстренной эвакуации могут быть проведены еще на фазе активного протекания аварии и основываются они на прогнозах дозы облучения за короткие периоды времени – 2 и 10 суток. Эти меры могут быть осуществлены без значительных сопутствующих затрат, и даже эвакуация может быть проведена без нарушения жизненного уклада населения, если есть условия для ее отмены.

При обосновании мер, направленных на улучшение социального и экономического положения на пострадавших территориях в долгосрочном периоде, целесообразно использовать критерии, учитывающие последствия на сроках значительно позже момента завершения активной фазы аварии. Так, согласно [10, п. 6.4], уровни вмешательства для начала временного отселения населения составляют 30 мЗв/мес и допускается возвращение при дозах 10 мЗв/мес (здесь и далее под дозой подразумевается индивидуальная эффективная эквивалентная доза на все тело, если нет дополнительных уточнений). Долгосрочное отселение может

рекомендоваться, если данные критерии будут превышены в течение года и более, а также при прогнозируемых дозах от 50 мЗв/год (свыше 500 мЗв/год – в обязательном порядке) или свыше 1000 мЗв за счет потребления местных загрязненных продуктов питания за весь срок эвакуации. Остальные критерии либо касаются менее радикальных и затратным мер вмешательства, либо основываются на периодах прогнозирования менее одного месяца сразу после аварии.

Стоит отметить, что перечисленные критерии действуют в условиях аварии, а не повседневного облучения. Относить или не относить те или иные территории к зонам аварийного облучения – область ответственности органов власти. Если у властей стоит задача сохранить территории в режиме повседневного облучения, то и российские и международные нормативы предписывают ограничивать индивидуальные дозы облучения от техногенных радионуклидов (сверх естественного фона) для таких территорий до уровней 1 мЗв/год с учетом условий жизни населения (возможного экранирования за счет пребывания в зданиях, ограничения потребления загрязненных продуктов питания, воды и т.п.).

Российские нормативы [10] разделяют критерии вмешательства при аварийном загрязнении территорий и обнаружении локальных радиационных аномалий, применяя для этого категории зонирования. Применение зонирования свойственно для принятия долгосрочных мер на территориях, где требуется организовать деятельность населения в соответствии со сложившейся стабильной радиационной обстановкой. При аварийном загрязнении в качестве критерия зонирования территории используется прогнозируемая на основе измеренных уровней загрязнения окружающей среды величина эффективной дозы облучения за год. Так, при ожидаемой дозе менее 1 мЗв/год вмешательства не требуется, а проводятся только мероприятия по радиационному контролю (зона радиационного контроля). При дозах 1-5 мЗв/год, помимо мониторинга, могут применяться меры оптимизации, направленные на снижения дозовых нагрузок (зона ограниченного проживания населения). В зоне с ожидаемой дозой 5-20 мЗв/год проводятся дополнительные разъяснительные работы с населением о потенциальном риске здоровью при постоянном проживании на загрязненных территориях, но сам въезд и поселение не запрещается. Серьезные ограничения на проживание начинаются от 20 до 50 мЗв/год, в частности, не разрешается въезд для поселения, постоянное проживание детей и женщин репродуктивного возраста (зона отселения). Начиная с доз 50 мЗв/год запрещается любое поселение, однако, может сохраняться хозяйственная деятельность и природопользование при их регулировании особыми актами (зона отчуждения).

На основании отечественных и международных нормативных документов [10 п. 6; 17, с. 124] в области радиационной безопасности в диссертационном исследовании были структурированы наиболее значимые при долгосрочном планировании в поставарийной стадии реагирования и затратные по сопутствующим социальным и экономическим последствиям

меры в соответствии с критерием по ожидаемой дозе облучения населения, характеризующим обоснованность их применения: длительное отселение жителей и его отмена, введение и отмена ограничений на потребление и производство продуктов питания, реабилитация территории, включая ее дезактивацию (Таблица 1.4).

Таблица 1.4 – Дозовые критерии обоснования отдельных поставарийных и долгосрочных мер вмешательства

Дозовый критерий принятия решения	Невмешательство	Мера вмешательства			
		Введение ограничений на деятельность	Дезактивация	Эвакуация	Отселение
<1 мЗв/год	обосновано	не требуется			
1-20 мЗв/год	допускается	малообоснованно			не требуется
20-50 мЗв/год	допускается только в ненаселенных территориях	может рекомендоваться			не требуется (может быть отменено при <10 мЗв/мес.)
50-100 мЗв/год					может рекомендоваться (или при >30 мЗв/мес.)
>100 мЗв/год	территориях	обосновано	не обоснована, если не планируется проживание	обосновано	
>500 мЗв/год		обязательно		обязательно	

Источник: составлено на основе [10, 17].

Из данных таблицы 1.4 следует, что для территорий с относительно невысокими либо средними уровнями радиационного загрязнения, где ожидаемые максимальные годовые дозы облучения жителей находятся в диапазоне от 20 до 100 мЗв/год, дозовые критерии принятия решения по основным видам поставарийного вмешательства установлены не жестко, в связи с чем решение о вмешательстве в этих условиях необходимо принимать как с учетом радиационных рисков для населения (и их стоимостного эквивалента), так и с учетом ожидаемых экономических и социальных последствий вмешательства.

Выделение критериев по эвакуации и отселению населения осложняется редкостью применения данной меры на практике. Всего четыре раза в мире проводилась долгосрочная эвакуация:

– в СССР при авариях на заводе «Маяк» в 1957 году и в 1986 году при аварии на ЧАЭС [22, с. 35-38, с. 200-204, с. 478-500; 43] (в обоих случаях имелись для этого основания в целях ограничения дозовых нагрузок на население);

– эвакуация населения в пятимильной зоне АЭС в Три-Майл-Айленде (США) в 1979 году (имела превентивный характер и не может исследоваться как пример применения радиационных критериев);

– эвакуация и отселение в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» в Японии в 2011 году (исследование продолжается, тем более, что к 2017 году накопился большой объем данных для анализа).

Ввиду редкости применения данной меры решения по ее применению могут приниматься не на основании актуальных отечественных и зарубежных рекомендаций, а руководствуясь опытом прошлых инцидентов. В таких условиях возникает опасность того, что современные нормативы и экономическая целесообразность (или нецелесообразность) вмешательства окажутся не так важны, как наличие опыта принятия решений в аналогичных условиях (например, при аварии на ЧАЭС), что является очевидной ошибкой, так как за столь длительный период времени в стране изменились как социально-экономические, так и правовые условия. В новых же условиях проведение мероприятий потребует дополнительного экономического обоснования, научная база для проведения которого остается недостаточно проработанной. Таким образом, политические условия и общественное мнение, основанное на историческом опыте, могут превалировать при принятии решений о вмешательстве, что, безусловно, неоправданно с точки зрения радиационной безопасности и экономической науки, но исторический опыт и применявшиеся ранее подходы, безусловно, потребуются учитывать либо обосновывать их неприменимость в новых условиях.

Так, при аварии на ЧАЭС было использовано деление территории на четыре зоны на основании ожидаемых в ближайший год доз облучения и уровней загрязнения территории. Деление и описание зон представлено в таблице 1.5.

Подобный «чернобыльский» подход деления территории при радиационной аварии является одним из возможных при рассмотрении управленческих решений по долгосрочным мерам и является более консервативным чем приведенный в п. 3.4 НРБ-99/2009 [10]. В иных условиях, на более густонаселенной или экономически развитой территории, он должен подвергаться критическому анализу, как несоответствующий современным принципам обеспечения радиационной безопасности, а вместо него должны предлагаться более гибкие и обоснованные критерии.

В конечном итоге, для затронутых аварийной ситуацией территорий, возвращение к нормальным жизненным условиям, восстановление и обеспечение устойчивого развития экономики, а также социальная и правовая защита населения должны являться конечной целью принимаемых решений, если это позволяет осуществляемая складывающаяся радиационная

обстановка. Определяющим параметром радиационной обстановки, на основании которого принимаются решения, в конечном итоге всегда является индивидуальная или коллективная доза облучения на все тело человека, которая оценивается на основании проводимых измерений и по результатам прогнозирования, проводимого с учетом физических процессов и явлений, свойственных аварийному радионуклидному загрязнению территории.

Таблица 1.5 – Зонное деление территории, подвергшейся радиоактивному загрязнению в результате аварии на ЧАЭС

Удельная активность изотопов цезия на почве, кБк/м ² (Ки/км ²)	Описание территории
>1480 (40)	Зона отчуждения. Зона, закрытая для посещения. Запрещается постоянное проживание населения, ограничивается хозяйственная деятельность и природопользование.
555-1480 (15-40)	Зона отселения. При среднегодовой дозе свыше 5 мЗв жители должны быть отселены из данной местности в обязательном порядке. На остальной территории зоны отселения граждане, принявшие решение о выезде на другое место жительства, также имеют право на возмещение вреда и меры социальной поддержки.
185-555 (5-15)	Зона проживания с правом на отселение. Зона периодического проведения радиационного контроля. Граждане, проживающие в населенных пунктах этой зоны, в которых среднегодовая доза облучения населения превышает 1 мЗв, и принявшие решение о выезде на другое место жительства, имеют право на возмещение вреда и меры социальной поддержки.
37-185 (1-5)	Зона проживания с льготным социально-экономическим статусом. В указанной зоне среднегодовая доза облучения населения не должна превышать 1 мЗв.

Источник: составлено на основе [1, 2]

Экономические подходы к защите населения при радиационных авариях

Обеспечение радиационной безопасности в Российской Федерации, в том числе на радиационно загрязненных территориях, относится к функциям Единой государственной системы предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций, деятельность которой регулируется законом «О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера» [2]. В соответствии со статьей 4 данного закона, перед системой, среди прочего, стоят задачи:

- сбора, обработки и обмен и выдача информации в области защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций;
- прогнозирования и оценки социально-экономических последствий чрезвычайных ситуаций;
- ликвидации чрезвычайных ситуаций.

В соответствии с 7-й статьей этого же закона определяются базовые принципы защиты населения и территорий от чрезвычайных ситуаций, среди которых можно выделить важную роль экономической составляющей при принятии каких-либо решений:

- заблаговременно должны проводиться мероприятия, направленные на предупреждение ЧС и на максимально возможное снижение ущерба в случае их возникновения;
- планирование и осуществление мероприятий должно проводиться с учетом экономических, природных и иных особенностей территорий;
- объем и содержание мероприятий по защите населения и территорий при ЧС должно определяться из принципа необходимой достаточности и максимально возможного использования имеющихся сил и средств (без привлечения избыточных ресурсов без обоснованной необходимости).

В соответствии со статьей 11 закона [2], решения о проведении эвакуационных мероприятий в условиях ЧС принимают органы государственной власти субъектов Российской Федерации, в том числе, местные органы власти могут принимать такие решения самостоятельно.

В России регулирование безопасности в сфере атомной энергетики осуществляется законами «Об использовании атомной энергии» [5] и «О радиационной безопасности населения» [4]. В соответствии со статьями 19-20 закона [4] эксплуатирующая АЭС организация обязана в целях предупреждения и минимизации последствий радиационных ЧС иметь:

- подготовленные сценарии потенциальных радиационных аварий с прогнозом их радиационных последствий;
- выработанные критерии принятия решений при возникновении радиационной ЧС;
- согласованные с органами власти планы мероприятий по защите персонала и населения от радиационных последствий аварии.

В Российском законодательстве и в международных рекомендациях в сфере радиационной безопасности указывается, что меры вмешательства при радиационных авариях должны обосновываться не только радиационными (преимущественно дозовыми) критериями, но и социально-экономическими, сформированными на основе взвешенных экологических, экономических и социальных ущербов и затрат, неизбежно сопутствующих проведению масштабных мероприятий по защите населения и территорий.

Так, нормы [10] требуют, чтобы перед принятием решения о применении любой защитной меры было получено заключение о ее положительном суммарном радиологическом (преимущественно) и социально-экономическом эффекте. Выгода от предотвращения радиационного ущерба, который может выражаться как в накопленной дозе облучения, так и

рисках (или же количестве фактов) возникновения детерминированных или стохастических эффектов, должна быть больше, чем связанные с мерами вмешательства потери в эквиваленте нерадиационных рисков, финансовых затрат, социальных и экономических негативных эффектов, дополнительных доз для персонала аварийных бригад и прочих трудноизмеримых параметров. Другими словами, вмешательство должно принести облучаемым лицам и обществу больше пользы, чем вреда, а снижение ущерба за счет уменьшения дозы облучения должно эквивалентно оправдывать его стоимость и другие сопутствующие издержки. При этом чистая экономическая польза от снижения радиационного воздействия за вычетом ущерба от вмешательства должна быть максимальной.

Таким образом, принятие решений в условиях развития радиационного инцидента и высокой вероятности возникновения масштабных гуманитарных и экономических последствий официально предполагают необходимость априорной оценки экономических результатов вмешательства, что требует применения соответствующего научного подхода.

В основе принципов, предполагающих социальное и экономическое обоснование предпринимаемых мер по ликвидации последствий аварии и реабилитации территорий, лежит соблюдение разумного баланса между положительными эффектами от предпринятых мер (предотвращаемыми негативными последствиями) и сопутствующими негативными эффектами (возможными затратами). Согласно [10, п. 5] ограничение облучения население при ЧС обеспечивается применением определенных мер защиты, что влечет за собой неизбежные финансовые затраты, возможный ущерб экономике территорий и дополнительный риск для привлекаемого аварийного персонала. Так, при эвакуации в зоне ее проведения прекращает функционировать производство, торговля и сельское хозяйство и даже кратковременное отсутствие человека может нанести урон целым отраслям хозяйства, сопоставимый с их годовым оборотом. Особенно чувствительно к различным ограничительным мерам сельское хозяйство, в частности, животноводство. Другими словами, любые действия и распоряжения властей, направленные на ликвидацию ЧС, в том числе и радиационного характера, в районах с высокой плотностью населения, развитым промышленным или сельскохозяйственным производством, могут, в конечном итоге, быть выражены в финансовом эквиваленте в виде затрат государства, потерь экономических агентов и социального ущерба для населения [40, с 13-17]. Безусловно, все действия по защите населения, предпринимаемые в ходе ликвидации аварии и ее последствий, направлены на устранение экологического и социального ущерба, который может быть вызван непосредственным радиационным воздействием на людей или изменением их среды проживания. Эти ущербы также могут быть выражены в финансовом эквиваленте.

В сфере обеспечения радиационной безопасности на практике имеют место определенные затруднения, сопряженные с реализацией процедур предварительной оценки ущербов, возмещения вреда населению, экономике и окружающей среде вследствие возникновения и реагирования на техногенные, в том числе и радиационные, аварии:

- зачастую, оценка социально-экономических последствий не производится;
- применяются некорректные методы, ориентированные на экономическую или правовую систему, не свойственную рассматриваемой территории;
- некорректно используются нормативные методы оценки, при этом не производится анализ получаемых результатов на корректность;
- отсутствует единый признанный подход к стоимостной оценке ущербов;
- имеются методические пробелы по оценке ущербов для отдельных природных компонент или по отдельным видам загрязнения;
- отсутствуют подходы для учета вторичного экономического и социального ущербов, вызванных применением мер по предотвращению прямого ущерба и т.д.;
- отсутствуют аттестованные программные средства оценки социальных и экономических последствий ЧС с радиационным фактором.

Во многом эти затруднения обусловлены неоднозначным опытом и нерешенными проблемами, оставшимися после ликвидации аварии на ЧАЭС. По совокупности, существующие нормативные неопределенности и сложности управления в условиях аварийного реагирования могут приводить к принятию волюнтаристских решений, ведущих к еще большим социальным и финансовым потерям в долгосрочной перспективе.

Численный расчет и прогнозирование ожидаемых затрат и выгод при реализации мер вмешательства представляет собой серьезную задачу, требующую поиска и применения различных методик, подбора и анализа больших объемов данных, связанных, преимущественно, с учетом особенностей конкретных территорий. В тоже время, в области управления природопользованием достаточно подробно проработаны подходы к оценке экономического ущерба и эффективности затрат на проведение природоохранных и реабилитационных мероприятий при техногенных и, в частности, радиационных авариях, которые могут быть использованы специалистами по радиационной безопасности.

Общие вопросы оценки последствий радиационного загрязнения территорий затронуты, в частности, в работах [61, 36]. Импульс к развитию данного направления дала также авария на Чернобыльской АЭС в 1986 г., проблемы оценки экономических последствий которой освещены в работах российских и украинских ученых [35, 57, 37]. Однако, с точки зрения решения актуальных проблем обеспечения радиационной безопасности населения и

планирования мер поставарийного вмешательства, предлагаемые в них подходы не лишены недостатков.

Так, разработанные подходы в области управления природопользованием при радиационных авариях преимущественно направлены на получение оценок накопленного экологического ущерба, прямых и косвенных потерь экономики, экономического ущерба от ухудшения здоровья населения и участников аварийных работ, а также затрат на проведение природоохранных мероприятий и оценки их рентабельности. В частности, в них обычно постулируется, что радиационный фактор и радиационное загрязнение территории являются основным источником экономического ущерба при радиационных авариях [37]. В качестве цели проведения оценки экологических ущербов при аварии в них преимущественно указывается оказание поддержки при решении экономических и экологических проблем, а также обоснование политических решений на уровне государства, как правило, в долгосрочном периоде.

При этом, в работах экономистов недостаточно уделяется внимания проблеме управления величиной конечного экологического ущерба за счет принятия более эффективных решений по введению мер отселения, эвакуации или ограничений на осуществление экономической деятельности, за исключением существующих подходов к оптимизации затрат на проведение природоохранных мероприятий в условиях стабильной радиационной обстановки [61]. В них, как правило, переоценивается негативное влияние радиационного фактора на экологическую обстановку, а также на возможность проживания и ведения экономической деятельности на загрязненных территориях. При этом мало уделяется внимания оценке выгод от предотвращения облучения населения, снижения дозовых нагрузок либо снижения радиационных рисков для здоровья за счет реализации отдельных мер вмешательства.

С точки зрения управления поставарийным реагированием и обеспечения радиационной безопасности населения при ликвидации последствий аварийного радиационного загрязнения территорий, существует необходимость и возможность управлять затратами и ущербами. Как правило, наиболее масштабные и затратные мероприятия по защите населения и реабилитации территорий проводятся в течение достаточно длительного периода после завершения активной фазы аварии. В это время могут вводиться и отменяться режимы эвакуации и отселения жителей, ограничения на посещение территорий и ведение на них отдельных видов экономической деятельности, проводится дезактивация территорий, а также принимаются решения об изменении границ зон и масштабов реализации этих мер. Такой период может длиться годами и полученные на его протяжении оценки накопленного экологического ущерба, ущерба здоровью для населения и итоговых убытков для экономики не могут считаться

окончательными или достоверными, так как впоследствии могут быть скорректированы границы зон реализации уже принятых мер или полностью отменены ранее введенные ограничения за счет корректировки дозовых критериев вмешательства либо из-за естественного улучшения радиационной обстановки. В этих условиях возникает потребность в прогнозировании выгод и ущербов от принятия отдельных мер вмешательства и в выработке критериев их эффективности.

Как было отмечено выше, меры поставарийного вмешательства принимаются на основе измерений параметров складывающейся радиационной обстановки либо на результатах их математического моделирования и прогнозирования радиационных рисков для населения. Для большей части затрагиваемых при аварии территорий и населения уровни загрязнения и потенциальных рисков для здоровья относительно невелики, и, как следует из таблицы 1.4, в области аварийных либо годовых индивидуальных доз облучения до 100 мЗв не существует жестких критериев принятия решений по наиболее затратным и ущербоемким мероприятиям. На этих территориях они должны приниматься по результатам предварительного заключения о совокупном положительном радиологическом и экономическом эффекте от их реализации, то есть существует возможность принимать эффективные решения по вмешательству и оптимизировать возможный ущерб на основе предварительного анализа баланса прогнозируемых затрат и выгод.

Развитие подходов к выработке таких эффективных решений является возможным направлением развития теории и методологии проблемы экономической оценки эффективности и прогнозирования затрат на реабилитацию естественной экосистемы в регионе в сфере управления природопользованием. Для этого должны быть также устранены отдельные проблемы прогнозирования издержек и выгод, связанных с последствиями радиационного воздействия на население и его предотвращением, а также выбраны методики для оценки экономических последствий проведения масштабных мер вмешательства на заселенных, экономически активных территориях.

Среди проблем в сфере управления природопользованием, затрудняющих оценку ущерба для здоровья граждан при радиационном загрязнении территорий отмечается, в частности, недостоверность или неполнота данных по дозам облучения населения и участников работ по ликвидации последствий аварий [37], в связи с чем для этого используются данные по фактической смертности и заболеваемости (либо данные по ожидаемым эффектам), достоверность которых, как правило, невысока, что в целом характерно для последствий радиационного облучения в относительно малых дозах. В этой же связи в работах экономистов недостаточно освещен вопрос оценки экономических выгод от проведения защитных или реабилитационных мероприятий как функции величины предотвращаемой дозы облучения. Это

обосновывается тем, что влияние облучения на частоту проявления негативных стохастических эффектов для здоровья остается малоизученным, в связи с чем пренебрегается возможностью использовать для этого результаты математического моделирования и прогнозирования коллективных доз для населения.

На этом фоне зачастую более прогрессивными выглядят результаты исследователей в сфере радиационной безопасности, которые продвинулись в области прогнозирования ущербов для здоровья населения за счет активного использования в расчетах результатов моделирования доз облучения, выгоды от предотвращения которых определяют положительный экономический эффект от реализации мер защиты населения и реабилитации загрязненных территорий. В последние два десятилетия были значительно усовершенствованы математические модели и технические возможности прогнозирования последствий радиационного воздействия для населения уже на ранних стадиях развития аварии. Так же ведущие исследовательские лаборатории и институты при оценке последствий радиационных аварий активно используют аналитические модели для прогнозирования заболеваемости и смертности в результате коллективного облучения малыми дозами (см раздел 1.3). В этой связи, современные подходы к прогнозированию и оценке экономических эффектов в результате коллективного облучения (а также его предотвращения) могут быть применены для развития методологических подходов к оценке экономических последствий аварийного радиационного загрязнения территорий.

1.3 Теоретические подходы к оценке экономического ущерба при радиационном воздействии на население и загрязнении территории

Модели оценки экономического ущерба и затрат при радиационных авариях

В России и в других странах мирового сообщества в настоящее время не существует общепринятой в сфере радиационной безопасности методики для оценки всего комплекса экономических и социальных последствий экологического вреда и убытков, которые могут быть причинены вследствие радиационного воздействия АЭС, в том числе, в условиях аварии. В этом направлении ведутся работы и пока они основываются на современной международной практике расчетов воздействия хозяйственной деятельности на окружающую среду и здоровье населения [101, 37, 99, 133, 97]. В тоже время, и за рубежом, и в нашей стране существуют определённые рамочные методики, предопределяющие общие принципы оценки затрат и

ущербов при техногенных авариях, которые могут успешно применяться при авариях с радиационными последствиями:

- Методические рекомендации Госгортехнадзора Российской Федерации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах [11];
- Методология Тихоокеанской Северо-Западной Национальной Лаборатории (PNNL) для оценки затрат на реабилитацию территории в результате террористического акта с использованием «грязной бомбы» [115];
- Общее руководство по управлению реабилитацией заселенных территорий, загрязненных в результате радиационной аварии, разработанное в 2007 году в рамках интегрированного проекта EURANOS Шестой Рамочной Программы Европейской Комиссии (Ядерные Реакции/Радиационная Защита): «Европейский подход к управлению радиологическими чрезвычайными ситуациями и стратегиями реабилитации» [92];
- Методологии Сандийских национальных лабораторий (SNL) по оценке экономических рисков от аварий на АЭС [84] и по оценке затрат на проведение защитных мероприятий, предпринимаемых для обеспечения безопасности населения после аварийной ситуации, связанной с диспергированием плутония [86];
- Методики оценки экономических затрат, используемые в программных комплексах RODOS (модуль ECONOM) [133], MELCOR (модуль MACCS) [87] и др.

Так, в 1996 году в практику работы практически всех стран Европы был внедрен компьютерный комплекс RODOS [133, 91] – оперативное средство поддержки принятия решений в случае крупных радиационных инцидентов, составной частью которого является модуль ECONOM, включающий методики расчёта экономического ущерба при проведении долгосрочных защитных мероприятий. В нем детально рассматриваются подходы к оценке затрат на проведение дезактивации, переселение людей, проведения защитных мероприятий в сельском хозяйстве, покрытие ущерба от отдаленных последствий для здоровья населения.

Модуль оценки стоимости дезактивации описывается в работе [133], где подробно дается расчет стоимости и трудозатрат на проведение различных методов дезактивации, преимущественно, автоматизированных или ручных работ по удалению активностей с поверхностей, земельным работам, складированию и захоронению отходов. В нем по умолчанию используются данные для Франции 1998-1999 годов, которые для других территорий должны быть пересчитаны в соответствии с ее экономическими особенностями, в частности, с учетом стоимости труда. Методика ECONOM позволяет оценить трудозатраты и получить итоговую сумму, относящуюся к непосредственно к зарплате рабочих. Затраты на расходные материалы и технику необходимо будет учитывать дополнительно с учетом экономических особенностей территории. В разных условиях и для различных территорий

разные комплексы мер будут различаться по своей эффективности, что потребует дополнительного обоснования для их применения в каждом отдельном случае. На сегодняшний день это наиболее полный документ, пригодный для практического использования, который можно взять за базу для получения обоснованных численных оценок стоимости работ на загрязненных территориях. В нем также даются модели расчета затрат на эвакуацию, где учитывается стоимость перемещения населения, его проживания и питания в эвакуации, оплата услуг обслуживающего персонала, потери дохода жителей на период эвакуации, потери экономических субъектов и государства из-за прекращения ведения экономической деятельности на пустующих территориях.

Модели оценки ущерба здоровью вследствие облучения

Помимо оценки стоимости чисто хозяйственных затрат, существует также проблема финансовой оценки ущерба здоровью (стоимостной оценки дозы облучения) населения на загрязненных территориях. Ввиду отсутствия доказанных медицинских эффектов при малых дозах облучения их сложно оценить в форме ущерба здоровью и перевести в стоимость его восстановления, в форме денежной компенсации. Однако, как было отмечено ранее, линейная концепция радиологических рисков требует учитывать и такой ущерб, в особенности, при облучении большого числа людей. В настоящее время существует несколько методик, используемых в расчетах стоимостного эквивалента радиационного ущерба в разных странах и организациях, дающих различные оценки для одинаковых условий облучения, что затрудняет выбор одной из них в качестве оптимальной.

Автором были систематизированы существующие практические подходы к оценке стоимости ущерба как функции от величины дозы облучения [29]. Рассмотрены четыре подхода, представленные в нормативных документах НРБ 99/2009 (Россия, [10]) и NUREG 1530 Rev.1 (США, [113]), в расчетной модели СОСО-2 (Великобритания, [94]) и в научной работе [109] японских исследователей из префектуры Фукусима. С их помощью были проведены сравнительные расчеты предотвращенного ущерба от облучения на основе актуальных данных по эвакуации населения в префектуре Фукусима за 2011-2017 гг., которые позволили оценить степень расхождения получаемых оценок и возможность применения данных моделей на практике.

В подходе, описываемом в НРБ 99/2009, стоимостный эквивалент единицы дозы коллективного облучения населения рассчитывается из предположения, что один чел.-Зв влечет ущерб, эквивалентный утрате одного года жизни человека. Уточненные исследования предлагают учитывать длительность облучения, пол и возраст, и дают более низкие оценки сокращения продолжительности жизни на 1 чел.-Зв. Документ [10, п. 2.2] предполагает, что стоимостный эквивалент утраты года жизни должен устанавливаться специальным документом

федерального уровня и не должен быть меньше значения национального годового душевого дохода (ВНД). В общем случае эквивалент 1 чел.-Зв можно трактовать достаточно свободно в различных обстоятельствах, для чего удобно использовать известные значения душевого валового национального продукта (ВВП, для большинства стран мира мало отличается от ВНД), в особенности для сравнительных расчетов по разным регионам. Для сравнения, в европейской расчетной модели развития радиационных аварий RODOS, в частности, приемлемым считается эквивалент стоимости 1 чел.-Зв равный 20 000 евро [133], что вполне согласуется с определением, приведенным в [10, п. 2.2]. В России в работах [50, 51] предлагались также более обоснованные значения эквивалента единицы дозы облучения в годах утраты продолжительности жизни, основанные на уточненных оценках радиационных рисков, учитывающие его различия для разных групп лиц и разных условий облучения: 0,8 лет при остром облучении и 0,38 – при хроническом для российских условий (при хроническом облучении 0,8 лет – для детей и 0,65 – для женщин). Оба подхода могут быть использованы при оценке стоимостного эквивалента нанесенного населению ущерба в условиях малых дозовых нагрузок или при расчете положительного эффекта от предотвращения дозы облучения в результате вмешательства.

В Соединенных Штатах Америки денежный эквивалент ущерба от облучения определяется действующим с 2015 года документом NUREG-1530 Rev.1, разработанный Комиссией по ядерному регулированию США (NRC), на который опираются органы регулирования в области радиационной безопасности при анализе мер по предотвращению облучения. Начиная со своей предыдущей версии NUREG-1530 от 1995 года [114], данная серия документов регламентирует только ущерб здоровью от дополнительного облучения без учета косвенных материальных потерь. В его основе лежит подход, включающий анализ издержек и выгод, а также оценку денежного эквивалента ожидаемого ущерба здоровью человека при его облучении. С 2015 г. усредненное значение данного денежного эквивалента составляет \$510 тыс./Зв индивидуальной дозы облучения для населения и \$100 тыс./Зв для персонала. На практике эти значения применяются и для пересчета финансового эквивалента при коллективном облучении. В то же время, они не являются обязательными к применению, но рекомендуются к использованию при выработке решений при разработке документов по обеспечению радиационной безопасности, в том числе на АЭС, но не предназначены для оценки ущерба от возникновения детерминированных эффектов и летальных случаев, вызванных острым облучением. Величина стоимостного эквивалента облучения в [113] определяется как произведение номинального коэффициента риска стохастических последствий для здоровья, обусловленных радиационным облучением ($0,057 \text{ Зв}^{-1}$ в соответствии с публикацией [17, с. 188]), и параметром VCL усредненного эквивалента

стоимости человеческой жизни. VCL численно близок к параметру WTP – сумме расходов, которую общество готово платить за снижение риска преждевременной смерти, определяемого в ходе социально-экономических исследований и официально устанавливаемого различными ведомствами в США. Официально, для своих задач, значение величины VCL периодически устанавливают в США Департамент транспорта, Административно-бюджетное управление, Министерство внутренней безопасности и другие ведомства. NRC в документе [113] использовала наиболее актуальные усреднённые значения для VCL для США на 2014 г., индексируя их на последующие периоды в соответствии с выражением (1.2):

$$VCL = VCL_{2014} \cdot \frac{CPI}{CPI_{2014}} \cdot \left(\frac{MUWE}{MUWE_{2014}} \right)^{IE}, \quad (1.2)$$

где VCL_{2014} – базовая величина стоимости жизни, определенная NRC на 2014 год как \$9 млн (\$5,3 млн для нижней или \$13,9 млн для верхней оценки); CPI – текущий индекс покупательной способности для США в процентах (CPI_{2014} – базовое значение индекса за 2014 год – 236,7%); $MUWE$ – средний еженедельный доход в США ($MUWE_{2014}$ – \$791); IE – безразмерный коэффициент эластичности показателя стоимости жизни VCL по доходу, равный 0,5.

Высокие значения VCL , WTP и самого денежного эквивалент единицы дозы облучения в нормативе [113] для США, который приблизительно на порядок выше значения ВНД, обусловлен высоким уровнем доходов, низкими рисками и высокими уровнями вложений в безопасность в США в целом, что радикально отличает данный подход от предлагаемого в НРБ-99/2009.

В Великобритании для оценки компенсации ущерба при радиационных авариях применяется расчетная модель СОСО-2, где используется параметр стоимости предотвращения смерти VPF , сходный по способу оценки с параметром VCL . Для потенциальных летальных случаев, вызванных коллективным облучением группы населения, он оценивается по формуле (1.3):

$$VPF = WTP + NetOutput + Med, \quad (1.3)$$

где WTP – готовность группы платить за снижение риска смерти, ед. валюты; $NetOutput$ – стоимость чистого произведенного продукта, утрачиваемого из-за смерти человека, ед. валюты; Med – стоимость медицинского вмешательства до момента смерти, ед. валюты.

Для оценки и индексации WTP используется формула, аналогичная выражению (1.2), где на 2002 год в Великобритании его значение установлено равным £1,17 млн, а на практике WTP

может иметь сложную зависимость от возраста и дохода людей, что для ограниченных групп потребуется учитывать дополнительно. Значение *NetOutput* на 2002 год рекомендуется брать равным £81 тыс. Для оценки параметра *Med* в СОСО-2 использовались усредненные показатели по лечению основных видов радиационно-индуцированных стохастических и детерминированных заболеваний. Для расчета ущерба от летальных исходов заболеваний (HCF) при облучении в СОСО-2 используется универсальная формула (1.4), учитывающая интенсивность летальных исходов после облучения:

$$HCF = \sum_{n=1}^N \frac{WTP_n + NetOutput_n + Med_n}{(1+r)^{L_n}}, \quad (1.4)$$

где N – совокупное число смертей в результате облучения; L_n – временной лаг между событием облучения и n -ым летальным исходом, лет; r – годовая ставка дисконтирования (1,5 %).

Ущерб от несмертельных случаев заболеваемости (HMC) складывается из затрат на лечение, потери производства чистого продукта, снижения качества жизни пациента на время лечения и оценивается по формуле (1.5):

$$HMC = \sum_{n=1}^N \frac{(1-QALY_n) \cdot VOLY \cdot T_n + NetOutput_n + Med_n}{(1+r)^{L_n}}, \quad (1.5)$$

где N – число случаев заболевания; L_n – временной лаг между событием облучения и заболеванием n -го пациента в годах; T_n – длительность лечения n -го случая болезни в годах; $QALY_n$ – безразмерный коэффициент качества жизни для n -го случая заболевания (0,5 для солидных раков и лейкемии); $VOLY$ – стоимостный эквивалент полноценного года жизни (в СОСО-2 принимается равным £30 тыс., что близко к величине ВВП на душу населения).

Количество случаев заболеваний и смерти от радиационно-индуцированных раков, а также число наследственных эффектов оценивается на основании известных данных по дозам облучения в группе и модели рисков, представленной в докладе Научного комитета при ООН по изучению воздействия ядерного излучения (НКДАР ООН) [122], по которой для оценки случаев солидного рака применялись коэффициенты облучения толстого кишечника, для случаев лейкемии – коэффициенты облучения красного костного мозга, для наследственных эффектов – коэффициенты облучения гонад.

Стоимостный эквивалент возникновения негативных эффектов от повышенного облучения для модели СОСО-2 представлен в таблице 1.6 (для Англии и Уэльса). В общем случае, предлагаемый в [94] подход требует детальных данных о составе исследуемой группы,

динамике смертности и заболеваемости в ней, либо предполагает введение некоторых упрощений, которые позволят обойти нехватку исходных данных без значимого снижения достоверности конечных оценок.

Таблица 1.6 – Оценки стоимостного эквивалента ущерба здоровью в пересчете на единичный эффект, полученные на основании коэффициентов модели СОСО-2

Эффекты от повышенного облучения		Стоимостный эквивалент (на 2017 г.), £тыс.
Наследственные эффекты		93,0
Летальный исход	Лейкемия	965,2
	Солидный рак	770,6
Случаи заболевания	Лейкемия	83,5
	Солидный рак	62,2

Источник: составлено на основе [94].

Для анализа здоровья эвакуированных жителей префектуры Фукусима из городов Сома и Минамисома в 2017 году японскими специалистами был применен подход к оценке ущерба здоровью на основе оценки параметра LLE – снижения ожидаемой продолжительности жизни жителей за счет возрастания рисков радиационно индуцированных случаев онкологических заболеваний при групповом облучении. Для оценки дополнительного риска возникновения летальных случаев солидного рака (ERR_C) или лейкемии (ERR_L) при групповом облучении с известными дозами, использовались формулы (1.6) и (1.7) линейно-квадратичной модели НКДАР ООН [122], как наиболее достоверная оценка для диапазона доз ниже 2 Зв.

$$ERR_C = (0,22 \cdot D + 0,18 \cdot D^2) (1 + 0,29 \cdot g) \cdot \exp \left[-0,034 \cdot (age_{ex} - 30) - 0,89 \cdot \ln \frac{age_{at}}{70} \right], \quad (1.6)$$

где D – эквивалентная доза на кишечник, Зв; $g = -1$ для мужчин и $g = 1$ – для женщин; age_{ex} – возраст на момент облучения, годы; age_{at} – возраст на момент оценки риска, годы.

$$ERR_L = (1,612 \cdot D + 1,551 \cdot D^2) \cdot \exp \left[-1,634 \cdot \ln \frac{age_{at}}{50} \right], \quad (1.7)$$

где D – эквивалентная доза на красный костный мозг, Зв.

На основании полученных значений рисков оценивалось число заболеваний и значения параметра LLE в годах по каждой возрастной группе эвакуированных с использованием официальных данных по смертности и продолжительности жизни для Японии. Пересчет в экономический эквивалент величины LLE может производиться на основании достоверных данных по стоимости проведения терапевтических мероприятий, например, данных из работы

[107] для Японии, либо на основании оценок сопутствующих потерь произведенного продукта, например, по величине ВНД на душу населения на один потерянный год жизни или с применением пересчетных коэффициентов из других методик.

Нами было проведено сопоставление четырех оценок ущерба здоровью населения, полученных на основе подходов, представленных в НРБ 99/2009, NUREG 1530 Rev.1, модели СОСО-2 и работе японских специалистов (далее LLE-модель) с применением реальных данных по дозам облучения населения в префектуре Фукусима и данным по ВВП в Японии [29, 25].

В частности, оценка величины ущерба от облучения в соответствии НРБ 99/2009 была получена умножением величины коллективной предотвращенной дозы на значение душевого дохода для Японии, который был взят равным \$38 тыс. Для модели NUREG 1530 Rev.1 расчет проводился аналогично, умножением величины коллективной дозы на используемые в данном нормативе коэффициенты пересчета в денежный эквивалент для получения оптимальной, нижней и верхней оценки ущерба.

Ущерб по модели СОСО-2 был оценен путем пересчета величины коллективной дозы в количество стохастических эффектов облучения раковых и наследственных заболеваний и последующего его перевода в денежный эквивалент с использованием пересчетных коэффициентов из руководства по модели [122] и таблицы 1.6.

Для расчета утраты продолжительности жизни (параметра LLE) за счет облучения жителей и величины сопутствующего ущерба по модели [109, 122] были использованы данные по составу и продолжительности жизни населения из этой же публикации и дозы коллективного облучения жителей из работы [25].

Полученные результаты в пересчете на единичную коллективную дозу представлены в таблице 1.7. Они демонстрируют, что модели НРБ 99/2009, СОСО-2 и LLE дают оценки одного порядка, что позволяет использовать наиболее простой из них подход, приближение из НРБ 99/2009, наравне с остальными методиками, основанными на оценке числа радиационно-обусловленных заболеваний и летальных исходов. Подход NUREG 1530 Rev.1 дает самую высокую оценку ущерба и подходит преимущественно для применения на территории и в условиях экономической системы США либо в качестве верхней оценки ущерба от облучения.

Подходы на основе НРБ 99/2009 и NUREG 1530 Rev.1 могут быть использованы в отсутствии детальных данных о половозрастном составе облучаемого населения, на основании одних только оценок индивидуальных либо коллективных доз. При наличии достоверных данных по заболеваемости и стоимости лечения для наблюдаемых групп жителей, подвергшихся облучению, могут быть применены модели СОСО-2 и LLE, адаптированные под социально-экономические условия территории, где произошла авария.

Таблица 1.7 – Результаты оценки ущерба здоровью за счет облучения для группы жителей префектуры Фукусима в пересчете на 1 чел.-Зв дозы коллективного облучения на различных расчетных моделях

Оценка ущерба от облучения в 1 чел.-Зв	Расчетная модель			
	НРБ 99/2009 [10] (при ВНД \$38 тыс.)	NUREG 1530 Rev.1 [113] (на 2018 г.)	COCO-2 [94]	LLE [109, 122]
Ущерб здоровью, \$тыс.	38	576 (от 339 до 889)	66	16,3
Сокращение продолжительности жизни для группы, лет	1		Не оценивалось	0,43

Все рассмотренные модели могут применяться при оценке ущерба здоровью от облучения и выгод от его предотвращения при проведении защитных и реабилитационных мероприятий. При этом целесообразно изначально получить достоверные оценки величины индивидуальной либо коллективной дозы облучения в наблюдаемой группе людей, а затем применять ту или иную модель оценки, в зависимости от социально-правовых условий той территории, где произошло аварийное загрязнение.

С учетом рассмотренных моделей оценки ущерба экономике и здоровью населения от радиационного загрязнения территорий, а также в предположении, что экономическая выгода от реализации мер вмешательства определяется величиной предотвращаемой коллективной дозы облучения населения, может быть предложена соответствующая структура выгод и издержек для наиболее социально и экономически значимых мер вмешательства, применяемых на поставарийной стадии. Структура представлена в таблице 1.8, где N – число жителей, которых затрагивает мера вмешательства, чел.; $D(T)$ – индивидуальная доза облучения одного жителя за период T , Зв; \mathcal{E} – экономический эквивалент единицы коллективной дозы облучения, ед. валюты/чел.-Зв; p – среднегодовой доход жителя, ед. валюты/год; $\varepsilon_{опр}$ – доля индивидуального дохода жителя, утрачиваемого из-за введения ограничений, б/р; $C(\Delta D)$ – затраты на проведение дезактивации, зависящие от изменения дозы облучения за счет ее проведения ΔD ; $\Delta D(T)$ – предотвращаемая за счет вмешательства индивидуальная доза облучения, Зв; $q_{эвак}$ – средние затраты на эвакуацию одного жителя, ед. валюты/чел.; $q_{отс}$ – средние затраты на отселение одного жителя, ед. валюты/чел.; $q_{прож}$ – затраты на проживание в эвакуации одного жителя в год, ед. валюты/(чел.·год); v – средняя стоимость недвижимости и имущества на одного жителя, ед. валюты/чел.; $T_{наб}$ – период наблюдения после отселения, за который оценивается предотвращенная доза (например, среднее время жизни).

Таблица 1.8 – Структура выгод и издержек при реализации поставочных мер вмешательства

Мера вмешательства	Экономический эффект от реализации меры вмешательства
Невмешательство (в течение периода T)	Ущерб от облучения населения за период T. $Q_{невм} = -D(T) \cdot N \cdot \mathcal{G}$
Введение ограничений на деятельность (на период T)	Упущенная выгода (потеря доходов) населения, вызванная вводимыми ограничениями на экономическую деятельность. Выгоды от снижения доз облучения населения за счет ограничений. $Q_{огр} = -N \cdot \varepsilon_{огр} \cdot p \cdot T + \Delta D(T) \cdot N \cdot \mathcal{G}$
Дезактивация	Затраты на проведение дезактивации. Выгоды от снижения доз облучения населения за счет дезактивации. Ущерб от остаточного облучения после проведения дезактивации. $Q_{дез} = -C(\Delta D) + \Delta D(T) \cdot N \cdot \mathcal{G} - D_R(T_{наб}) \cdot N \cdot \mathcal{G}$
Эвакуация (на период T)	Затраты на проведение эвакуации. Затраты на проживание в эвакуации в течение времени T. Упущенная выгода (потеря доходов) населения за период T. Выгоды от предотвращения облучения населения в период T. Ущерб от остаточного облучения после отмены эвакуации. $Q_{эвак} = -N \cdot (q_{эвак} + q_{прож} \cdot T + p \cdot T) + \Delta D(T) \cdot N \cdot \mathcal{G} - D_R(T_{наб}) \cdot N \cdot \mathcal{G}$
Отселение	Затраты на проведение отселения. Упущенная выгода (потеря доходов) населения на период адаптации ΔT . Суммарные потери недвижимости и имущества. Выгоды от предотвращения облучения населения. $Q_{отс} = -N \cdot (q_{отс} + p \cdot \Delta T + v) + \Delta D(T_{наб}) \cdot N \cdot \mathcal{G}$

1.4 Метод оценки эффективности дезактивации территорий с учетом изменяющейся радиационной обстановки

В сфере управления природопользованием при оценке эффективности природоохранных мероприятий как правило предполагается, что неблагоприятное воздействие загрязненной среды неизменно во времени и может быть устранено или снижено только при внешнем вмешательстве. При аварийном радиационном загрязнении территории воздействие радиационного фактора на людей имеет тенденцию к спаду во времени за счет протекания естественных процессов радиационного распада и миграции радионуклидов в почве. На этом основываются защитные меры, проводимые на ранних сроках развития аварии, когда краткосрочная малозатратная эвакуация позволяет предотвратить большие дозозатраты. При этом радиационная обстановка может стабилизироваться достаточно длительный период, что должно учитываться при проведении природоохранных мероприятий, в частности, дезактивации территории, в первые годы после аварии.

Понимание процессов, связанных с радиационным загрязнением территории, необходимо для проработки сценариев ее поставарийной реабилитации, эффективность которой, в свою очередь, напрямую связана с динамически изменяющимися и наблюдаемыми параметрами радиационной обстановки.

Под радиационным загрязнением территории подразумевается попадание на подстилающую и другие поверхности радиоактивных примесей в форме растворенных в воде веществ, осаждаемой из воздуха пыли, летучих аэрозолей и, в отдельных случаях, газообразных соединений, содержащих техногенные радионуклиды.

Источниками масштабного радиационного загрязнения территорий, требующего принятия затратных мер, могут являться аварийные ситуации на действующих атомных электростанциях, предприятиях ядерно-топливного цикла, промышленных и медицинских предприятиях, использующих мощные источники ионизирующего излучения. Мировая и отечественная история знает примеры радиационных аварий всех трех описанных типов [22], из которых аварии на АЭС можно считать наиболее изученными с точки зрения их протекания и методов ликвидации их последствий. К тому же, справедливые для этого типа аварий подходы во многом пригодны и для описания инцидентов с источниками остальных типов.

Современные подходы к обеспечению безопасности атомных станций включают проработку возможных сценариев протекания аварийных ситуаций. Сценарии аварий на современных АЭС, к которым относятся ядерные инциденты уровня 4 и выше по международной шкале ИНЕС [16], предполагают воздушный (как правило, высотный) выброс накопленных в реакторе радионуклидов в форме газов, летучих органических соединений и аэрозолей.

В качестве первичных источников облучения при аварии на АЭС принято считать:

- радиоактивный выброс или облако радиоактивных соединений;
- радиоактивные выпадения на поверхность почвы, зданий, одежду и кожные покровы;
- радиоактивные сбросы и выпадения из атмосферы в водные объекты.

Под вторичными источниками можно понимать загрязненные продукты питания, воду, мясо и молоко домашних животных, которые могут поступать в пищу людям.

Учет всех возможных факторов потенциального воздействия на человека в случае радиационной аварии является сложной задачей, однако детальное рассмотрение физических процессов формирования загрязнения территории при воздушном выбросе позволяет ее оптимизировать и определить набор наиболее значимых элементов, требующих внимания при принятии решений по реабилитации территории и защите населения.

Радиационное загрязнение территории при аварийном выбросе в атмосферу радиоактивных примесей происходит вследствие гравитационного осаждения на почву и вымывания осадками из облака радиоактивных аэрозолей и некоторых газообразных соединений (в частности, органических соединений йода и газа I_2). За счет ветрового переноса они могут свободно переноситься на сотни километров от места выброса или диспергирования. Выпадение происходит с различной интенсивностью у различных химических соединений, в зависимости от рельефа местности и типа подстилающей поверхности. Может также наблюдаться вторичный ветровой подъем или смыв соединений вместе с осадками, но большинство видов поверхностей и материалов абсорбируют и фиксируют на себе значительную часть активности, часто без возможности их полного удаления в ходе дезактивации.

Большую часть выбрасываемой активности АЭС в аварийной ситуации составляют радиоактивные изотопы инертных неосаждаемых газов, криптона и ксенона, вкладом которых в облучение человека можно пренебречь уже после прохождения облака.

Для АЭС характерно поступление в окружающую среду ряда радиоактивных изотопов йода, с которым связана наибольшая доза облучения для населения и персонала в активный период развития аварии за счет ингаляционного поступления при нахождении без средств защиты на открытой местности во время прохождения облака. Также йод может давать значимый (иногда решающий, как при аварии на ЧАЭС) вклад в первые месяцы за счет внутреннего поступления при потреблении продуктов питания (в первую очередь местной молочной продукции), однако его суммарная активность быстро снижается за счет короткого периода полураспада и через 2-3 месяца его вкладом в суммарную дозу, на фоне остальных путей облучения, можно пренебречь. В целом воздействие йода на ранней стадии аварии нейтрализуется краткосрочным укрытием, йодной профилактикой (приемом препаратов, содержащих стабильный йод) и временным ограничением на потребление отдельных местных продуктов питания.

Среди остальных радионуклидов, важных с точки зрения формирования дозы облучения человека, уже через несколько дней значимую активность сохраняют только изотопы ^{134}Cs , ^{137}Cs (в радиационном равновесии с $^{137\text{m}}\text{Ba}$) и ^{90}Sr (в равновесии с ^{90}Y) за счет их длительного периода полураспада. Все они являются бета-излучателями и могут давать весомый вклад в совокупную дозу через пищевые цепочки. Изотопы цезия являются также активными гамма-излучателями¹ и в среднесрочном и долгосрочном периоде являются основными источниками внешнего гамма-излучения на подвергшихся загрязнению территориях. Отсюда именно уровни

¹ Во многих справочниках изотопу ^{137}Cs приписывают гамма-излучение $^{137\text{m}}\text{Ba}$, с которым он всегда находится в равновесии.

загрязнения изотопами цезия, в особенности ^{137}Cs , принято считать индикатором и критерием степени радиоактивного загрязнения территорий во многих случаях радиационных аварий, а также по ним оценивают и прогнозируют дозы внешнего облучения, проживающего на этих территориях населения.

Отдельно стоит упомянуть ряд альфа-активных радионуклидов, которые, в определенных условиях могут присутствовать как при серьезном повреждении реакторов АЭС, так и при инцидентах на предприятиях, занятых в переработке ядерного топлива. Критерии для принятия мер и ограничений при инцидентах с распространением радиоактивных изотопов актиноидов, к которым относятся составляющие ядерного топлива и продукты их активации (в основном здесь имеются в виду изотопы U, Pu, Am, Np), а также других альфа-активных элементов, регламентируются отдельным нормативным документом. В связи с крайне низкими уровнями гамма-излучения от актиноидов их не учитывают в качестве факторов внешнего облучения, однако они могут быть источником внутреннего облучения при вдыхании аэрозолей и потреблении загрязненных продуктов питания. С точки зрения анализа их долгосрочного воздействия на человека и возможности применения связанных с этим мер вмешательства, можно утверждать, что если их концентрация в местных продуктах питания не превышает значимых уровней, приведенных в [10, табл. 6.5], то их перестают рассматривать как значимый фактор радиационного риска.

Принято разделять основные пути облучения населения на пострадавших территориях на ранней и последующих фазах протекания аварии. Если на ранней стадии в обязательном порядке необходимо учитывать внешнее облучение от облака, выпадений на почву, внешнее облучение за счет загрязнения кожных покровов и вдыхания радиоактивных соединений, то на промежуточной и поздней стадии стоит принимать во внимание внешнее гамма-облучение от загрязненной почвы, внутреннее облучение за счет потребления загрязненных продуктов питания, воды и вдыхания активности в результате пылеобразования (например, при вторичном ветровом подъеме или в результате проведении активных земляных и прочих работ).

Таким образом, именно три последних пути формирования дозы у человека должны учитываться при оценке ожидаемых доз облучения на поздних стадиях аварии. Из них вдыхание активности, образованной при вторичном пылеобразовании, является наименее значимым для стандартных условий и наименее исследованным фактором формирования дозы у неэвакуированных жителей, но вызывает необходимость в дополнительном контроле при проведении отдельных видов работ, в том числе по дезактивации территории. Контроль содержания радионуклидов в продуктах питания и воде, а также выборочное ограничение их потребления может полностью нейтрализовать данный путь облучения.

Относительно необходимости учета всего спектра радионуклидов аварийного выброса можно отметить, что на поздних стадиях аварии, когда радиационная обстановка стабилизируется, содержание радиоактивных изотопов цезия в почве и формируемая ими доза внешнего гамма-излучения, как правило, остаются основными ориентирами для прогнозирования доз для населения на пострадавших территориях. Этим заключением далее мы будем пользоваться в данной работе при проведении расчетов, справедливо опуская вклад остальных радиоизотопов.

Прогнозирование дозовых нагрузок на население является необходимым этапом при выборе мер по его защите в среднесрочном и долгосрочном периоде. Для получения корректных оценок (как в ретроспективе, так и при прогнозировании) доз облучения населения, проживающего на загрязненной территории, необходимо учитывать динамику процессов изменения уровня радиационного фона и концентрации радионуклидов в почве. Так, после выпадения радионуклиды достаточно активно проникают с водой в грунт уже после первых осадков либо с таянием снега и распределяются в почве по глубине со смещением максимума концентрации вглубь от поверхности [34]. Таким образом, со временем вся легкоудаляемая активность мигрирует в грунт на открытой почве, а в местах застройки может концентрироваться в дренажных коммуникациях и других местах естественного накопления осадков. Спустя уже недели после выпадений гамма-излучающие радионуклиды в поверхностных слоях почвы и зонах скопления органического мусора становятся основными источниками внешнего облучения людей в местах их постоянного пребывания. Показателем уровня внешнего гамма-излучения служит МЭД, величину которой часто подразумевают под понятием «радиационного фона». В общем случае МЭД после выпадений непрерывно снижается за счет вышеописанных естественных процессов радиационного распада радионуклидов и их заглубления в почву. Вероятность бета-облучения кожных покровов за счет контакта с загрязненными предметами также постепенно снижается, но может возрасти при проведении земляных работ, самостоятельной дезактивации придомовых территорий и строений. Внешнее облучения от радионуклидов в почве и на поверхностях элементов застройки может быть снижено за счет процедур дезактивации и, со временем, за счет протекания естественных процессов радиоактивного распада, смыва и миграции (заглубления) радионуклидов в почву.

В конечном итоге, радиационное воздействие по всем путям на человека может быть в различной степени снижено в результате проведения специфических мероприятий по реабилитации территории, а также корректирования жизненного уклада населения, что может быть реализовано и без значительных финансовых затрат. Возможно реализовать набор простых мер по реабилитации либо других действий в целях снижения дозовой нагрузки,

которые могут выполняться жителями самостоятельно, без дополнительного приобретения специальных навыков. Такие меры требуют организации информирования и контроля со стороны государства и в условиях малых уровней загрязнения имеют большой положительный социальный эффект.

Таким образом, существует необходимость в уточнении модели оценки эффективности и рентабельности мероприятий по дезактивации радиационных территорий за счет учета ряда физических процессов, влияющих на изменение радиационной обстановки, так как эффективность и рентабельность дезактивации напрямую зависят от корректной оценки степени улучшения радиационной обстановки (показателя МЭД) и величины предотвращенной дозы облучения населения в долгосрочной перспективе. Некорректный учет особенностей естественного снижения уровней радиационной обстановки влечет к завышению оценки эффективности мероприятий вмешательства и необоснованным затратам на их проведение.

В работе [30] для описания МЭД на радиационно загрязненных территориях в динамике предлагается формула (1.8), пригодная для описания большинства аварийных сценариев на АЭС при выпадении на почву ограниченного числа основных дозообразующих гамма-излучающих радионуклидов:

$$\dot{D}(t) = \dot{D}(0) \cdot F_r(t) \cdot F_d(t), \quad (1.8)$$

где $\dot{D}(0)$ – усредненное по территории значение МЭД гамма-излучения на начальный момент времени, Зв/ч.; $F_r(t)$ – безразмерный фактор, характеризующий радиационный распад радиоизотопов и описываемый выражением (1.9):

$$F_r = \sum_i [\psi_i(0) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)], \quad (1.9)$$

где $\psi_i(0)$ – относительный вклад в суммарную МЭД излучения от i -го радиоизотопа, б/р; λ_i – постоянная радиационного распада для i -го радиоизотопа, лет⁻¹; $F_d(t)$ – безразмерный фактор, учитывающий динамику заглупления радионуклидов в ней и влияющий таким образом на ослабление МЭД со временем;

В связи с тем, что, внешнее облучение в долгосрочной перспективе будет определяться присутствием в почве радиоактивных изотопов цезия ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs, то значения параметра ψ_i в формуле (1.8) могут быть рассчитаны как относительные вклады в МЭД излучения от этих

радиоизотопов, исходя из их содержания в почве, которое может быть установлено путем натуральных или лабораторных измерений [14].

$F_d(t)$ зависит от химических свойств радиоактивных соединений, а также от состояния почвы и ее поверхности. Для ее описания за первые несколько лет после выпадения радионуклидов на почву может применяться простая экспоненциальная зависимость от времени [32], но для долгосрочного анализа такой подход будет неточным, так как на практике активное заглобление примеси идет только в первые несколько лет, после чего достаточно резко замедляется. В документах [106, 93] для описания $F_d(t)$ предлагается использовать применяемую в области анализа аварийного загрязнения территорий формулу (1.10), где более достоверно описывается заглобление соединений цезия:

$$F_d(t) = a_1 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_1} \cdot t\right) + a_2 \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{\tau_2} \cdot t\right), \quad (1.10)$$

где $\tau_1=1,5$ года, $\tau_2 = 50$ лет, а коэффициенты a_1 и a_2 подбираются индивидуально для каждого сценария аварийного загрязнения на основании натуральных измерений.

Под реабилитацией территории при радиационном загрязнении следует понимать комплекс мероприятий, направленных на возврат территорий в экономический оборот. Часть реабилитационных мер при радиационном инциденте должна быть направлена на снижение дозовых нагрузок на население до приемлемых уровней, при которых на территориях, подвергшихся радиационному загрязнению, допускается проживание и экономическая деятельность.

Дезактивация, как комплекс различных работ, направлена на снижение радиационного фона, что достигается преимущественно удалением и перемещением активности или ее искусственным заглоблением. Более полный перечень мероприятий по дезактивации и реабилитации территорий содержится в работе [97]. Дезактивация может влиять на динамику протекания естественных процессов миграции и заглобления радионуклидов в почве, в значительной мере определяющих постепенное снижение радиационного фона. Этот аспект требуется учитывать при описании моделей изменения радиационной обстановки на загрязненных территориях при внешнем вмешательстве.

В работе [30] автором было проведено исследование влияния дезактивации на динамику МЭД на радиационно загрязненных территориях на примере последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» в муниципалитете Тамура. Для анализа обширной территории части муниципалитета использовалось приближение, предполагающее, что работы на ней

проводились достаточно длительное время (более года) в период с момента T_1 до T_2 и выполнялись на множестве относительно малых ее участков, время дезактивации каждого из которых было достаточно мало. Эффективность дезактивации f' (соотношение величины МЭД непосредственно перед процедурой и после нее) на каждом из таких участков предполагалась одинаковой, при этом она полностью определялась качеством исполнения самих процедур, так как за небольшой период времени естественные процессы распада и заглужения радионуклидов в почве практически не влияют на снижение МЭД. В результате была предложена аналитическая зависимость для расчета среднего значения МЭД для большой неоднородной территории, на которой проводится длительная дезактивация, с одновременным учетом распада и естественного заглужения радионуклидов (1.11):

$$\dot{D}_R(t) = \begin{cases} \dot{D}(t), & 0 \leq t \leq T_1 \\ \dot{D}(t) \cdot \left(1 - \frac{t - T_1}{T_2 - T_1}\right) + \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^t \frac{\dot{D}(0)}{f'} \cdot F_r(t) \cdot F_d(t + t_R) \cdot \frac{F_d(x)}{F_d(t_R)} dx, & T_1 < t < T_2 \\ \frac{1}{T_2 - T_1} \cdot \int_{T_1}^{T_2} \frac{\dot{D}(0)}{f'} \cdot F_r(t) \cdot F_d(t + t_R) \cdot \frac{F_d(x)}{F_d(t_R)} dx, & T_2 < t \end{cases} \quad (1.11)$$

где $\dot{D}_R(t)$ – зависимость от времени средней по территории величины МЭД при проведении дезактивации, Зв/ч; T_1 и T_2 – моменты начала и завершения дезактивации на всей территории, ч; f' – эффективность по МЭД элементарных операций по дезактивации, б/р; F_r – фактор радиационного распада, равный $\sum_i [\psi_i(t_0) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)]$ (формула (1.8)), б/р; F_d – фактор заглужения радионуклидов в грунте (формула (1.10)), б/р; t_R – параметр, характеризующий изменение интенсивности заглужения из-за проведения дезактивации (устанавливается экспериментально), лет.

Функция (1.11) позволяет оценить среднее по территории снижение МЭД со временем за счет учета проводимой дезактивации и всех природных процессов. Так, на основании результатов дезактивации территорий в муниципалитете Тамура в 2012-2017 гг. (пр. Фукусима, Япония) на рисунке 1.1 представлены сравнительные графики кривых спада МЭД с учетом дезактивации (формула (1.11)) и без нее (формула (1.8)). Одним из выводов работы [30] стало заключение, что после проведения работ по дезактивации на данной территории заглужение

радионуклидов перестало влиять на дальнейшее естественное снижение МЭД, которое в дальнейшем определялось только процессами радиоактивного распада.

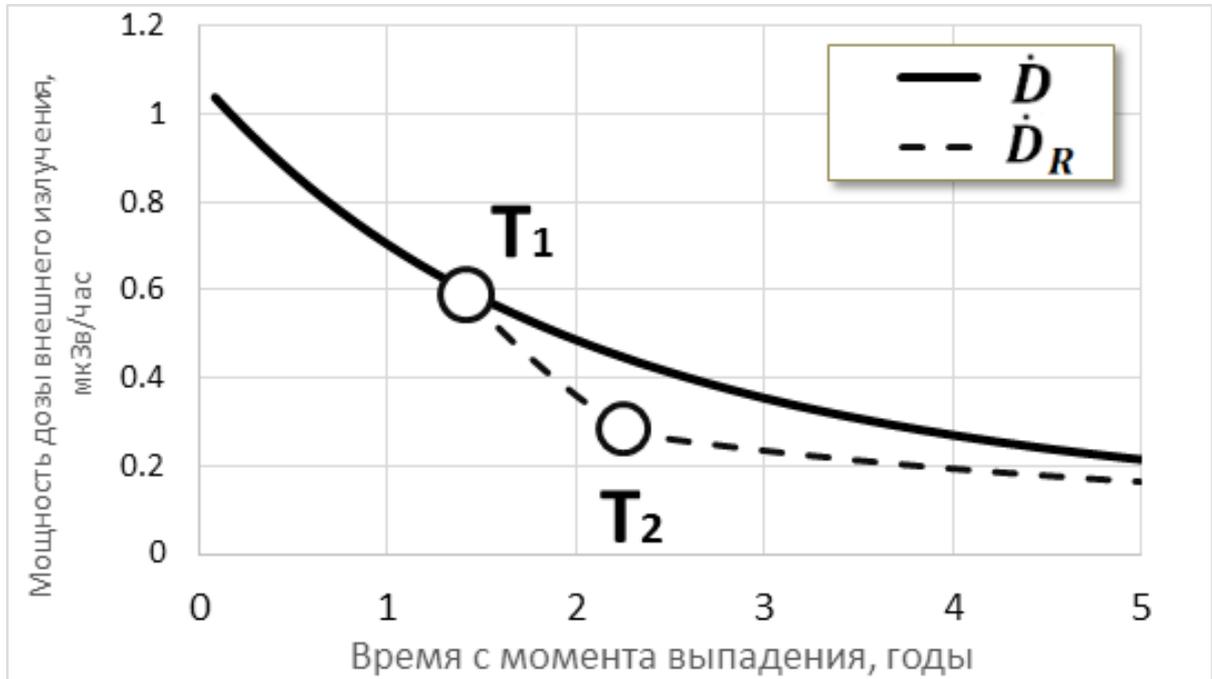


Рисунок 1.1 – Сравнительные графики динамики мощности дозы без дезактивации \dot{D} и с дезактивацией \dot{D}_R

Источник: по данным работы [30]

Под эффективностью дезактивации в общем случае следует понимать относительное изменение одной из характеристик поля излучения по сравнению с ее значением до дезактивации, обусловленное только проведением соответствующих мероприятий, без учета влияния упомянутых ранее естественных процессов. Эффективность может оцениваться, в частности, по изменению значения МЭД, ожидаемой дозы облучения населения, удельной концентрации радионуклидов в почве и другим параметрам, в зависимости от изначальных целей проведения дезактивации. Если дезактивация проводится на большой территории, то под эффективностью стоит понимать ее среднее значение по всем ее участкам с учетом их площади.

На практике эффективность проведенных работ на обширной территории иногда некорректно оценивают на основании единовременных замеров средних значений МЭД по всей территории перед началом работ и после их завершения. Если между началом и окончанием процедуры дезактивации проходит значительное время, сравнимое с периодом радиационного полураспада радионуклидов, или за это время могла пройти его миграция в почве, то кратное снижение МЭД к ее окончанию будет учитывать вклад естественных процессов распада и заглобления радионуклидов и не будет отражать истинную эффективность проведенных работ.

Формулы (1.8) и (1.11) могут быть применены для достоверной оценки эффективности дезактивации территории за вычетом влияния естественных процессов, что, в свою очередь, позволит численно установить дозу, предотвращаемую непосредственно за счет реализации мер вмешательства. Средняя эффективность проведенной дезактивации по МЭД для всей территории может быть оценена по формуле (1.12) (обозначения в (1.8) и (1.11)):

$$f = \frac{\dot{D}(T_2)}{\dot{D}_R(T_2)}. \quad (1.12)$$

Экономическая выгода Q_{dez}^+ от дезактивации территории может быть оценена по формуле (1.13):

$$Q_{\text{dez}}^+ = \Delta D \cdot \mathcal{G} = \mathcal{G} \cdot N \cdot K \cdot \int_{t_1}^{t_2} (\dot{D}(t) - \dot{D}_R(t)) dt, \quad (1.13)$$

где ΔD – предотвращаемая коллективная доза облучения населения за период $[t_1; t_2]$, чел.-Зв; \mathcal{G} – стоимостный эквивалент единицы коллективной дозы облучения, ед. валюты/чел.-Зв; N – число жителей на территории, чел.; K – фактор экранирования, учитывающий нахождение людей в зданиях, б/р; $\dot{D}(t)$ и $\dot{D}_R(t)$ – МЭД гамма-излучения в естественных условиях и при проведении дезактивации территории (рассчитываемые по формулам (1.8) и (1.11)), Зв/ч.

На основе значения Q_{dez}^+ , при помощи методик, рассмотренных в подразделе 1.3, может быть установлена сумма предотвращенного ущерба здоровью населения за счет снижения его облучения при дезактивации территории. Таким образом, из выражений (1.8)-(1.13) рассчитывается истинный вклад проводимых мероприятий в снижение облучения населения, исключая влияние естественных природных процессов, что впоследствии позволяет достоверно оценивать величину экономической выгоды от вмешательства.

Для оценки рентабельности дезактивации P , проводимой без отселения жителей, предлагается формула (1.14):

$$P = \frac{\sum_{t=1}^T (Q_{\text{dez},t}^+ - Z_t) \cdot (1+r)^{1-t}}{\sum_{t=1}^T Z_t \cdot (1+r)^{1-t}}, \quad (1.14)$$

где t – год после начала дезактивации, лет; T – последний год периода прогнозирования эффектов от дезактивации (устанавливается при планировании вмешательства и, как правило, не превышает периода средней продолжительности жизни), лет; $Q_{dez,t}^+$ – выгода от дезактивации за t -й год от начала вмешательства, ед. валюты/год; Z_t – затраты на дезактивацию в t -й год (как правило, нулевые при $t \gg 1$), ед. валюты/год; r – коэффициент дисконтирования, равный 0,5 ставки ведущих банков, б/р.

1.5 Методы моделирования экономических последствий радиационных аварий

Для оценки имущественных потерь населения, государства и упущенной выгоды предприятий (там, где она явно обоснована) в условиях применения мер обеспечения радиационной безопасности требуется агрегировать большие объемы информации в удобной для обработки форме и организовывать ее хранение. В этой связи возникает необходимость в формировании специализированной информационной системы для решения задач хранения и анализа наборов данных, свойственных для ситуации аварийного радиационного загрязнения экономически активных населенных территорий.

Информационное обеспечение процедур анализа радиационной аварийной ситуации для конкретной местности или административного субъекта подразумевает формирование электронной базы данных (информационной системы) по их территории и выбор методологии проведения расчетов радиационных и социально-экономических последствий ее загрязнения, что позволит оперативно оценивать также и затраты на реализацию и масштабы мероприятий по защите населения и реабилитации территорий.

Несмотря на значительный прогресс в последние десятилетия в области аварийного реагирования и прогнозирования последствий радиационных аварий, развитие информационных технологий и все большую доступность данных, задача создания информационной системы, характеризующей территории, прилегающие к наиболее значимым радиационно опасным объектам, с возможностью оперативного внесения и обработки данных по радиационной обстановке, проведению оценок радиологических рисков и экономического ущерба, пока что не решена даже в рамках отдельных стран. Однако, как показывают зарубежные исследования [83, 95], в мире именно сейчас активизировалась деятельность в данном направлении и вырабатываются подходы для реализации подобных систем для отдельных, представляющих ядерную или радиационную опасность, объектов. Опыт реагирования на небольшие и более серьезные инциденты, регулярно происходящие в мире,

показывает, что наличие такого инструмента необходимо для выработки решений, в той же мере, как и наличие, получивших сегодня широкое распространение, систем управления предприятиями, позволяющих контролировать и управлять рабочими процессами. В частности, у управляющих организаций и ответственных за аварийное реагирование органов власти должен иметься инструмент для анализа структуры ожидаемых затрат, связанных с принимаемыми решениями по мерам защиты населения для территориальных субъектов. Разработкой подобной системы должны совместно заниматься специалисты по радиационной безопасности, экономисты и, отчасти, социологи.

Современные технологии, безусловно, позволяют создавать подобные системы и использовать их для расчетов. Так, в области ядерной безопасности давно используются прогностические модели (Probabilistic safety assessments – PSAs), предназначенные для моделирования развития аварийных ситуаций на ядерных объектах. Категория прогностических моделей третьего уровня (PSA-3) как раз предназначена для оценки последствий радиоактивного выброса за пределы площадки объекта и они, как правило, содержат в себе модели оценки эффективности контрмер, а также оценки затрат. Так, в 2000-е годы существовало как минимум четыре прогностических программных кода третьего уровня: ARANO (Финляндия) [90], MACCS (США) [87], английская модель COCO-1 (дополненная моделями COSYMA и CONDOR), испанская МЕСА (дополненная моделью COSYMA).

Среди наиболее современных моделей стоит отметить усовершенствованную версию MACCS2 [132, 131], которая поддерживает простой анализ выгод и издержек при принятии контрмер, однако, ее более сложная экономическая модель находится в стадии разработки. Также Сандийские национальные лаборатории (SNL) развивают специальный программный модуль SECPOP [110], предназначенный для оценки людских и экономических ресурсов вблизи любой географической точки на территории США. В Великобритании с 2008 года введена обновленная система COCO-2 [94], которая, помимо прочего, учитывает прямой и непрямой ущерб в форме потери ВВП, а также компенсации за потерю здоровья для пострадавших. В настоящее время близка к завершению разработка английской модели PACE [88], которая будет учитывать множество новых эффектов: число людей, для которых необходимо укрытие или эвакуация; число явных и скрытых радиационных эффектов; объем ограничений по потреблению продуктов питания и др. Ожидается, что итоговый код PACE будет включать в себя модели COCO-2.

Несмотря на кажущееся разнообразие программных кодов в сфере прогнозирования последствий радиационных аварий, примеры расчетов по реальным инцидентам или даже экспериментальным исследованиям с их применением встречаются нечасто. Так, в 2017 году в работе [83] описан ход эксперимента по предсказанию прямого экономического ущерба при

гипотетической радиационной аварии на реакторе, расположенном в густонаселенной местности в Великобритании. Для расчета также был взят несуществующий реактор распространенного типа, а для моделирования и оценки радиационных и экономических последствий использовалась модель СОСО-2. Основной задачей работы была оценка зон, численности населения, дозовых нагрузок и необходимых затрат на реализацию мер вмешательства. Среди характерных особенностей данного эксперимента можно отметить, что все данные по статистике для территорий были изначально заложены в программу на пространственной сетке с разрешением 1 км, что является не самой оптимальной детализацией для анализа реальной аварии. С таким же разрешением производилось моделирование радиационной обстановки. Эксперимент отличался детальной проработкой оценок по рискам заболеваемости у населения, а также мер по исключению из потребления различных видов сельскохозяйственной продукции, что говорит о богатом константном обеспечении модели, в том числе, данными по экономике территории, что пока недоступно для исследователей в Российской Федерации для своей территории. По его результатам были представлены данные о прогнозируемой заболеваемости и смертности в зоне радиационного загрязнения для различных сценариев проведения эвакуации, а также дана финансовая оценка ущерба для здоровья населения в результате долгосрочного облучения.

В целом, рассмотренный в [83] эксперимент продемонстрировал, что детальный анализ последствий радиационных аварий сегодня возможно производить в короткие сроки, при условии наличия методик и достаточно детальных и актуальных статистических данных по наблюдаемой территории.

В США также в 2017 году опубликована работа [95], посвященная оценке экономического ущерба в результате гипотетического пожара в хранилище отработанного ядерного топлива. Оценка проводилась на основе математической модели МАССС2 и системы SECPOP для 50-мильной зоны вокруг аварийного объекта и включала в себя оценку стоимости отселения, проживания в эвакуации, дезактивации территории, потери имущества и выгод от его использования. Стоит отметить следующие результаты исследования:

- совокупный возможный ущерб был оценен в \$2 200 млрд;
- стоимость проведения отселения в 50-мильной зоне оценена в \$76 000/чел.;
- стоимость эвакуации на 1 год – \$12 000/чел.;
- стоимость дезактивации – \$7 110/чел. для зоны возвращения;
- стоимость потери имущества – \$158 000-\$200 000/чел.;
- денежный эквивалент предотвращенного за счет своевременной эвакуации ущерба здоровью населения в 50-мильной зоне, который могло вызвать аварийное облучение в

530 тыс. чел.-Зв в последующем 50-летнем периоде, было оценено в \$270 млрд, в соответствии с обновленной методикой [113].

Собранные в результате эксперимента численные результаты крайне ценны, так как изначально экономически обоснованы и могут использоваться для оперативной оценки и прогнозирования затрат и ущербов в ходе реагирования на реальные аварии.

Таким образом, современные мировые тенденции в исследовании темы аварийной защиты населения подтверждают, что получение достоверных оценок затрат, ущербов и эффективности мер вмешательства на радиационно загрязненных территориях, возможно только с применением информационных систем, содержащих актуальную информацию с привязкой по территории с высоким уровнем ее пространственной детализации.

Основные выводы по главе 1:

- структурированы основные меры поставарийного вмешательства при радиационных авариях по стадии применения, оценочной стоимости и дозовым критериям принятия решения по их реализации;
- установлено, что реализация мер по обеспечению безопасности населения при ликвидации крупных радиационных аварий в период 1950-2011 гг. сопровождалась чрезмерными затратами на проведение защитных и реабилитационных мероприятий в сравнении с сопутствующими выгодами;
- обосновано, что принятие экономически неэффективных решений по реализации стратегий поставарийного вмешательства может являться основным источником экономического ущерба на территориях, где ожидаемые дозовые нагрузки на население составляют до 100 мЗв/год;
- обоснована необходимость разработки теоретических подходов, базирующихся на анализе баланса сопутствующих выгод и издержек, к выработке эффективных стратегий поставарийного вмешательства при радиационных авариях;
- уточнена структура выгод и издержек и основных мер поставарийного вмешательства при радиационных авариях;
- уточнен метод оценки эффективности дезактивации загрязненных территорий за счет учета изменения радиационной обстановки в условиях внешнего воздействия и под влиянием естественных процессов радиационного распада и заглупления радиоизотопов в почве;
- обоснована необходимость развития специализированных информационных систем для анализа радиационных и экономических последствий радиационных аварий и оказания поддержки при выработке решений по поставарийному реагированию.

Глава 2 Методы рационализации и оптимизации стратегий реабилитации радиационно загрязненных территорий

2.1 Критерии эффективности стратегий вмешательства на радиационно загрязненных территориях

Под рационализацией и оптимизацией стратегий вмешательства на радиационно загрязненных территориях понимается подчинение его процессов принципам максимизации положительных радиоэкологических и социальных эффектов, исходя из экономической целесообразности и существующих требований к обеспечению радиационной безопасности населения. Под критериями эффективности этих стратегий предполагаются условия, при выполнении которых реализация выбранных мер вмешательства позволит достичь поставленных целей и будет удовлетворять принципам, действующим в сфере обеспечения радиационной безопасности. В задачах выработки решений по вмешательству в поставарийный период целесообразно, чтобы управляющим параметром критерия служила величина, характеризующая уровень радиационной обстановки или степень радиационного риска на рассматриваемой территории.

Выделяемый в целях управления мерами вмешательства в области радиационной безопасности принцип обоснования, в трактовке рекомендаций МКРЗ [17, с. 16] звучит как «любое решение, которое приводит к возникновению ситуации облучения, должно приносить больше пользы, чем ущерба». В этом же документе встречается трактовка, где вместо сочетания «приводит к возникновению ситуации облучения» используется «изменяющее ситуацию облучения», что позволяет применять данный принцип как в случае введения нового источника излучения, так и при снижении существующих уровней облучения. Под введением нового источника можно понимать и проведение дезактивации, в ходе которой ликвидаторы неизбежно получают некоторую дозу облучения, так и отмену эвакуации с возвращением населения на территории, где уровни облучения приемлемы, но остаются выше естественного фона. Под «пользой» здесь подразумевается индивидуальная или общественная выгода, которая, как и ущерб, в любом своем проявлении может быть выражена в финансовом эквиваленте. Так принцип обоснования может быть представлен для отдельного случая вмешательства через выражение (2.1):

$$Q^+(D) - Q^-(D) \geq 0, \quad (2.1)$$

где Q^+ – польза от вмешательства, ед. валюты; Q^- – ущерб, сопутствующий вмешательству, ед. валюты; D – индивидуальная доза облучения за контрольный период времени, в который последствия вмешательства могут влиять на дозу облучения, Зв.

Принцип обоснования подразумевает, что выгоды и затраты в их экономическом эквиваленте могут быть получены численно, а дозы облучения можно получить из измерений или расчетным путем. Как было отмечено в разделе 0, современные аналитические модели вполне позволяют прогнозировать дозовые нагрузки на население в условиях развития радиационной аварии и при долгосрочном проживании людей на радиационно загрязненных территориях, а также учитывать при этом их особенности поведения, потребления продуктов питания и даже проведение на территории масштабных работ по снижению радиационного фона. Существуют также методики для детального расчета трудозатрат и стоимости проведения дезактивации и эвакуации, которые позволяют заблаговременно просчитывать сопутствующие затраты. Эти факторы, а также необходимость заранее оценивать радиологическую, а далее экономическую целесообразность и эффективность проведения особо затратных мероприятий по снижению дозовых нагрузок для населения привели к попыткам выработать методы рационализации стратегий применения подобных мер.

В работе [50] предлагается подход к обоснованию различных мер вмешательства в ходе защиты населения от облучения при радиационном загрязнении местности. Данный подход опирается на вышеупомянутый принцип обоснования и позволяет получить аналитический вид для условий по дозам облучения, при которых обсуждаемые меры вмешательства становятся целесообразно проводить с учетом сопутствующих им выгод и ущербов. В нем пользу от любого типа вмешательства определяют в общем случае как функцию (2.2):

$$Q^+(D) = \Delta D \cdot N \cdot \mathcal{G} = \Delta D^k \cdot \mathcal{G}, \quad (2.2)$$

где $\Delta D = D - D_R$ – предотвращенная за счет данного вмешательства доза облучения для отдельного среднего человека за некоторый контрольный период, Зв; N – численность облученных лиц (в приближении, что средняя индивидуальная предотвращенная доза в наблюдаемой группе людей будет равна ΔD), чел.; \mathcal{G} – финансовый эквивалент стоимости ущерба, возникающего от единицы дозы коллективного облучения (раздел 1.3), ед. валюты/чел.-Зв; ΔD^k – коллективная доза по всей наблюдаемой группе лиц, чел.-Зв.

Если параметр \mathcal{G} принимается различным для разных групп населения, то это может быть отражено в (2.2) как (2.3):

$$Q^+(\mathbf{D}) = \sum_i \Delta D_i^k \cdot \mathcal{G}_i, \quad (2.3)$$

где i – индекс группы населения.

Так как индивидуальная доза внешнего облучения за период времени рассчитывается через величину МЭД по формуле (1.1), в работе [50] предлагается несколько представлений величины МЭД $\dot{D}_R(t)$ для разных видов вмешательства. Для сценария с дезактивацией приводится упрощенное по сравнению с (1.1)-(1.8) и (1.11) представление (2.4)-(2.5) для $\dot{D}(t)$ и $\dot{D}_R(t)$:

$$\dot{D}(t) = \dot{D}(T_1) \cdot \exp(-\mu \cdot t), \quad (2.4)$$

$$\dot{D}_R(t) = \begin{cases} \dot{D}(T_1) \cdot \exp(-\mu \cdot t) \cdot \left(1 - \frac{f-1}{f} \cdot \frac{t}{T_1}\right), & T_2 \geq t \geq T_1 \\ \dot{D}(T_1) \cdot \exp(-\mu \cdot t) \cdot \left(1 - \frac{f-1}{f}\right), & t \geq T_1 \end{cases}, \quad (2.5)$$

где T_1 и T_2 – моменты начала и завершения дезактивации (в часах), а спад МЭД (в Зв/ч) за счет естественных процессов описывается экспонентой с фактором ослабления μ , ч⁻¹ (в работе [32] такой подход допускался для относительно небольшого периода наблюдений – до 5 лет).

Издержки от дезактивации территории формируются из затрат на дезактивацию Q_d^- и ущерба Q_p^- от облучения задействованного в ней персонала.

Для оценки затрат на дезактивацию в работах [50, 89] предлагается использовать приближение (2.6):

$$Q_d^- = c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f, \quad (2.6)$$

где f – эффективность дезактивации (например, по снижению МЭД), б/р; c_{f_0} – затраты на дезактивацию с эффективностью f_0 для исследуемой территории, ед. валюты.

Такой подход является обоснованным при оценке затрат на небольших участках, где перечень возможных работ приблизительно определен и ограничен. В его основе лежит

предположение, что очистка поверхности или участка земли может быть выполнена с помощью повторения одной операции несколько раз, при этом, эффективность очистки за счет каждой последующей итерации будет снижаться. Распространение такого подхода на большие площади, где одновременно реализуется целый комплекс различных методов дезактивации, может требовать дополнительного обоснования, но и в этом случае может быть подобрано значение c_{f_0} которое будет достоверно отражать зависимость (2.6) для характерных типов территории. Эффективность f может определяться экспериментально как относительное изменение МЭД в результате проведения за малый промежуток времени стандартной процедуры дезактивации элементарного участка территории. Для обширных неоднородных территорий, дезактивация которых занимает длительное время и предполагает множество разнотипных процедур, мы рекомендуем при оценке f использовать выражения (1.12) в сочетании с (1.8) и (1.11).

Параметр c_{f_0} определяется трудозатратами, объемами и стоимостью расходуемых материалов, финансовый эквивалент которых может различаться для разных регионов и стран, в зависимости от уровня их промышленного развития, богатства и готовности к реабилитации территорий после крупных ЧС природного и техногенного характера. Подходы к оценке данного параметра для каждого отдельного случая требуют проведения отдельных, более детальных исследований.

Данные о стоимости, трудозатратах и эффективности отдельных видов дезактивации целесообразно подбирать на основе экспериментальных и справочных данных, характерных для своего региона. Основные подходы к дезактивации, и образованию ее стоимости могут быть заимствованы из методик [97, 133] и др. После аварии в Японии также было выпущено руководство [126], которое меняет представление о подходах к дезактивации в заселенных территориях в технологически развитых странах и может привести к переосмыслению формирования ее стоимости.

На основании приближения (2.6) в работе [50] предлагаются условия эффективности, базирующейся на критерии (2.1), по величине средней ожидаемой индивидуальной предотвращаемой к некоторому моменту T дозы ΔD (2.7) и по величине мощности дозы гамма-излучения $\dot{D}(T_1)$ на момент принятия решения T_1 (2.8) для сценария проведения дезактивации с кратностью f загрязненных территорий без отселения жителей:

$$\Delta D \geq \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Q_p^-}{g \cdot N}. \quad (2.7)$$

$$\dot{D}(T_1) \geq \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Q_p^-}{g \cdot N \cdot k_0(T_1, T)} \cdot \frac{f}{f-1}; \quad (2.8)$$

$$k_0(T_1, T) = \frac{1 - \exp(-\mu T_1) - \mu T_1 \cdot \exp(-\mu T)}{\mu^2 T_1},$$

где c_{f_0} – затраты на дезактивацию с эффективностью f_0 для данной территории, ед. валюты; Q_p^- – ущерб от облучения задействованного персонала, ед. валюты; T_1 и T_2 – моменты начала (принятия решения) и завершения дезактивации на территории, ч; N – численность жителей в зоне проведения дезактивации, чел.; T – конечный момент времени для периода наблюдения, для которого действительны предложенные условия, ч.

Вид выражений (2.7)-(2.8) может измениться при применении более сложных моделей спада МЭД во времени, в которых более детально учтены естественные процессы снижения интенсивности излучения после радиоактивных выпадений на почву, например, модели (1.11).

В случае проведения эвакуации на время дезактивации дополнительно необходимо учесть затраты на вывоз и проживание населения, а дозы облучения населения в месте проживания заменяются на естественные фоновые дозы. Условия (2.7)-(2.8) при этом принимают вид (2.9)-(2.10):

$$\Delta D \geq \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Q^-}{g \cdot N}; \quad (2.9)$$

$$\dot{D}(T_1) \geq \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Q^-}{g \cdot N \cdot \left(\frac{1 - \exp(-\mu T_1)}{\mu} + \frac{f-1}{f} \cdot \frac{\exp(-\mu T_1) - \exp(-\mu T)}{\mu} \right)}, \quad (2.10)$$

где T_1 – момент начала эвакуации и дезактивации, ч; Q^- – совокупные затраты на вывоз и размещение эвакуированных, а также потери от облучения персонала и приостановки экономической деятельности на время эвакуации жителей, ед. валюты.

Решение о постоянном отселении с загрязненной территории без дезактивации будет оправдано при условиях (2.11)-(2.12):

$$\Delta D \geq \frac{Q^-}{g \cdot N}, \quad (2.11)$$

$$\dot{D}(T_0) \geq \frac{Q^- + D_{bg}(T) \cdot \mathcal{G} \cdot N}{\mathcal{G} \cdot N} \cdot \frac{\mu}{1 - \exp(-\mu T)}, \quad (2.12)$$

где T_0 – момент начала отселения, ч; $D_{bg}(T)$ – средняя индивидуальная доза жителя в отселении к моменту T в условиях естественного фона (полагается, что фоновое облучение не ведет к ущербу и финансовая компенсация за него не может быть обоснована), Зв.

Представленный выше подход позволяет заблаговременно установить, будет ли предпринятая мера по дезактивации, эвакуации или отселению оправдана с точки зрения принципа обоснования, при условии, что будут достаточно точно просчитаны дозы облучения населения, участников работ по реабилитации территории и все, сопутствующие эвакуации и отселению, затраты и ущербы в денежном эквиваленте. Данный метод также, при некоторой доработке, позволяет оценить и экономически оптимальную кратность применяемых методов дезактивации f .

Схожий подход к реализации принципа обоснования был применен в работе [73], где основное уравнение баланса выгод и ущербов при дезактивации представлено в виде (2.13):

$$\mathcal{G} \cdot \varphi \cdot N \cdot (D - D_R) - c_e \cdot \ln(f_D) \geq 0, \quad (2.13)$$

где D и D_R – ожидаемые индивидуальные дозы облучения человека в условиях без внешнего вмешательства (дезактивации) и с ним за первый год после вмешательства, Зв; c_e – полные затраты на проведение дезактивации территории с кратностью снижения дозы облучения после

ее проведения $f_D = D/D_R = e$, ед. валюты.; $\varphi = \frac{1 - \exp(-\mu T)}{1 - \exp(-\mu)}$ – безразмерная поправка,

учитывающая накопление дозы облучения за период наблюдения к моменту T (фактически, φ показывает, во сколько раз доза к моменту T будет больше дозы за первый год); N – число жителей на дезактивируемой территории.

Предложены условия эффективности дезактивации по ожидаемой дозе за последующий год после вмешательства в форме выражений (2.14)-(2.15):

$$D \geq \frac{c_e}{N \cdot \mathcal{G} \cdot \varphi} \cdot \frac{f_D}{f_D - 1} \cdot \ln(f_D). \quad (2.14)$$

$$D_R \geq \frac{c_e}{N \cdot \mathcal{G} \cdot \varphi} \cdot \frac{1}{f_D - 1} \cdot \ln(f_D). \quad (2.15)$$

Здесь не учитываются эффекты, проявляющиеся при длительной дезактивации (более детальная модель задана формулой (1.11)), в связи с чем выражения (2.14)-(2.15) можно использовать только на последующие несколько лет после ее завершения.

В работе [73] нами также было предложено решение для величины оптимальной дозы облучения населения, соответствующей принципу оптимизации затрат, с критериями на максимум чистой пользы от снижения радиационного ущерба за вычетом ущерба от самого вмешательства, либо на минимум затрат на вмешательство для сценария дезактивации территории без отселения (2.16)-(2.17):

$$\mathcal{G} \cdot \varphi \cdot N \cdot (D - D_R) - c_e \cdot \ln(D/D_R) \rightarrow \max ; \quad (2.16)$$

$$\mathcal{G} \cdot \varphi \cdot D_R \cdot N + c_e \cdot \ln(D/D_R) \rightarrow \min ; \quad (2.17)$$

Было показано, что при любом из этих критериев оптимальное значение остаточной индивидуальной дозы облучения D_R^{om} за первый год после завершения дезактивации территории для сценария без отселения, при котором ее можно считать наиболее эффективной, определяется выражением (2.18):

$$D_R^{om} = \frac{c_e}{\mathcal{G} \cdot \varphi \cdot N} . \quad (2.18)$$

Оно было получено в результате минимизации функции затрат $Q^- = \mathcal{G} \cdot \varphi \cdot N \cdot D_R + c_e \cdot \ln(f_D)$ при условии $\frac{dQ^-}{dD_R} = 0$. Было также продемонстрировано, что эти два критерия эквивалентны, и что такое же значение будет получено при максимизации функции выгод $Q^+ = \mathcal{G} \cdot \varphi \cdot N \cdot (D - D_R) - c_e \cdot \ln(f_D)$ от проведения дезактивации.

Этот же подход был применен к стратегии вмешательства, включающего и дезактивацию территории, и временную эвакуацию жителей. Оптимальное значение остаточной годовой дозы облучения в данном случае было, в общем случае, найдено в форме (2.19):

$$D_R^{om} = \frac{c_e}{\mathcal{G} \cdot \varphi \cdot N} \cdot (1 + q^-), \quad (2.19)$$

где q – безразмерная поправка, обусловленная потерями от дополнительного облучения работников и затратами на временное отселение жителей.

За счет учета дополнительных расходов и ущербов при эвакуации, оптимальная остаточная доза за первый год будет больше, чем при одной лишь дезактивации. В зависимости от подходов к оценке этих затрат, значение остаточной дозы может вырасти до 3 раз по оценкам работы [73].

Идеи применения принципа оптимизации к дозовым критериям (условиям) в ситуации вмешательства нами были развиты в работах [74, 118], где помимо минимизации ущерба и максимизации совокупной выгоды от вмешательства, как и в [73], были рассмотрены критерии максимизации соотношения выгод к издержкам и минимизации соотношения издержек к выгодам, представленные в выражениях (2.20) и (2.21):

$$\frac{Q^+}{Q^-} = \frac{\mathcal{G} \cdot \varphi \cdot N \cdot (D - D_R)}{c_e \cdot \ln(D / D_R)} \rightarrow \max; \quad (2.20)$$

$$\frac{Q^-}{Q^+} = \frac{c_e \cdot \ln(D / D_R)}{\mathcal{G} \cdot \varphi \cdot N \cdot (D - D_R)} \rightarrow \min. \quad (2.21)$$

Эквивалентность этих двух критериев вытекает из равенства единице их произведения.

В результате максимизации выражения (2.20) в условиях $\frac{d(Q^+ / Q^-)}{dD_R} = 0$ получается равенство (2.22):

$$\frac{D - D_R}{D_R} = \ln \frac{D}{D_R}, \quad (2.22)$$

которое соблюдается в единственном случае, когда $D_R = D$, то есть в условиях, когда дезактивация не проводится. Данный результат свидетельствует о том, что критерии (2.20) и (2.21) несостоятельны без наложения на решение дополнительных ограничений. Их несостоятельность также подтверждается в других условиях, когда затраты на дезактивацию напрямую зависят от соотношения или разности D и D_R . Таким образом, для целого ряда случаев этот критерий может считаться неподходящим.

В результате исследования было предложено использовать для оценки экономической эффективности сценариев вмешательства при радиационных авариях только критерии,

основанные на положительной разности между сопутствующих ему выгод и издержек, а также ее максимизации для поиска оптимального варианта сценария. Все критерии, выведенные в работах [50, 73, 74, 118] были протестированы на гипотетических примерах вмешательства с дезактивацией, в отдельных случаях, с отселением, и на теории продемонстрировали возможность их использования в условиях аварии при наличии всех исходных данных для расчета.

2.2 Практические оценки целесообразности вмешательства при радиационном загрязнении территорий

Опыт применения критериев (формулы (2.7)-(2.19)) оптимизации затрат и полученные в результате оценки оптимальных условий для вмешательства демонстрируют, что существуют сложности их использования на практике. В частности, дозовые критерии оптимальной, с экономической точки зрения, реализации мер вмешательства оказываются неприемлемы в соответствии с принципами обеспечения радиационной безопасности для населения, а нормативно-приемлемые дозовые условия могут быть обеспечены, как правило, только при затратах, превышающих потенциальный экономический ущерб от предотвращаемого облучения. Особенно явно это проявляется для высокозатратных мер вмешательства. Отсюда возникает необходимость выявить возможные ограничения, влияющие на применимость рассмотренных подходов.

Так, в работе [118] была предпринята попытка применить критерии оптимизации к рассмотренному ранее случаю дезактивации части территории муниципалитета Тамура в префектуре Фукусима, которая была также детально рассмотрена автором в работах [24] и [30]. В частности, были получены по формуле (2.15) численные значения остаточной дозы для населения после проведения дезактивации. Среднедушевые затраты на дезактивацию в e раз были оценены в \$145,6 тыс. на основании заявленных трудозатрат и стоимости труда в Японии [140], а значение поправки φ (описание дано в пояснениях к (2.13)) для периода наблюдения в 25 лет было оценено в 10,2. За стоимостный эквивалент единицы дозы облучения ϑ принималось среднее значение \$36,8 тыс. душевого валового национального продукта (ВНП) для Японии в период 2011-2012 годов, в результате оптимальное значение остаточной дозы после дезактивации составило 413 мЗв/год. Также, в соответствии с более жесткими американскими нормативами [113], был рассмотрен вариант значения ϑ , равного \$510 тыс., при котором значение D_R^{om} составило 28 мЗв/год. В обоих случаях, в соответствии с

рекомендациями публикации МКРЗ 103 [17, с. 188] для облучения населения, такие остаточные дозы (более 20 мЗв/год) означают, что предпринятые меры по их снижению были недостаточны. С учетом оценки затрат на дезактивацию в муниципалитете Тамура, которая составила более \$13 млн/чел.-Зв предотвращенной в последствии дозы (в сумме 1,3-2,0 чел.-Зв), можно утверждать, что данная мера экономически была реализована неэффективно при любой методике оценки ϑ .

Такие результаты в значительной мере обусловлены недостаточной проработанностью методологии анализа баланса выгод и издержек, при котором не принимаются во внимание значительное число факторов, связанных с конкретной территорией, условиями и даже задачами дезактивации. На наш взгляд, подходы к оптимизации стратегий реабилитации территорий должны в обязательном порядке учитывать именно социальные и экономические эффекты, которые идут за мерами вмешательства, так как в финансовом эквиваленте они, зачастую, более значимы, чем прямой ущерб от облучения, рассчитываемый на основании величины дозы.

В частности, для случая Японии, при дезактивации с отселением и последующим возвращением населения, в статье затрат необходимо учитывать стоимость самой реабилитации, вреда от остаточного облучения, выплат и компенсаций населению до завершения дезактивации, а в статье выгод – эквивалент предотвращенной дозы и сэкономленные за счет отмены эвакуации средства на выплаты.

В работе [30] автором было проведено сравнение основных затрат для случая проведения дезактивации в муниципалитете Тамура при развитии событий по двум сценариям: когда населению выплачиваются компенсации в заявленном размере (раздел 1.1) без проведения дорогостоящей дезактивации, и для реального сценария – проведения дезактивации с последующей отменой всех выплат. Были опущены первичные затраты на эвакуацию и ущерб от простоя производства, в предположении, что они достаточно малы для данной территории, с учетом малого числа людей и ожидаемо невысокого уровня производства. На рисунке 2.1 представлены сравнительные графики рассчитанных сумм затрат, по этим сценариям, которые свидетельствуют, что в 2021 году выплаты эвакуированным могли бы превысить затраты на эвакуацию и компенсации, осуществляемые до 2014 года².

То есть в обозримом будущем существует период наблюдения, для которого выгоды от дезактивации превысят затраты и данное решение можно будет считать экономически эффективным, исходя из анализа баланса затрат и выгод, которые неизбежно возникают в будущем в связи с реализацией данного сценария вмешательства. Такие выводы можно сделать

² На момент написания работы [30] официальная стоимость работ по дезактивации еще не была опубликована и в расчетах использовались оценки автора на основании заявленных трудозатрат.

только в предположении, что в течение наблюдаемого периода в будущем не будут приниматься другие меры вмешательства, а основные затраты и выгоды можно будет спрогнозировать с высокой степенью достоверности.

В целом же, можно утверждать, что подходы и критерии (2.7)-(2.19), предложенные в [50], могут быть использованы для оценки экономической эффективности отдельных мер вмешательства или их комплекса с учетом ряда ограничений. В частности, при условии, что для них будет определен адекватный период наблюдений, в течение которого общие экономические условия задачи будут постоянны. Так, например, нецелесообразно оценивать эффективность мер в перспективе на длительный период в десятки лет, если при этом могут измениться базовые расчетные параметры модели, нормативы радиационной безопасности, экономические условия и т.п.

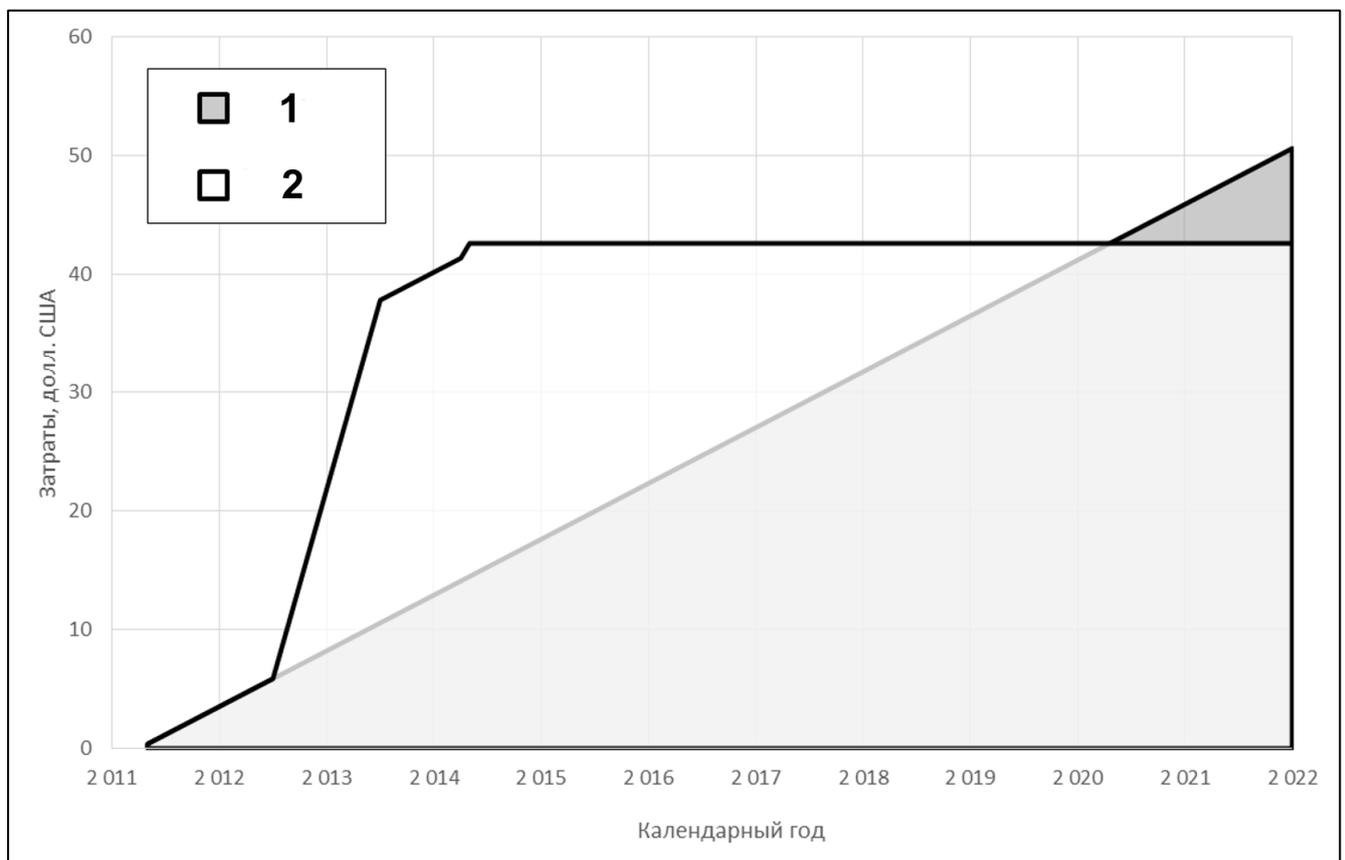


Рисунок 2.1 – Сравнение динамики затрат, связанных с компенсациями населению и проведением дезактивации для части территории муниципалитета Тамура по двум сценариям: «1» – длительное отселение с выплатой компенсаций без проведения дезактивации; «2» – дезактивация с отменой эвакуации в апреле 2014 года

Источник: на основании работы [30]

2.3 Совершенствование подходов к формированию эффективных стратегий вмешательства за счет уточнения состава и оценок ущербов

Как было отмечено в разделе 2.2, практика применения критериев (2.7)-(2.19) на реальных примерах демонстрирует, что расчетная экономическая эффективность вмешательства оказывается крайне низкой при соблюдении существующих норм обеспечения радиационной безопасности населения. В связи с этим существует необходимость выявить возможные ограничения, влияющие на их применимость и разработать рекомендации по их усовершенствованию.

В процессе тестирования предложенных условий и критериев были выявлены следующие слабые стороны и ограничения рассмотренных подходов к рационализации и оптимизации стратегий вмешательства:

- не учитываются некоторые социально-экономические эффекты вмешательства, изменяющие условия проживания населения, а также нерадиационные риски для здоровья населения;
- сложность расчета и низкая достоверность (занижение на практике) параметра C_{f_0} – затрат на дезактивацию в пересчете на одного человека – для малых или неоднородных территорий;
- недостоверность априорных оценок величины кратности дезактивации f для больших, неоднородных территорий, получаемых на основании объема выделяемых на ее проведение ресурсов;
- неактуальность задачи кратного снижения уровней облучения для больших территорий на практике по сравнению с задачей их снижения до нормативно-приемлемых значений;
- некорректность построения баланса выгод и издержек на основе оценки последствий от реализации только одного мероприятия, при практической необходимости сравнения всех альтернативных решений, к которым следует относить и невмешательство, которое также влечет затраты и выгоды;
- недостоверность рассмотрения вмешательства, как одноэтапного события, при том, что оно может протекать в несколько этапов, на каждом из которых необходимо оценивать эффективность принимаемого решения;
- значительный разброс в оценках значений величины \mathcal{Q} в отсутствие единой для всех социально-экономических условий методики.

В частности, заведомо предполагается, что эффективность дезактивации f (по кратности снижения МЭД или дозовых характеристик в месте ее проведения) имеет определенную зависимость от объема выделяемых на ее проведение финансовых средств, информацию о котором можно использовать для планирования работ по реабилитации территорий. В действительности же параметр C_{f_0} – затраты на дезактивацию в пересчете на одного человека (описание к формуле (2.7)) – сильно зависит от характеристик конкретной локации, плотности ее заселения, типа застройки, задач дезактивации и ряда прочих параметров, что затрудняет его определение и применение для относительно небольших или неоднородных участков территории. Помимо этого, параметр эффективности дезактивации f тоже достаточно условно определен для отдельных видов работ, а при их одновременном проведении его прогнозирование значительно осложняется. Таким образом, единственным способом обоснованной оценки стоимости реабилитации видится только анализ уже проведенных работ для этой же территории или использование официальных данных о затратах на ее проведение. Кроме того, сам подход, предполагающий, что кратность планируемой дезактивации можно выбирать заблаговременно, исходя из выделенных на дезактивацию ресурсов, на практике не применяется, по причине того, что только часть средств, направляемых на реабилитацию территорий, идут непосредственно на работы, улучшающие радиационную обстановку и снижающие дозу облучения жителей. Значительная их часть идет на дозиметрическое сопровождение работ, захоронение отходов и мероприятия по восстановлению инфраструктуры пострадавших территорий [126].

Как показала ситуация при аварии в Японии в 2011 году, при вмешательстве не обязательно ставится задача по снижению радиационного фона с заданной кратностью, в чем делается упор при рассуждениях в работах [50, 73]. Гораздо актуальнее задача снижения уровня радиационного фона до нормативно-приемлемых значений, позволяющих впоследствии снять экономические ограничения, отменить режим эвакуации или отселения, сохранить производство и избежать других экономических потерь, обусловленных изменением социально-экономической обстановки на затронутых территориях. В этом случае желаемая кратность снижения уровней облучения будет различной для разных участков территорий, что также затрудняет применение на практике оценок затрат на проведение дезактивации в приближении (2.6).

Определение затрат Q^- (описание к формуле (2.9)), связанных как с эвакуацией и расселением жителей, выплатами компенсаций, потерями доходов и имущества (в т. ч. предприятий), предполагает наличие детальной информации о территории, плотности проживания населения, размещения на ней жилых и коммерческих объектов. Усредненные

показатели для стран, регионов и даже крупных районов могут быть неприменимы для таких оценок, так как зоны введения экономических ограничений и эвакуации населения связаны с зонами радиационного загрязнения, которые затрагивают как плотно заселенные, так и необжитые территории. Если учесть, что, даже при крупных радиационных авариях на АЭС, зоны, где требуется эвакуация или введение других ограничений, как правило не распространяются шире 30 км от аварийного объекта³, то детализация зоны радиационного загрязнения даже с точностью порядка 1 км может оказаться недостаточной для адекватной оценки ущерба или даже численности населения. Таким образом, низкая достоверность исходных данных по населению и экономике пострадавших территорий является препятствием для получения корректных оценок сопутствующих социально-экономических эффектов.

Стоит отметить, что, помимо ущерба здоровью от облучения, в оценках целесообразности принятия мер по защите населения не принято учитывать другие сопутствующие риски для здоровья населения. Тем не менее, об их наличии свидетельствуют различные сообщения и исследования, преимущественно проведенные по данным последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» в последние годы. Так, в сентябре 2017 года в работе [109] были опубликованы результаты клинических исследований и выявления случаев диабета у жителей муниципалитетов Сома и Минамисома префектуры Фукусима. Часть города Минамисома Сити оказалась в зоне обязательной эвакуации, а территория Сома – полностью вне ее зоны, при этом расхождения в уровнях радиационного фона и дозовых нагрузок на население в обеих зонах были незначительны, а сами их значения были крайне невелики (порядка 16 мЗв), что заведомо позволяло оценивать только гипотетические риски возникновения отдаленных стохастических медицинских эффектов облучения. Исследования проводились в нескольких возрастных группах, среди прошедших эвакуацию и неэвакуированных жителей. Ущерб от рассматриваемых факторов оценивался в потере продолжительности жизни, обусловленной проявлением эффектов в разные временные периоды после аварии.

Данное исследование выявило дополнительные риски, сопутствующие реагированию на чрезвычайные ситуации. Так, у жителей обоих муниципалитетов статистически был выявлен повышенный риск диабета в группе лиц от 40 до 70 лет, при этом, у эвакуированных этот риск оказался до 1,4 раза выше, чем у неэвакуированных. В целом же, в этой группе потери продолжительности жизни от дополнительных случаев проявления диабета превысила в 21-33 раза соответствующие гипотетические потери от радиационно-индуцированного рака. У группы до 40 лет повышение риска диабета также было выявлено, но из-за больших неопределенностей такой вывод не был сделан. В целом, по всем возрастным группам, средняя

³ На основании противоаварийных планов предприятий Госкорпорации «Росатом» и на основании моделирования аварийных выбросов АЭС.

потеря продолжительности жизни от проявившихся случаев диабета может превышать гипотетические потери от облучения в 3,7-5,9 раза. Индивидуальный уровень ущерба от дополнительного риска диабета для всех возрастных групп оценивается в 0,026-0,041 лет/чел., а для группы 40-70 лет – в 0,05-0,08 лет/чел. В работе [109] также была оценена стоимость терапевтических мероприятий, позволяющих компенсировать потерю 1 года жизни больного диабетом пациента в сумму менее \$66 тыс., что почти вдвое больше, но вполне сравнимо с ВНД жителей Японии, и значительно эффективнее по затратам, чем большинство мер по предотвращению радиационного облучения, приводящего к аналогичной потере продолжительности жизни. Таким образом, дополнительный экономический ущерб $c_{нер}$ от нерадиационных рисков, сопутствующих вмешательству, в пересчете на одного человека, может быть оценен как произведение среднего сокращения продолжительности жизни R в результате данного вида вмешательства (либо $R(T)$, если риск заболеваемости зависит от времени T проживания в эвакуации или в ухудшенных условиях) и экономического эквивалента затрат ρ по предотвращению потери одного года жизни человека.

Если предположить, что эвакуация явилась основной причиной роста заболеваемости диабетом в наблюдаемой группе, то можно оценить уровни облучения, сопоставимые с ними по потерям продолжительности жизни из-за гипотетических случаев заболеваемости раком. Так, среднее сокращение продолжительности жизни за счет дополнительных случаев диабета в группе 40-70 лет по ущербу эквивалентно среднегодовому облучению с интенсивностью 12,5 мЗв/год (0,9-1,4 мкЗв/час) за те же четыре года (для более младших групп и для всей популяции – менее 2 мЗв/год) [109]. Откуда следует вывод, что для данной группы серьезное вмешательство, такое как эвакуация, при ожидаемых годовых дозах менее 12,5 мЗв в первые годы после аварии вероятнее всего принесёт больший вред здоровью, чем отсутствие вмешательства. Даже без учета стоимости сопутствующего вмешательству затрат оно будет невыгодно обществу, исходя из баланса гипотетических рисков для здоровья населения.

Если другие исследования также продемонстрируют зависимость нерадиационных рисков заболеваемости из-за реализации мер вмешательства и этот ущерб можно будет оценить с достаточной достоверностью для различных групп населения, то уже на ранних стадиях реагирования можно будет обоснованно отклонять эвакуацию или другие меры при уровнях ожидаемых доз облучения, сравнимых с рекомендуемыми сегодня в соответствии с нормами радиационной безопасности.

Таким образом, исследователями было обосновано, что риски и стоимость ущерба для здоровья населения из-за нерадиационных эффектов при проведении эвакуации могут в десятки раз превосходить потенциальные риски и ущерб от радиационных эффектов, обусловленных

облучением в малых дозах без вмешательства. Эти дополнительные риски могут быть оценены в годах сокращения продолжительности жизни от заболеваний, спровоцированных изменением социальной обстановки или жизненного уклада в результате вмешательства.

По итогам рассмотрения приведённых в данной главе исследований можно прийти к выводу, что подходы работ [50, 73, 118] могут быть приближены к практике и оптимизированы для современных условий протекания процесса реагирования на радиационные аварии, примером которых является авария на АЭС «Фукусима-1». Так, баланс выгод и издержек при реализации сценария вмешательства необходимо рассматривать не обособленно, в ходе попарного сравнения альтернативных сценариев. В случае радиационного загрязнения территории, на которой проживает население, бездействие или невмешательство тоже может рассматриваться как мера, имеющая свой экономический эффект $Q_{невм}$ (формула (2.23)), складывающийся из выгод и ущерба. В данном случае, невмешательство сравнивается с ситуацией отсутствия радиоактивного загрязнения территории, экономический эффект от которого будем считать равным нулю:

$$Q_{невм} = -\sum_i \Delta D_i^k(T) \cdot \mathcal{G}_i - N \cdot c_{прож}(T), \quad (2.23)$$

где первое слагаемое в правой части уравнения – совокупный ущерб от облучения населения за период наблюдения T , ед. валюты; $c_{прож}(T)$ – компенсация на каждого из N жителей за проживание на территории с повышенным радиационным фоном, ед. валюты/чел.

Разделение ущерба, которое предлагается учитывать в (2.23), предполагает, что $\sum_i \Delta D_i^k(T) \cdot \mathcal{G}_i$ – неявный ущерб от дополнительных случаев заболеваемости (стохастические эффекты), который реализуется в необходимости отложенного лечения и диагностики. Эти затраты неявно ложатся как на государство, так и на жителей и распределяются на весь период проявления негативных эффектов. Величина \mathcal{G} в данном случае получает вполне очевидный смысл затрат, необходимых для предотвращения ущерба от 1 Зв облучения либо, в интерпретации НРБ 99/2009 [10], потери 1 года жизни индивидуума в группе, за счет проведения мероприятий по диагностике и лечению, стоимость которых приводится, например, в работе [107]. Из выводов работ [50, 51] следует, что величина \mathcal{G} не должна сильно отличаться от величины ВНД для данной территории и будет зависеть от благосостояния ее жителей и уровня развития медицины. Более детальный разбор подходов и методик к оценке параметра \mathcal{G} , проведенный в разделе 1.3, снимает вопросы о трактовке смысла и оценке данного параметра при решении практических задач.

Смысл компенсации населению $c_{\text{прож}}(T)$ заключается в обеспечении социальной справедливости, а также предотвращение миграции населения на другие территории. Обязанность компенсации ложится на государство, как главного выгодоприобретателя от предотвращения миграции. Может показаться, что можно легко избежать выплаты этой компенсации, что будет означать неявное перекалывание ущерба на население, но на практике она, часто опосредованно, может включаться в другие затраты на реабилитацию территорий. Так, после аварии на ЧАЭС, жители пострадавших районов официально получают эти выплаты, хотя формально они могут иметь другое название или заявленные цели. При аварии на АЭС «Фукусима-1» этими выплатами фактически стали разовые пособия, обещанные возвращающимся из эвакуации семьям. Выплата компенсаций характерна не только для сценария невмешательства, но и для других обстоятельств, при которых ухудшаются условия проживания населения. Как было упомянуто ранее, на затронутых аварией территориях в префектуре Фукусима, реабилитация территории стала залогом возвращения населения. Таким образом, фактические затраты на реабилитацию загрязненных территорий можно разделить на стоимость работ по снижению радиационного загрязнения и восстановительные работы, направленные на улучшение социальных условий, затраты на которые можно отнести к форме компенсации $c_{\text{прож}}(T)$. Такой подход объясняет чрезмерно высокую стоимость реабилитации территорий по сравнению с расчетной, в случаях, когда она преследует дополнительные цели предотвращения отселения или миграции населения за счет улучшения (восстановления) социальных условий, и обосновывает необходимость учитывать покрытия персонального ущерба $c_{\text{прож}}(T)$ из-за изменения условий проживания в уравнении баланса выгод и издержек (2.1).

Для сценария проведения длительного отселения экономический эффект от вмешательства следует рассматривать в виде (2.24), в сравнении с невмешательством, которое тоже следует считать точкой отсчета или вариантом сценария реагирования, что в явном виде не учитывается в исследовательских работах [50, 73, 118] и нормативных документах [102, 103, 101, 96, 97]:

$$Q_{\text{отсел}} = \sum_i \Delta D_i^k(T) \cdot g_i + N \cdot c_{\text{прож}}(T) - \sum_i N_i \cdot R_i^{\text{отсел}}(T) \cdot \rho_i - N \cdot (z_{\text{эвак}} + z_{\text{имущ}} + z_{\text{доход}}), \quad (2.24)$$

где N – общее число отселённых жителей, чел.; N_i – число отселённых в i -ой возрастной или другой группе, чел.; $c_{\text{прож}}(T)$ – индивидуальная компенсация, которую не нужно будет платить оставшимся жителям, ед. валюты/чел.; $R_i^{\text{отсел}}(T)$ – ущерб здоровью (либо риск такого ущерба),

выраженный в годах сокращения жизни в пересчете на человека, вызванный изменением условий проживания из-за отселения и соответствующим ростом заболеваемости (i – возрастная или другая группа населения), лет/чел. Оценка этой величины проводится в ходе исследований, как и в работе [109]; ρ_i – денежный эквивалент затрат по предотвращению одного года потери жизни за счет повышения заболеваемости, вызванного изменением условий проживания для i -группы отселенных жителей, ед. валюты/чел.-лет. $Z_{\text{эвак}}$ – затраты, связанные с эвакуацией жителей, ед. валюты/чел.; $Z_{\text{имущ}}$ – затраты, связанные с компенсацией потери имущества эвакуированных, ед. валюты/чел.; $Z_{\text{доход}}$ – затраты, связанные с компенсацией потери дохода, обусловленные сменой места жительства, ед. валюты/чел.

В более конкретном случае $\sum_i N_i \cdot R_i^{\text{отсел}}(T) \cdot \rho_i$ должно задаваться отдельно для каждого вида заболевания, рост которого может наблюдаться. Данные по величине ρ_i в этом случае могут быть заимствованы из работы [107]. В более общем случае может рассматриваться набор наиболее значимых заболеваний, для которых установлены осредненные значения ρ_i и $R_i^{\text{отсел}}(T)$.

Временная эвакуация может рассматриваться как альтернатива невмешательству, где экономический эффект от нее будет иметь вид (2.25):

$$Q_{\text{эвак}} = \sum_i (\Delta D_i^k(T_{\text{эвак}}) - \Delta D_i^k(T - T_{\text{эвак}})) \cdot \rho_i - \sum_i N_i \cdot R_i^{\text{эвак}}(T) \cdot \rho_i - N \cdot [z_{\text{эвак}}(T_{\text{эвак}}) + z_{\text{доход}}(T_{\text{эвак}}) + c_{\text{прож}}(T - T_{\text{эвак}}) + c_{\text{прож}}(T)] \quad (2.25)$$

где $\Delta D_i^k(T_{\text{эвак}})$ – предотвращенная коллективная доза облучения за счет эвакуации, чел.-Зв; $\Delta D_i^k(T - T_{\text{эвак}})$ – остаточная коллективная доза за остальной наблюдаемый период времени чел.-Зв; $\sum_i N_i \cdot R_i^{\text{эвак}}(T) \cdot \rho_i$ – эквивалент стоимости мероприятий, направленных на предотвращение сокращения жизни эвакуированных жителей за счет повышения заболеваемости по причине временного изменения среды проживания, где $R_i^{\text{эвак}}(T)$ – усредненная в пересчете на одного эвакуированного потеря продолжительности жизни в годах из-за роста заболеваемости в группе i , не связанной с облучением (устанавливается путем клинических исследований), лет/чел; $z_{\text{эвак}}(T_{\text{эвак}})$ – удельные расходы на эвакуацию и проживание в эвакуации на весь ее период $T_{\text{эвак}}$ (сюда целесообразно включать целевые пособия

эвакуированным на аренду жилья, питание и т.п.), ед. валюты/чел.; $z_{доход}(T_{эвак})$ – компенсации потери дохода всем эвакуированным на время эвакуации (сюда могут быть включены потери предприятий); $c_{прож}(T - T_{эвак})$ – компенсации в пересчете на одного жителя за проживание на территории с ухудшившимися условиями после возвращения из эвакуации, которые могут быть выражены в форме пособий либо дополнительных вложений по улучшению условий проживания, ед. валюты/чел.

Аналогично можно рассмотреть, какой экономический эффект $Q_{дез/отсел}$ будет иметь дезактивация с реабилитацией территории и возвращением населения из эвакуации по сравнению с альтернативой – переходом эвакуации в отселение. Здесь предполагается, что эвакуация уже была проведена к моменту принятия решения, а сроки дезактивации небольшие. Эффект будет выражаться в форме (2.26):

$$Q_{дез/отсел} = -N \cdot c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + \sum_i (\Delta D_{i,дез}^k(T) - \Delta D_i^k(T)) \cdot \mathcal{G}_i + \sum_i N_i \cdot R_i^{отсел}(T) \cdot \rho_i + N \cdot z_{умуц} \quad , \quad (2.26)$$

где $N \cdot c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f$ – расчетная стоимость затрат на снижение радиационного фона в f раз или стоимость дезактивации, ед. валюты; $\Delta D_{i,дез}^k(T)$ – предотвращенная коллективная доза за счет дезактивации на весь последующий период наблюдения, чел.-Зв; $\Delta D_i^k(T)$ – коллективная доза, предотвращаемая за весь последующий период отселения, чел.-Зв.

Численные оценки доз облучения на основании выражений (2.24)-(2.26) можно получить, используя для расчета величин дозы облучения и мощности дозы аналитические формулы (1.1), (1.8) и (1.11) либо применив для этого другие приближения или численные методы.

Таким образом, на любом из этапов, где возможен выбор из нескольких мер вмешательства, предлагается просчитывать экономический эффект одного сценария относительно другого. Наиболее эффективный сценарий будет иметь больший положительный эффект, при этом не следует забывать, что бездействие на любом из этапов также может привести к возникновению выгоды или ущерба, который надо оценивать в сравнении с альтернативными сценариями развития ситуации.

По результатам рассмотренных замечаний предлагается усовершенствовать рассмотренные в разделе 2.1 подходы к рационализации и оптимизации стратегий

вмешательства при реабилитации территорий и защите населения за счет учета при анализе баланса выгод и издержек следующих рекомендаций:

- рассматривать принятие решений по реагированию как итерационный процесс, на каждом этапе которого для оценки эффективности мер вмешательства необходимо производить попарное сравнение сопутствующих выгод и издержек при реализации альтернативных сценариев вмешательства, рассматривая невмешательство, как один из вариантов реагирования;
- учитывать в балансе выгод и издержек компенсационные выплаты населению либо другие формы покрытия персонального ущерба $C_{прож}$ из-за изменения условий проживания, вызванного последствиями радиационного загрязнения территории либо ухудшением социально-экономических условий из-за реализации мер вмешательства
- учитывать дополнительный потенциальный ущерб здоровью $C_{нер}$, обусловленный ростом нерадиационных рисков заболеваемости населения, вызванных изменением социальных условий проживания вследствие проведенного вмешательства;
- учитывать при обосновании мер вмешательства в разных странах зависимость ущербов $C_{прож}$ и $C_{нер}$ от благосостояния государства, показателей ВВП и ВНД территории, где произошла авария. Для оценки ущерба здоровью от радиационных рисков для различных экономических условий следует руководствоваться выводами по применению соответствующих расчётных моделей из раздела 1.3.

Основные выводы по главе 2:

- продемонстрирована несостоятельность критерия, основанного на соотношении выгод и издержек, для сценария дезактивации без отселения в отсутствие наложения на него дополнительных ограничений;
- предложены теоретические подходы к выработке эффективных стратегий вмешательства и критерии эффективности сценариев вмешательства при радиационных авариях, базирующиеся на разности выгод и издержек;
- выявлены ограничения к применению предложенных подходов на практике, обусловленные неучетом отдельных социальных и экономических эффектов, свойственных ситуации поставарийного вмешательства при радиационных авариях;
- предложены рекомендации по усовершенствованию предложенных подходов и критериев, учитывающие многостадийность процедуры принятия решений, сравнение альтернативных сценариев при вмешательстве, компенсацию изменений условий проживания населения, дополнительные нерадиационные риски для здоровья, социально-экономические особенности территорий и уровень благосостояния государства при оценке ущербов.

Глава 3 Информационное обеспечение управления ликвидацией последствий радиационной аварии

3.1 Структура информационной системы для оценки последствий радиационного загрязнения территорий

В данном исследовании ставится задача выработать основные принципы формирования специализированных информационных систем, ориентированных на решение задач анализа последствий радиационного загрязнения территории и применения мер поставарийного вмешательства. В ходе их разработки необходимо исследовать доступные данные статистики по населению, экономике и хозяйственному назначению территорий в зонах потенциального воздействия радиационно опасных объектов. Следует заблаговременно установить источники и каналы поступления, форматы, объемы (регулярность, частоту) и структуру собираемой информации по радиационной обстановке. Для использования системы в задачах обеспечения информационной поддержки при выработке решений о вмешательстве требуется также агрегировать в ней информацию по законодательным и нормативным актам, определяющим порядок действий властей, обязательства государства и владельцев аварийного объекта в отношении населения и экономических агентов, действующих на подконтрольных территориях.

Практическими задачами на пути разработки подобной информационной системы являются: выбор состава данных для ее информационного наполнения; подбор методик, алгоритмов и константного обеспечения для проведения расчетов; выбор технических решений для организации хранения данных и разработки системы.

Предлагаемая автором общая схема организации специализированной информационной системы для анализа социально-экономических и радиационных последствий аварийного загрязнения территорий на основе геоинформационные системы (ГИС) и системы управления базами данных (СУБД) приводится на рисунке 3.1.

Для достоверного расчета социальных, экономических эффектов и последствий загрязнения местности необходимо очень детально учитывать демографические и экономические особенности конкретных территорий, знать количество пострадавших, площади затронутых земель с учетом их специализации в хозяйстве, число и стоимость объектов недвижимости различного назначения и т.п. Для наполнения системы предлагается следующий минимальный набор географически привязанных данных:

- территориальное деление: границы субъектов или других участков разбиения территории, информация об ее административном или другом делении;
- демографические показатели территории: численность населения с разбиением по половозрастному составу, число семей (домохозяйств);
- землепользование: площади заселенных территорий, сельскохозяйственных угодий, земель прочего назначения, объемы недвижимости по назначению;
- экономические параметры территорий: доходы территориальных субъектов от различных видов экономической деятельности, доходы населения, налоговые отчисления, экономические индексы либо другие параметры, позволяющие установить ущерб в случае изменения условий ведения экономической деятельности (при отселении или введении ограничений);
- социально-экономические показатели: оплата труда, величина пособий, типовые расходы населения, стоимость недвижимости и ее аренды, а также другие параметры, которые могут использоваться для оценки стоимости проведения защитных мероприятий.

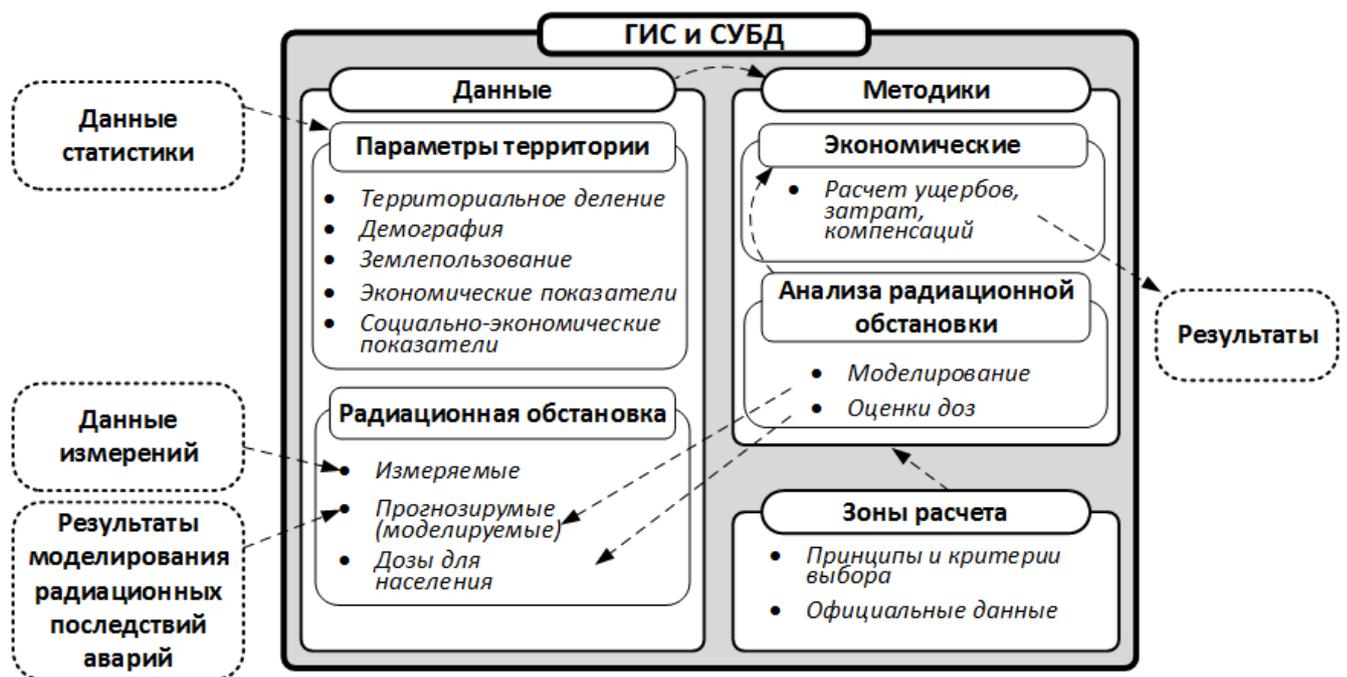


Рисунок 3.1 – Схема организации информационной системы для анализа последствий радиационных аварий

Эти данные используются для расчетов других экономических и социальных показателей, включая затраты и ущербы (совокупные для территории, в пересчете на одного человека или на единицу площади), сопутствующие аварии и противоаварийной деятельности на наблюдаемых территориях. Заранее прорабатываются алгоритмы и методы оценки таких

функций, как: совокупный доход жителей (за выбранный период), объемы производства, совокупная стоимость недвижимости определенных категорий, затраты на транспортировку или проживание (в случае эвакуации), суммы компенсаций и др. Набор функций и моделей для их расчета определяются индивидуально для каждой территории в соответствии с ее социально-экономическими особенностями. Необходимо заблаговременно определить, какие затраты напрямую вызваны радиационными последствиями аварии или мерами по их ликвидации, а какие стоит отнести к косвенным ущербам, обусловленным событиями и решениями, не имеющим прямого отношения к аварийному реагированию.

Для анализа ситуации при конкретной аварии также агрегируется актуальная информация о радиационной обстановке, которая имеет географическую привязку и подвержена динамическим изменениям. В основе детализированных расчетов по территории загрязнения лежат данные, полученные путем прямых измерений параметров радиационной обстановки на местности или методами их математического моделирования с использованием специализированных расчетных методик, что возможно осуществлять уже на ранней стадии аварии. Как правило, эти данные включают информацию о концентрации конкретных радионуклидов в почве, значениях МЭД гамма-излучения, уровнях естественного природного фона (до момента техногенного загрязнения) либо другие показатели, которые, как правило, могут быть рассчитаны аналитически.

При необходимости рассмотрения радиационной обстановки в динамике и для долгосрочного прогнозирования доз облучения населения используются данные наблюдений за длительный период (если проводится ретроспективный анализ) или физические модели прогнозирования с учетом протекания естественных процессов и под влиянием внешнего воздействия на загрязненной местности (раздел 1.4). Применяются данные о значениях природного фона на рассматриваемой территории до аварии, особенно на тех участках, где уровни техногенного загрязнения не очень высоки и сопоставимы с доаварийными. Сбор и адаптация для наполнения информационной системы описанных видов данных является ключевой задачей всего анализа, без решения которой нельзя говорить о достоверности конечного результата. Во многом именно трудоемкость сбора, систематизации и последующего анализа изначально разрозненной информации тормозит развитие направления прогнозирования социально-экономических последствий в задачах аварийного реагирования с радиационным фактором.

В качестве методического обеспечения системы, для обработки данных по радиационной обстановке должны быть также выработаны модели и алгоритмы пересчета эффектов облучения (или его предотвращения за счет принятых мер) для населения: индивидуальных или

коллективных доз облучения за определенный период, рисков возникновения негативных медицинских последствий, стоимостного эквивалента облучения.

К константному и методическому обеспечению информационной системы относятся также принципы и критерии определения границ территорий, для которых должны проводиться расчеты. В качестве принципов могут служить официальные границы зон проведения отселения, эвакуации, дезактивации и других работ. В качестве критериев могут выступать определенные уровни радиационного загрязнения (концентрации радионуклидов в почве), радиационного фона (МЭД), прогнозируемых дозовых нагрузок на население в соответствии с которыми выстраиваются границы территориальных зон. Критерии определяются для конкретных территорий и сложившихся условий на основе существующих официальных правил и рекомендаций, касающихся реагирования при радиационных инцидентах.

На сегодняшний день наиболее распространенным техническим решением для анализа информации, имеющей географическую привязку на местности, являются геоинформационные системы, обладающие многими свойствами реляционных систем управления данными либо функционирующими в связке с ними. Методическое и константное обеспечение в таких системах технически реализуется через подготовку специальных хранимых процедур или запросов, являющихся стандартными инструментами ГИС или СУБД. С их помощью осуществляются операции по обработке данных и получению результатов расчетов.

В общем случае может быть предложено как минимум два подхода к организации хранения данных по загрязненным территориям с применением упомянутых выше технологий. В первом случае данные по экономике и демографии привязываются к административным образованиям. Такую информацию обычно проще получить, но размеры субъектов часто бывают велики и имеют сложную линию границ, что вынуждает хранить и обрабатывать эти данные в ГИС и строить полноценную карту территории с учетом границ административных образований. Данные по радиационной обстановке в этом случае должны либо усредняться по территории субъекта, либо его площадь должна дополнительно дробиться на участки с разными уровнями загрязнения, при этом все остальные статистические данные по этим участкам должны будут усредняться или пересчитываться в соответствии с их площадью (например, численность населения и объемы производства), что вызовет искажение объективной информации. Данный способ требует представления большей части информации, хранящейся в системе, в форме географически привязанных площадных объектов, а вся ее обработка, расчет зон эвакуации, численности населения, ресурсов по ним и т.п., будут производиться средствами ГИС. Второй способ предполагает разбиение всей территории регулярной пространственной сеткой с фиксированным размером ячейки и привязку данных по радиационной обстановке, демографических и экономических параметров к каждой ячейке сетки (некоторые данные в

таком формате распространяет Глобальная библиотека данных о земной поверхности GLCF [141]). Подобным образом удобно организовать данные по радиационной обстановке, но по другим параметрам далеко не для любой территории такая информация имеется в свободном доступе (особенно, если пространственное разрешение сетки достаточно высоко – менее километра по стороне ячейки), в связи с чем необходимо проводить дополнительную работу по реорганизации имеющихся данных под формат регулярной пространственной сетки. Выгода такого подхода заключается в более детальном представлении данных, уменьшении ошибок усреднения, а также практически полный отказ от ГИС на этапе расчетов, возможность хранения и оперативной обработки информации более подходящими для этого средствами реляционной базы данных.

Предложенные выше принципы организации данных по радиационно-загрязненным территориям были использованы автором для разработки специализированной информационной системы для анализа последствий реальной радиационной аварии [26, 27, 25].

3.2 Первичные оценки радиационных и социально-экономических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1»

В данной работе предлагается рассмотреть процесс и результаты исследований автора, посвященных анализу радиационных и экономических последствий чрезвычайной ситуации в префектуре Фукусима, сложившейся в результате аварии на АЭС «Фукусима-1». Исследования проводились период с 2011 по 2017 годы, в ходе чего, на основе предложенного подхода к построению специализированных информационных систем для задач анализа последствий радиационного загрязнения территории (раздел 3.1), были разработаны две информационные системы и проведены серии расчетов, различающиеся принципами обработки информации и наполнением баз данных. Первое исследование было проведено в 2011 году, в результате чего были получены и опубликованы одни из первых оценок по радиационным последствиям аварии, численности пострадавшего населения, возможных экономических последствий, а далее результаты были развиты и уточнены в работах [27, 31, 28, 24].

Задача создания геоинформационной базы данных возникла уже в первые недели после начала аварии, когда появилась необходимость получить общую картину распределения загрязнения и карту радиационной обстановки для наиболее пострадавших территорий. Такая возможность появилась, когда был собран достаточный для построения карты радиационной обстановки объем данных по результатам произведенных замеров МЭД на большей части

префектуры Фукусима. Для получения первых оценок радиационных и социально-экономических последствий аварийного загрязнения и масштабной эвакуации на территории префектуры Фукусима была создана геоинформационная база данных по территории префектуры на основе компьютерной ГИС Mapinfo [138].

Данные по радиационной обстановке, ежедневно получаемые преимущественно при помощи специальных передвижных постов дозиметрической разведки, свободно предоставлялись японской стороной с первой недели аварии как для наиболее пострадавших районов, так и по всей территории Японии (информацию предоставляло Министерство образования, культуры, науки, техники и технологии Японии (МEXT) [142]). Отдельные результаты замеров в непосредственной близости к аварийной АЭС также свободно предоставляла компания-оператор АЭС ТЕРСО [119]. В начале апреля 2011 года в открытом доступе появились данные измерений, проведенные военной авиацией США для значительной части территории префектуры Фукусима [80]. Таким образом, в России первые карты по радиационной обстановке были представлены ИБРАЭ РАН для российских органов власти во второй половине апреля 2011 года на основании данных по 274 точкам измерений в префектуре Фукусима и соседних субъектах. Позже, на основании дополненных данных были выделены границы зон с различными уровнями радиационного загрязнения и ожидаемыми значениями доз облучения населения на последующий год. При занесении этой информации в ГИС и объединении с административными картами территории, содержащими данные по демографическим параметрам на уровне муниципалитетов, предполагалось получить оценки численности населения, которое могло оказаться в зонах, попадающих под критерии эвакуации, либо наоборот – не требующих какого-либо вмешательства.

Для проведения этих расчетов необходимо было создать полноценную информационную систему по наиболее загрязненным территориям, где была бы собрана вся информация по радиационной, демографической и социально-экономической обстановке. Так как эвакуация была проведена только на территории префектуры Фукусима, система должна была обязательно включать в себя всю ее территорию. На первом этапе формирования информационной системы были собраны данные по административному делению этого региона:

– на базе доступных растровых карт Wikimapia [79] была создана векторная карта административного деления префектуры Фукусима, включающая 59 муниципалитетов⁴;

⁴ К 2017 году векторные карты практически любого региона мира могли быть загружены из общедоступных картографических сервисов в сети Интернет. В 2011 году эти технологии еще не были так распространены и доступны, поэтому из открытого доступа проще было получить растровые карты, на основе которых самостоятельно строились векторные.

– на основе карт OSM [137] был создан векторный слой территорий префектуры Фукусима, который относится исключительно к заселенным территориям.

Ввиду того, что основной задачей ставился расчет численности населения, ресурсов и потенциальных ущербов внутри границ произвольно заданных географических зон, в которые могут попадать сразу несколько муниципалитетов или только их частей, существовала необходимость учитывать неоднородность распределения людских и материальных ресурсов в границах каждого муниципалитета. Для территории Японии это также актуально, так как уже задействован максимум ее площади, пригодной для проживания или ведения сельского хозяйства. Так, в радиусе нескольких десятков километров от АЭС имеются плотно заселенные равнины и прибрежная зона, а также пустующие горные районы. При подсчете численности населения и экономических ресурсов на интересующих участках территорий, на уровне информационной системы было важно разграничить пустынные и густонаселенные зоны, чтобы избежать ошибок, связанных с усреднением отдельных характеристик территориальных субъектов по всей своей площади.

Для работы с пространственными данными в ГИС населенные территории муниципалитетов использовались в форме площадных географических объектов, для каждого из которых был определен набор свойств. В качестве источника данных характеристик населенной части территории каждого из муниципалитетов префектуры Фукусима автором использовались доступные данные бюро статистики Японии [130, 140]. Из нескольких сотен параметров были выбраны отдельные демографические и финансовые показатели, характеризующие плотность населения, доходы и объемы производства продуктов и услуг по каждому муниципалитету. Использовались последние официальные данные, доступные на апрель 2011 года, преимущественно собранные за период 2005-2008 годов. Если какие-то данные были неизвестны для отдельных муниципалитетов (в частности, по цене недвижимости), то для них бралось усредненное значение по остальным муниципалитетам. На начальном этапе сбора информации она агрегировалась в табличной форме, позднее структура и содержимое таблиц импортировались в ГИС.

Составленная информационная система позволяла, используя специальные запросы ГИС, рассчитывать площади территорий, численность населения, коллективные дозы облучения населения и объем экономических ресурсов, оказавшихся:

- в официальной зоне проведения эвакуации;
- в зонах с определенными уровнями радиационного загрязнения, МЭД или ожидаемой дозы облучения за известный период времени (зоны определялись верхней и нижней границей дозового параметра и представлялись в ГИС в форме векторного площадного объекта);

– в пределах любой зоны, которая может быть описана в форме векторного объекта, имеющего площадь и границу.

Проведенные расчеты численности населения по основным зонам эвакуации продемонстрировали хорошее совпадение с реальными цифрами, опубликованными позже в официальных источниках. Так, расчетным путем было установлено, что к концу мая 2011 года с места постоянного проживания из всей зоны эвакуации могли выехать примерно 132 тыс. человек с территории общей площадью 389 км², из них около 820 могли быть беременные женщины, требующие особых условий проживания и медицинского наблюдения.

Через несколько лет после аварии стали доступны более детализированные данные по радиационной обстановке в префектуре Фукусима, однако сама картина радиационной обстановки, полученная в 2011 году и сделанные на ее основе прогнозы по возможным дозам для населения, не претерпели принципиальных изменений.

Для оценки сопутствующих эвакуации и возможному отселению затрат и ущербов автором были учтены:

- стоимость перемещения населения;
- стоимость проживания и питания жителей в эвакуации;
- оплата услуг обслуживающего персонала на время эвакуации;
- потери дохода жителей на период эвакуации;
- потери от прекращения ведения экономической деятельности на оставленных территориях.

Для экономических оценок использовались следующие базовые показатели, которые были рассчитаны на основании доступных данных статистики для территории и населения Японии [130, 140]:

- среднемесячная зарплата японского рабочего из сферы обслуживания, монтажа и транспорта – \$4 728 (использовалось для оценки стоимости обслуживания эвакуируемых, по среднему курсу на апрель 2011 года – \$1,21/¥100);
- стоимость одного человека-часа работы \$28,31 (использовалось для оценки стоимости дезактивации);
- стоимость разовой эвакуации – \$33/чел;
- средняя стоимость аренды дома для семьи в Японии – \$536,6/мес. (\$7,09/сут. – стоимость обеспечения проживания обслуживающего персонала в местах эвакуации);
- средний доход на человека (каждого члена средней семьи рабочего специалиста) – \$1 998,5/мес.;

- расходы на питание средней японской семьи – \$727/мес. или \$11/(чел.×мес.) (учитываются также для обслуживающего персонала);
- средняя стоимость жилища для семьи – \$56 830 (для оценки потери недвижимости).

Финансовые потери экономических агентов оценивались только за первые два года в предположении, что за этот срок будут предприняты меры для восстановления их деятельности на новом месте. К ним были отнесены объемы производимого на эвакуированной территории товара, доходов от торговли и сельского хозяйства. Первые оценки по муниципалитетам показали, что, в пересчете на каждого жителя, готовый объем такого финансового оборота близок к показателю среднедушевого ВНД Японии.

Дополнительно оценивалась потеря территории, в случае долгосрочного отселения и невозможности дальнейшего ее использования для строительства. Грубая оценка этого показателя была получена путем сложения стоимости всей земли, пригодной под жилое строительство, однако эти потери целесообразно рассматривать отдельно от остальных как гипотетические и использовать как верхнюю оценку отдаленных экономических последствий для государства.

По результатам проведенных автором оценок, более \$4 млн должно было быть затрачено непосредственно на осуществление эвакуации и еще \$322 млн должен был обходиться каждый месяц пребывания людей в эвакуации (учитывалось все население территории основной и расширенной зон эвакуации), что должно было очень быстро превысить возможные компенсации за утрату недвижимости, и стимулировать власти уже в первые несколько месяцев принять решение о частичном возвращении жителей или окончательном отселении тех, чье возвращение затрудняется из-за высоких рисков радиационного воздействия.

Наибольшие потери должны были быть вызваны прекращением экономической деятельности на всей территории эвакуации – порядка \$9 млрд. Еще порядка \$2 млрд могли быть отнесены на потери недвижимости жителей на покинутых территориях. Гипотетические потери от выбытия земель из оборота могли достигать в долгосрочной перспективе \$87 млрд.

Была предпринята попытка оценить затраты на дезактивацию части территории, используя подходы системы [133]. Оценки продемонстрировали высокую экономическую эффективность проведения дезактивации для зоны с ожидаемыми дозами порядка 20 мЗв/год, однако, эти ожидания не подтвердились на практике по результатам первых опытов дезактивации в 2014 году из-за недооценки реальных затрат на проведение и сопровождение составляющих ее процедур. Более детально основные результаты и выводы данного исследования были представлены в работах [26, 27, 31, 28, 24].

3.3 Информационная система оценки экономических последствий радиационной аварии на основе реляционной базы данных

В 2017 году, на основании более подробных данных по радиационной обстановке, демографической и экономической ситуации на территории Японии, появившихся в открытом доступе, автором было проведено второе исследование, для которого была разработана новая информационная система, использующая все достоинства реляционных баз данных. Его результаты публикуются в данной работе.

Данные изыскания проводились независимо от зарубежных исследователей, а используемая в расчетах исходная информация была собрана из открытых, преимущественно официальных, источников в Японии. Данные исследования примечательны использованием наиболее актуальных и детализированных данных, доступных на 2017 год, а также техническим подходом к их агрегированию и оперативной обработке, который может быть в будущем опробован для любых территорий, в том числе, в зонах размещения АЭС на территории России. Кроме того, полученные в результате оценки являются независимыми, и в них не использовались данные, подходы или промежуточные результаты, полученные из параллельно проводимых отечественных или зарубежных исследованиях по теме последствий аварии на данной АЭС. Наиболее близкие к ним по целям и методам разработки были описаны в 2017 году в зарубежных научных работах [83, 95], где описывалось моделирование и оценка социально-экономических последствий гипотетических радиационных аварий, однако публикации по аналогичным расчетам для реальных аварий, а также конкретно для района размещения аварийной АЭС «Фукусима-1» с 2011 года автором обнаружены не были.

Несмотря на то, что в период с 2011 до 2013 года разработанная информационная система позволила получить ряд оценок по численности населения в зонах эвакуации и оценки экономических затрат по отдельным крупным зонам, было очевидно, что со временем понадобится более высокая детализация самих исходных данных для расчетов, а сама система должна быть преобразована к новой форме. Так, уже в 2014 году возник ряд задач, которые не могли быть решены прежними способами с применением старой информационной системы, в первую очередь, из-за низкой пространственной детализации исходных данных по населению, радиационной обстановке и экономическим параметрам территории. В открытом доступе появились новые данные и по территории, и по динамике радиационной обстановки, которые требовали новых подходов к хранению и обработке, а также могли позволить значительно повысить точность и достоверность проводимых ранее расчетов.

Полученные ранее результаты требовали пересмотра по ряду следующих причин:

– уже после окончания 2011 года стало очевидно, что добровольная эвакуация в зоне от 20 до 30 км, фактически, перестала действовать и потеряла свою актуальность по радиационным критериям. Рассчитанные ранее результаты, включавшие затраты и по этой территории, также потеряли свою актуальность, а границы эвакуации и долгосрочного переселения должны были быть переопределены;

– к 2017 году окончательно были определены границы и сроки зон временной эвакуации и возвращения населения, а также границы зоны отселения. Эта информация требовала для них пересчета всех видов ущерба, а также открывала возможности для оценки коллективных доз, предотвращенных за счет проведения временной эвакуации;

– к 2014 году появились официальные данные о суммах пособий населению на время эвакуации и суммах разовых выплат по возвращению после эвакуации. К 2017 году стали понятны масштабы и стоимость дезактивации по эвакуированным территориям, что в совокупности позволяло приступить к расчетам экономической и радиологической эффективности дезактивации, а также включить реальные цифры по ее стоимости в общие затраты;

– уже к 2012 году на территории префектуры Фукусима была налажена система радиационного мониторинга, так что прежние данные по ожидаемым дозам облучения населения стали неактуальны и должны были быть пересчитаны на основании реальных измерений;

– сами подходы автора к расчету стоимости дезактивации, выплат компенсации населению, ущерба от долгосрочного отчуждения территорий требовали пересмотра после появления некоторых официальных цифр по выплатам;

– появилась возможность заменить векторные карты административных границ муниципалитетов, созданные автором в 2011 году, на официальные, более детальные и точные векторные карты, представленные на интернет-портале Министерства территорий, инфраструктуры, транспорта и туризма Японии [136].

Возможность проводить расчеты с более высокой точностью возникла в 2017 году, когда в открытом доступе появился большой объем детальных данных по территории Японии, а также по радиационной обстановке на ее территории после аварии 2011 года. Невысокая точность данных по населению в масштабах малых участков территорий, которая имела место в старой системе, не позволяла считать достоверными расчеты по отдельным зонам дезактивации с площадью в несколько десятков квадратных километров и менее.

Особенность обновленных данных 2017 года, в частности по населению, видам землепользования и некоторым показателям, заключалась в их доступности в виде векторных карт, представленных на ресурсе [136] в форме сетки со стандартной ячейкой, каждая из

которых имеет уникальный номер и атрибутивные данные по численности населения, характеру землепользования и ряду других показателей. В частности, для всей территории Японии доступна сетка с ячейкой площадью 1 га⁵ или 100×100 м с данными по типам землепользования на 2009 год и имеющая структуру (Таблица 3.1). Каждая ячейка имеет уникальный десятизначный идентификатор в пределах границ Японии.

Таблица 3.1 – Описание структуры данных по типам землепользования для территории Японии

Код землепользования	Общее название	Детальное пояснение
0100	рисовые поля	Поля сухих и мокрых рисовых посадок
0200	другие сельскохозяйственные земли	Пшеница, нагорный рис, овощи, фрукты, чай, листовые овощи и др.
0500	леса	Области диких многолетних растений
0600	пустыри	Пустынные земли, скалы, болота, горные земли и т.п.
0700	стройплощадки	Места размещения зданий в жилых сельских и городских районах
0901	дороги	Дороги с твердым покрытием
0902	железные дороги	Железные дороги и относящаяся к ним инфраструктура
1000	прочие земли	Стадионы, аэропорты, ипподромы, бейсбольные поля, школы, портовые районы и прочие зоны искусственно созданного открытого пространства
1100	реки и озера	Водоемы и реки, включая осушенное русло. Пруды, рыбные фермы и т. п.
1400	пляжи	Песчаные, гравийные и скальные участки, которые находятся в контакте с водой
1500	морская вода	Море и зоны приливов
1600	поля для гольфа	Все территории, относящиеся к гольфовым полям

Источник: на основе [136].

Данные по численности населения, домовладениям и гендерному составу также представлены на [136], но на сетках с разрешением 250 м и 500 м.

⁵ В действительности сетка имеет градусную размерность приблизительно в 0,05', что очень близко к 100 м. Средняя площадь такой ячейки для территории префектуры Фукусима была оценена в 10 250 м² и это было в дальнейшем учтено в расчетах. Для простоты в тексте автор принимает ее площадь равной 1 га. Другие сетки в тексте также описываются в метрической размерности для упрощения.

На этом перечень данных, доступных в виде детальной сетки с высоким разрешением, которые могут быть использованы именно для оценки дозовых нагрузок, а также расчета экономического ущерба и прочих компенсаций, фактически, исчерпывается.

Уточненные данные по административным границам, как было упомянуто выше, также доступны на [136] в виде площадных объектов, пригодных для обработки в ГИС.

В качестве данных по основным экономическим показателям и населению, как и в прежней информационной системе, использовались табличные данные из [140] по каждому из муниципалитетов префектуры. Благодаря данным о землепользовании появилась возможность не усреднять их значения по всей территории муниципалитета или территории, условно считающейся заселенной, а перераспределять среди ячеек, где располагаются жилые дома и предприятия, что значительно повышало достоверность расчетов.

По совокупности возникла необходимость и возможность создания реляционной базы данных по территории префектуры Фукусима, где информация по демографии, экономике, землепользованию, а также радиационной обстановке и дозовым нагрузкам привязывалась к ячейкам стандартной пространственной сетки 100×100 м. Помимо высокой детализации и возросшей достоверности результатов такого подхода, работа с базой данных без использования ГИС имеет ряд очевидных преимуществ:

- более высокая скорость работы всей системы;
- возможность производить любые преобразования и вычисления посредством SQL-запросов;
- возможность отказаться от работы с ГИС, которая требует более специфических навыков, чем реляционная база данных;
- низкая трудоемкость обмена информации с другими базами данных, в том числе и ГИС.

Использование ГИС в этом случае остается необходимым только для отображения результатов на карте, а также подготовки исходной информации для базы данных. Для подготовки данных, первичного их хранения и построения карт автором использовалась свободная географическая информационная система с открытым кодом QGIS версии 2.14.3-Essen [139].

Далее приводится порядок подготовки информации и формирования структуры реляционной базы данных по территории префектуры Фукусима, которая была разработана автором в 2017 году для решения задач оценки радиологических, экономических последствий аварии, а также оценки эффективности проведения защитных мероприятий.

В связи с тем, что наиболее детально (с наивысшим разрешением) нам известна информация по типам землепользования, именно на этой основе рационально формировать

основу всей базы данных, а остальные типы данных целесообразно привязать к сетке того же разрешения. Так, исходная таблица по землепользованию имеет следующую структуру:

- KEY_CODE: уникальный десятизначный код ячейки сетки (ключевое поле);
- LANDUSE_ID: код типа землепользования;
- SQUARE: площадь ячейки, м² (рассчитывается средствами ГИС).

Описание типов землепользования хранится в отдельной таблице:

- LANDUSE_ID: код типа землепользования;
- DESC: текстовое описание типа землепользования.

Данные по населению за 2010 год изначально представлены на более крупной сетке с разрешением 250 м и 500 м. При наложении на них сеток землепользования выяснилось, что даже на территориях, где не встречаются зоны застройки (код 0700), также числятся домовладения и жители. Таким образом переход от 500 м сетки к 100 м сетки был осуществлен по следующему алгоритму:

- если в границах ячейки 500 м сетки присутствовали ячейки с кодом 0700 (стройплощадки/зоны застройки), то число жителей и домовладений делилось поровну между этими ячейками. Ячейкам с другим кодом присваивалось значение «0»;
- если в границах ячейки 500 м сетки отсутствовали ячейки с кодом 0700, то число жителей и домовладений делилось поровну между попавшими в нее ячейками с кодом землепользования 0100, 0200, 0500, 0901, 0902 и 1000.

В результате была получена следующая связь территориальной сетки с разрешением 100 м с параметрами численности проживающего населения:

- KEY_CODE: уникальный код ячейки сетки;
- POP: число жителей;
- MEN: число мужчин;
- WOMEN: число женщин;
- HOUSEHOLDS: число домохозяйств (в японской терминологии имеет смысл числа семей или отдельных коммунальных счетов).

Построенная карта распределения населения по территории префектуры Фукусима приведена в приложении А на рисунке А.5.

Так как все экономические параметры изначально представлены по муниципалитетам префектуры Фукусима, то необходимо каждой ячейке сетки сопоставить код одного из 59 муниципалитетов, к которому она относится. Ввиду своей малости, ячейка получала код муниципалитета, если ее географический центр оказывался внутри административных границ муниципалитета. Краткая информация по муниципалитету имеет структуру:

- MUN_ID: уникальный код муниципалитета в рамках базы данных;
- LONGNAME: полное название;
- NAME_RU: название на русском языке;
- NAME_EN: название на английском языке.

На основании окончательно утвержденных планов эвакуации (в 2011 г), проведения дезактивации и отмены эвакуации на отдельных территориях (в 2017 г. [81]) были построены векторные карты зон эвакуации, зоны проведения дезактивации и отмены эвакуации в Особой зоне на территории префектуры Фукусима, а также зоны отчуждения, где возвращение не ожидается в ближайшие годы. Для разграничения территорий, на которых проводилась эвакуация, использовалась следующая схема:

- EVAC_ID: уникальный код зоны эвакуации в рамках базы данных;
- DESC: пояснение к коду. Три типа зоны (Рисунок А.1 приложения А):
 - 20 км зона обязательной эвакуации;
 - северо-западный след зоны обязательной эвакуации от 20 км;
 - зона необязательной эвакуации от 20 до 30 км.

Для зон дезактивации использовалась структура:

- DECONT_ID: Уникальный код зоны дезактивации. Ключевое поле.
- DESC: Пояснение к коду. Два типа зоны:
 - где была проведена дезактивация и отменена эвакуация;
 - где эвакуация не будет отменена долгое время (зона отселения).

Каждой из ячеек сетки был присвоен соответствующий код зоны эвакуации и зоны дезактивации, к которым они относятся. Для связи ячеек территориальной сетки с кодами землепользования, демографическими параметрами, признаками эвакуации или дезактивации была сформирована базовая таблица «Cell» (Таблица 3.2), несущая основную информацию, характеризующую каждый участок территории с детализацией 1 га:

Таблица 3.2 – Структура таблицы «Cell» связи кодов ячеек с кодами зон эвакуации и дезактивации зон дезактивации

Поле	Пояснение
KEY_CODE	Уникальный десятизначный код ячейки сетки. Ключевое поле.
LANDUSE_ID	код типа землепользования
POP	число жителей
MEN	число мужчин
WOMEN	число женщин
HOUSEHOLDS	число домохозяйств
MUN_ID	код муниципалитета
DECONT_ID	код зоны дезактивации
EVAC_ID	код зоны эвакуации

Данные по социальным и экономическим показателям были получены из обновляемого ресурса [140], где к 2017 году помимо данных за 2005-2010 годы появились отдельные данные и за послеаварийный период. Среди сотен параметров, характерных для отдельных муниципалитетов, для задач расчетов экономических и социальных показателей были выбран, на базе которого сформирована таблица 3.3 базы данных.

Не все необходимые данные имеются в доступе на нужный временной период, так что необходимо принять вынужденные допущения, что отдельные параметры в таблицах, такие как площадь строений или их количество не сильно отличаются от своих значений на момент аварии. Изначально в базе были собраны более сотни параметров, однако, не все они могли быть однозначно истолкованы из-за специфики учета статистики в Японии. Исключены были также параметры, учет которых сильно усложнял расчеты и которые не могли быть привязаны к пространственной сетке.

Таблица 3.3 – Таблица «Economics» экономических и социальных показателей для различных муниципалитетов префектуры Фукусима за разные годы

Поле	Пояснение	Связанная переменная
MUN_ID	Уникальный код муниципалитета для связи с таблицей «Municipality». Ключевое поле.	–
INCOME_2015	Совокупный доход за 2015 г., \$	–
INCOME_2007	Совокупный доход за 2007 г., \$	V_{inc}^{07}
TRADE_2013	Объем торговли за 2013 г., \$	–
TRADE_2006	Объем торговли за 2006 г., \$	–
MANUFACTURE_2014	Объем производства за 2014 г., \$	–
MANUFACTURE_2007	Объем производства за 2007 г., \$	V_{mf}^{07}
AGRIC_LAND_2015	Площадь с/х земель в 2015 г., га	–
AGRIC_LAND_2008	Площадь с/х земель в 2008 г., га	–
AGRIC_PROD_2006	Объем с/х производства за 2006 г., \$	V_{agr}^{06}
DWELLINGS_2013	Число строений в 2013 г., шт.	–
AREA_PER_DWELLING_2013	Средняя площадь строения в 2013 г., м ²	–
AREA_SETTLED_2015	Площадь заселенной территории в 2015 г., га	–
AREA_SETTLED_2008	Площадь заселенной территории в 2008 г., га	–
LAND_OF_BUILDINGS_2014	Площадь, занимаемая зданиями в 2014 г., м ²	S_{lob}^{14}
AVR_PRICE_RESIDENTAL_2009	Средняя цена метра жилой недвижимости в 2009 г., \$/м ²	P_{res}^{09}

Продолжение таблицы 3.3

Поле	Пояснение	Связанная переменная
AVR_PRICE_COMMERCIAL_2009	Средняя цена метра коммерческой недвижимости в 2009 г., \$/м ²	P_{comm}^{09}
AVR_PRICE_INDUSTRIAL_2005	Средняя цена метра промышленной недвижимости в 2005 г., \$/м ²	P_{ind}^{05}
RES_AREA_2013	Площадь жилых зданий в 2013 г., м ²	S_{res}^{13}
EXCL_RES_AREA_2013	Площадь особых жилых зданий в 2013 г., м ²	S_{exres}^{13}
EXCL_IND_AREA_2013	Площадь особых промышленных зон в 2013 г., м ²	S_{exind}^{13}
COMM_AREA_2013	Площадь коммерческих зданий в 2013 г., м ²	S_{comm}^{13}
NEIGHB_COMM_AREA_2013	Площадь зданий, соседствующих с коммерческими, в 2013 г., м ²	S_{ncomm}^{13}

В 2017 году появилась возможность использовать для оценки доз для населения реальные данные радиационного мониторинга, непрерывно поступающие и доступные для скачивания с портала [134] на любой момент времени, начиная приблизительно с мая 2011 года. С этого времени сетка постов мониторинга стала достаточно частой, чтобы с удовлетворительной детализацией покрывать всю зону значимого радиационного загрязнения в префектуре Фукусима. Также агрегированные данные по МЭД и загрязнению были получены с портала [125], где имелись значения МЭД достаточной детализации на с апреля 2011 года, когда сеть стационарных датчиков мониторинга еще не была развернута и данные поступали с передвижных постов мониторинга (самая ранняя по срокам картина радиационной обстановки была получена на 49 день после аварии – 29 апреля 2011 года). Остальные данные по МЭД на территории префектуры Фукусима были собраны с временной скважностью приблизительно в 3 месяца до 15 июня 2017 года (2288 день после аварии). Данные с постов мониторинга при скачивании усреднялись за сутки, чтобы избежать ошибки суточных колебаний естественного фона. Таким образом было получено всего 27 таблиц данных по МЭД, хранящих дату измерения, географические координаты поста и само значение МЭД.

Была поставлена задача перевести данные радиационного мониторинга из текущего вида к форме таблицы базы данных, где каждой ячейке будет сопоставлено значение МЭД на определенную дату – всего 27 дат. Так как среднее расстояние между соседними постами радиационного контроля больше, чем разрешение территориальной сетки, предварительно требовалось интерполировать показания постов на 100 м сетке для каждой из 27 дат, для чего средствами ГИС QGIS проводилась бикубическая сплайновая интерполяция. В результате этой операции каждой ячейке сетки был присвоен набор из 27 значений МЭД за период с 29 апреля 2011 года по 15 июня 2017 года.

В базе данных была создана соответствующая таблица 3.4 «MED» для хранения и обработки значений МЭД.

Таблица 3.4 – Таблица «MED» для хранения данных по радиационной обстановке и естественному фону в ячейках сетки

Поле	Пояснение
KEY_CODE	Уникальный код ячейки сетки. Ключевое поле.
BACKGROUND	Значение природного радиационного фона
MED_49	Значение МЭД на 49 день после аварии
MED_76	Значение МЭД на 76 день после аварии
...	...еще 23 записи на другие даты
MED_2196	Значение МЭД на 2196 день после аварии
MED_2288	Значение МЭД на 2288 день после аварии

Помимо измеряемых параметров МЭД необходимо было учитывать естественную природную составляющую радиационного фона, что особенно важно для районов, практически или вовсе не пострадавших от радиационного загрязнения. Для получения данных по радиационному фону в префектуре Фукусима до аварии была взята соответствующая растровая карта с официального интернет-ресурса Географического сообщества Японии [117], где представлены агрегированные данные за 1999-2004 годы. Данные по природному фону были переведены в ГИС, в результате чего для каждой ячейки территориальной сетки было получено значение МЭД на доаварийный период (Рисунок А.6 приложения А).

Для оценки значения МЭД на период после 15 июня 2017 года использовались выводы, полученные автором в работах [30, 32], свидетельствующие о том, что в префектуре Фукусима после 2017 года из естественных процессов на спад МЭД более всего будет влиять радиоактивный распад изотопа ^{137}Cs . Таким образом, значение МЭД на период после 2288 дня после аварии можно с высокой достоверностью оценить из выражения (3.1):

$$\dot{D}(t) = \left(\dot{D}(2288) - \dot{D}_{bg} \right) \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}} \cdot [t - 2288]\right) + \dot{D}_{bg}, \quad (3.1)$$

где $\dot{D}(2288)$ – измеренное значение МЭД на 2288 день после аварии (последнее полученное значение в базе), мкЗв/ч; \dot{D}_{bg} – природное значение МЭД для данной точки, мкЗв/ч; $T_{1/2}$ – период полураспада изотопа ^{137}Cs в сутках ($\approx 11\,018$ сут.).

Ввиду того, что достоверные данные по радиационной обстановке до 29 апреля 2011 года для всей территории префектуры отсутствуют, а также по тем причинам, что сама обстановка стабилизировалась только к апрелю, а эвакуационные мероприятия активно

проходили в этот период и установить дозы облучения населения в первый месяц можно было только приближенно, было решено в дальнейших задачах прогнозирования доз облучения населения принимать 29 апреля 2011 за точку отсчета, а дозы за последующие годы отсчитывать от момента стабилизации радиационного фона, а не от даты начала аварии.

На рисунках А.7-А.12 в приложении А представлены карты радиационной обстановки на территории префектуры Фукусима, построенные на основании результатов измерений МЭД на 49 день после аварии, через 1 и 3 года, а также результаты расчетов за 10, 25 и 75 последующих лет. Аналогично на рисунках А.13-А.17 приложения А представлены карты ожидаемой накопленной дозы внешнего облучения за 1, 5, 10, 25 и 75 лет.

Основная цель сбора данных по динамике МЭД в каждой ячейке территориальной сетки – последующий расчет доз облучения за произвольный период времени для людей, которые могли проживать на этих территориях. Так как связь МЭД и дозы описывается выражением (1.1), то накопленная доза $D(t)$ за период от 49-го дня (от начала аварии) до момента t может быть рассчитана из значений МЭД по методу трапеций через выражение (3.2):

$$D(t) = \begin{cases} K \cdot \left[\sum_{i=2}^{j-1} \left[\left(\frac{\dot{D}_i + \dot{D}_{i-1} - 2\dot{D}_{bg}}{2} \right) \cdot (t_i - t_{i-1}) \right] + (t - t_{j-1}) \cdot \left(\frac{\dot{D}_j + \dot{D}_{j-1} - 2\dot{D}_{bg}}{2} \right) \right] & \text{при } t \leq t_{27} \text{ и } t < t_j, \\ K \cdot \left[D(t_{27}) - \left[\dot{D}(t_{27}) - \dot{D}_{bg} \right] \cdot T_{1/2} \cdot \exp\left(-\frac{\ln 2}{T_{1/2}}\right) / \ln 2 \right] & \text{при } t > t_{27} \end{cases}, \quad (3.2)$$

где K – безразмерный фактор экранирования внешнего излучения⁶; t_i – моменты времени (в сутках), на которые получены значения МЭД ($i=1..27$), где t_{27} соответствует 15 июня 2017 года или 2288 дней после аварии; $T_{1/2}$ – период полураспада изотопа ^{137}Cs (30,16 лет или 11 018 сут.); $D(t_{27})$ – индивидуальная доза за период с 49 по 2288 сутки после аварии, мкЗв; $\dot{D}(t_{27})$ – МЭД на 2288 сутки после аварии, мкЗв/ч.

В выражении (3.2) уже учтен естественный природный фон, так что полученное значение $D(t)$ является дозой, полученной только за счет аварийного облучения от техногенных радионуклидов. Данный подход позволяет оперативно рассчитывать индивидуальные дозы техногенного облучения за заданный период для любой территории. В частности, такие расчеты нужны для оценки предотвращенных коллективных доз облучения в зонах эвакуации и особенно в зонах ее последующей отмены. Соответствующие расчеты помещаются в дополнительные временные таблицы базы данных.

⁶ Для Японии может быть принят равным 0,73 на основании [81]

На рисунке 3.2 представлена схема базы данных по территории префектуры Фукусима, созданной в ходе данной работы в системе MS Access для задач оценки радиологических, социальных и экономических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1». Все результаты, рассматриваемые далее в главе 4, были получены с применением этой базы данных. Данный подход к построению информационной системы на основе реляционной базы данных показал себя более практичным для случаев, когда имеется большой объем информации для обработки, а детализация слишком высока, чтобы производить расчеты средствами ГИС. Таблица «Doses» является вспомогательной и пополняется по мере проведения расчетов доз на сетке на заданные периоды времени.

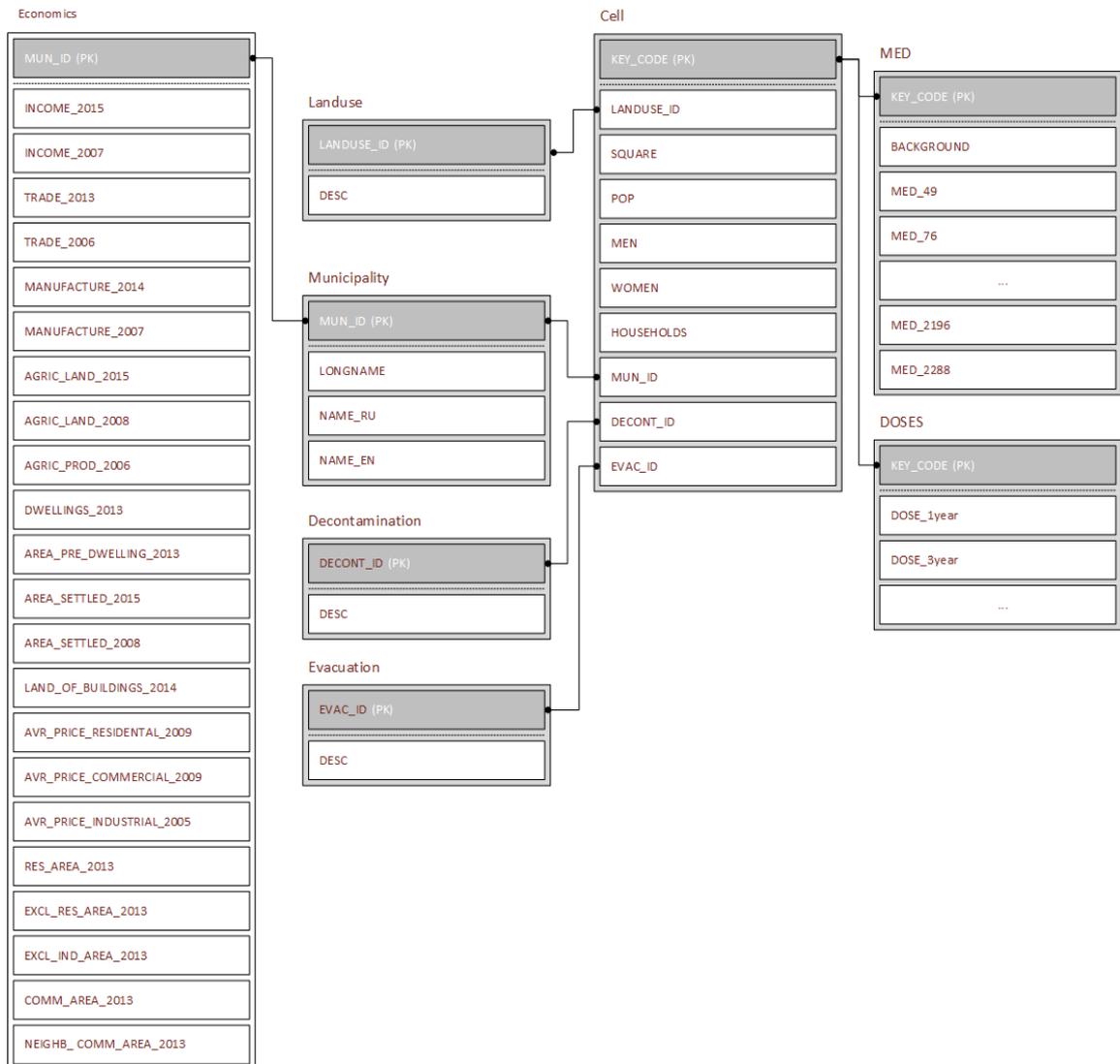


Рисунок 3.2 – Общая структура реляционной базы данных по территории префектуры Фукусима

3.4 Выбор методов оценки экономического ущерба при реализации мер поставарийного вмешательства

В соответствии с предпринимаемыми мерами по защите населения в зоне радиационного загрязнения среди основных статей ущерба, которые можно оценить на основании доступных данных статистики по исследуемой территории, были выделены:

- для временной эвакуации:
 - временная потеря доходов;
 - потери товарного производства;
 - потери сельскохозяйственного производства;
 - расходы на компенсации временного проживания эвакуированных и прочие, связанные с этим компенсации;
- для отселения также актуальны безвозвратные потери недвижимого имущества граждан и экономических агентов;
- для проведения дезактивации на фоне эвакуации учитывается стоимость ее проведения, которая известна из официальных источников и в данном случае не рассчитывается дополнительно.

Для оценки данных расходов предполагается с помощью созданной информационной системы суммировать ущербы и затраты по всем ячейкам, попавшим, соответственно, в зону эвакуации (с возвратом после дезактивации) и в зону долгосрочного отселения. Соответствующие затраты могут быть рассчитаны не только для действующих официальных зон, но и для гипотетических, которые могли бы быть приняты в случае применения более мягких радиационных критериев, что позволяет оценить экономический и социальный эффект от различных сценариев вмешательства.

Как было указано ранее, многие экономические показатели, касающиеся доходов, производства и объемов недвижимости изначально нам известны по отдельным муниципалитетам в целом. Для проведения расчетов эти данные необходимо перераспределить внутри территории каждого муниципалитета в соответствии с типом землепользования для каждой ячейки территориальной сетки. Данная операция выполняется с помощью собственных инструментов базы данных без применения ГИС.

Один из немаловажных параметров, необходимых для оценки ущерба от долгосрочного отселения жителей – это стоимость утраченной недвижимости, куда должна входить вся возможная недвижимость: частная жилая, промышленная, коммерческая и муниципальная, также незастроенные земли, находящиеся в собственности. При отсутствии однозначно

тракуемых правил оценки ее стоимости и стоимости земли в Японии, целесообразно было рассмотреть несколько методов расчета совокупной стоимости всей земли и недвижимости в каждой ячейке. Было принято предположение, что недвижимость может находиться только в ячейках, для которых код землепользования соответствует застроенным территориям. Стоимость недвижимости для каждой ячейки, где имеется застройка, в рамках одного муниципалитета полагается одинаковой. Суммарная стоимость недвижимости в выделенной зоне рассчитывается, как сумма стоимости всех ее ячеек. Для оценки стоимости P_{est}^{cell} всей недвижимости в ячейке для конкретного муниципалитета использовались два подхода (3.3) и (3.4):

$$P_{est-I}^{cell} = \frac{P_{res}^{09} \cdot (S_{res}^{13} + S_{exres}^{13}) + P_{comm}^{09} \cdot (S_{comm}^{13} + S_{ncomm}^{13}) + P_{ind}^{05} \cdot (S_{exind}^{13})}{C_{mun}^{0700}}; \quad (3.3)$$

$$P_{est-II}^{cell} = \frac{P_{res}^{09} \cdot S_{lob}^{14}}{C_{mun}^{0700}}, \quad (3.4)$$

где C_{mun}^{0700} – число ячеек с кодом землепользования 0700 в муниципалитете.

Первый подход опирался на предположение, что в каждой ячейке виды различной недвижимости распределены по площади в той же пропорции, что и по территории муниципалитета. Второй подход опирался на величину S_{lob}^{14} суммарной площади строений по муниципалитету и применял к ней цену жилой недвижимости. Сравнение результатов расчета P_{est}^{cell} по различным зонам продемонстрировало, что первый способ дает более высокие значения – в 1,5-3 раза выше – для относительно больших территорий, и в 0,5-7 раз – для малых. Первый подход (3.3) был выбран для дальнейших расчетов как более консервативный.

Для оценки потерь в сельском хозяйстве за счет эвакуации и отселения из районов, где производится данная продукция, необходимо оценить приближенную ежегодную стоимость производимого продукта P_{agr}^{cell} для каждой ячейки. Так как полагалось, что продукция выращивается только на специально отведенных землях – ячейках с соответствующими типами землепользования, а годовой объем сельскохозяйственного производства известен в целом для каждого муниципалитета, то искомая стоимость P_{agr}^{cell} рассчитывается из выражения (3.5):

$$P_{agr}^{cell} = \frac{V_{agr}^{06}}{C_{mun}^{0100} + C_{mun}^{0200}}, \quad (3.5)$$

где C_{mun}^{0100} – число ячеек в муниципалитете, в которых тип землепользования определен как «рисовые поля»; C_{mun}^{0200} – число ячеек в муниципалитете, в которых тип землепользования определен как «сельскохозяйственные культуры».

Совокупный годовой доход V_{inc}^{07} , который известен в целом на муниципалитет, необходимо распределить по ячейкам его территории. Рационально полагать, что доход можно распределять поровну между жителями и присваивать только тем ячейкам, где проживают люди, отсюда потеря ежегодного дохода за счет эвакуации или отселения в пересчете на одну ячейку V_{inc}^{cell} рассчитывается как (3.6):

$$V_{inc}^{cell} = \frac{V_{inc}^{07}}{N_{mun}} \cdot n_{cell}, \quad (3.6)$$

где N_{mun} – число жителей муниципалитета; n_{cell} – число жителей для данной ячейки.

Падение производства V_{mf}^{cell} на эвакуированных и отселенных территориях также целесообразно оценивать для каждой ячейки пропорционально числу проживающих на ее территории жителей по формуле (3.7):

$$V_{mf}^{cell} = \frac{V_{mf}^{07}}{N_{mun}} \cdot n_{cell}. \quad (3.7)$$

В результате проведенной операции была создана вспомогательная таблица базы данных следующей структуры:

- MUN_ID: уникальный идентификатор муниципалитета в базе данных;
- VAL_ESTATE: стоимость всей недвижимости для любой ячейки на территории данного муниципалитета, чей тип землепользования соответствует «застройке/стройплощадке» (код 0700);
- VAL_INCOME: совокупный доход муниципалитета в пересчете на одного его жителя (в любой ячейке где число жителей ненулевое);
- VAL_MANUF: стоимость произведенных в год товаров на одного жителя данного муниципалитета (в любой ячейке где число жителей ненулевое);
- VAL_AGRIC: стоимость произведенной в год сельскохозяйственной продукции на одну ячейку на территории данного муниципалитета, чей тип землепользования соответствует любому типу земледелия (коды 0100 и 0200).

Таким образом, суммирование по всем ячейкам на выбранной по какому-либо признаку территории, позволяет оценить и численность населения, и совокупный доход, и объемы производства по отдельным сферам.

Так как одной из основных задач данной работы является рассмотрение вопроса эффективности предпринимаемых мер по защите населения, то необходимо здесь рассмотреть также и подходы к расчетам коллективных доз облучения населения на рассматриваемых территориях. Как было показано ранее, индивидуальные дозы могут быть рассчитаны для каждой ячейки за необходимый период времени и сохранены в отдельной таблице базы данных. Коллективная доза на выбранной территории оценивается простым перемножением числа жителей на их индивидуальные дозы и суммированием результата по всем ячейкам.

Коллективную дозу, предотвращенную за счет временной эвакуации, проведенной в Особой зоне дезактивации префектуре Фукусима, необходимо оценивать независимо по разным ее участкам, так как отмена эвакуации и возвращение населения на них проводилась в разные сроки в период с 2014 по 2017 год (более точно даты приводятся в [81]). В данном случае индивидуальные, а далее и коллективные предотвращенные дозы жителей для отдельных территорий, рассчитываются по-отдельности для этих участков в соответствии со сроками, на которые жители были из них эвакуированы. Полученная таким образом величина суммарной коллективной дозы, предотвращенной по всем территориям, на которых был отменена эвакуация, может являться наиболее точной из оценок, которые можно получить на сегодняшний день на основании открыто публикуемых данных.

3.5 Анализ эффективности стратегии вмешательства при ликвидации радиационной аварии на АЭС «Фукусима-1»

Оценки радиационных последствий загрязнения территории префектуры Фукусима

Анализ экономических последствий реализации мер по защите населения и реабилитации загрязненных территорий вследствие аварии на АЭС «Фукусима-1» предполагал решение следующих задач:

- оценку целесообразности и эффективности эвакуации населения в границах, определенных в 2011 г.;
- оценку целесообразности и эффективности дезактивации части загрязненных территорий в период до 2017 г.;
- оценку целесообразности временной эвакуации до момента завершения дезактивации на некоторых территориях;
- исследование возможности оптимизации зон эвакуации жителей с учетом соблюдения норм обеспечения их радиационной безопасности.

Для их решения был выполнен ряд расчетов выгод и издержек, обусловленных реализацией государственной стратегии вмешательства на территории префектуры Фукусима в период 2011-2017 гг. с использованием разработанной информационной системы.

В первую очередь были оценены ожидаемые индивидуальные и коллективные дозы облучения жителей префектуры Фукусима для обоснования экономических выгод от их эвакуации и отселения. Расчеты проводились для зон обязательной и добровольной эвакуации, официально установленных в 2011 г. (зоны «А» и «Б» на рисунке 3.3), для зоны возвращения населения из эвакуации в период 2014-2017 гг. (зона «В» на рисунке 3.3) и зоны долгосрочного отселения без планируемого возвращения, установившейся на конец 2017 г. (зона «Г» на рисунке 3.3).

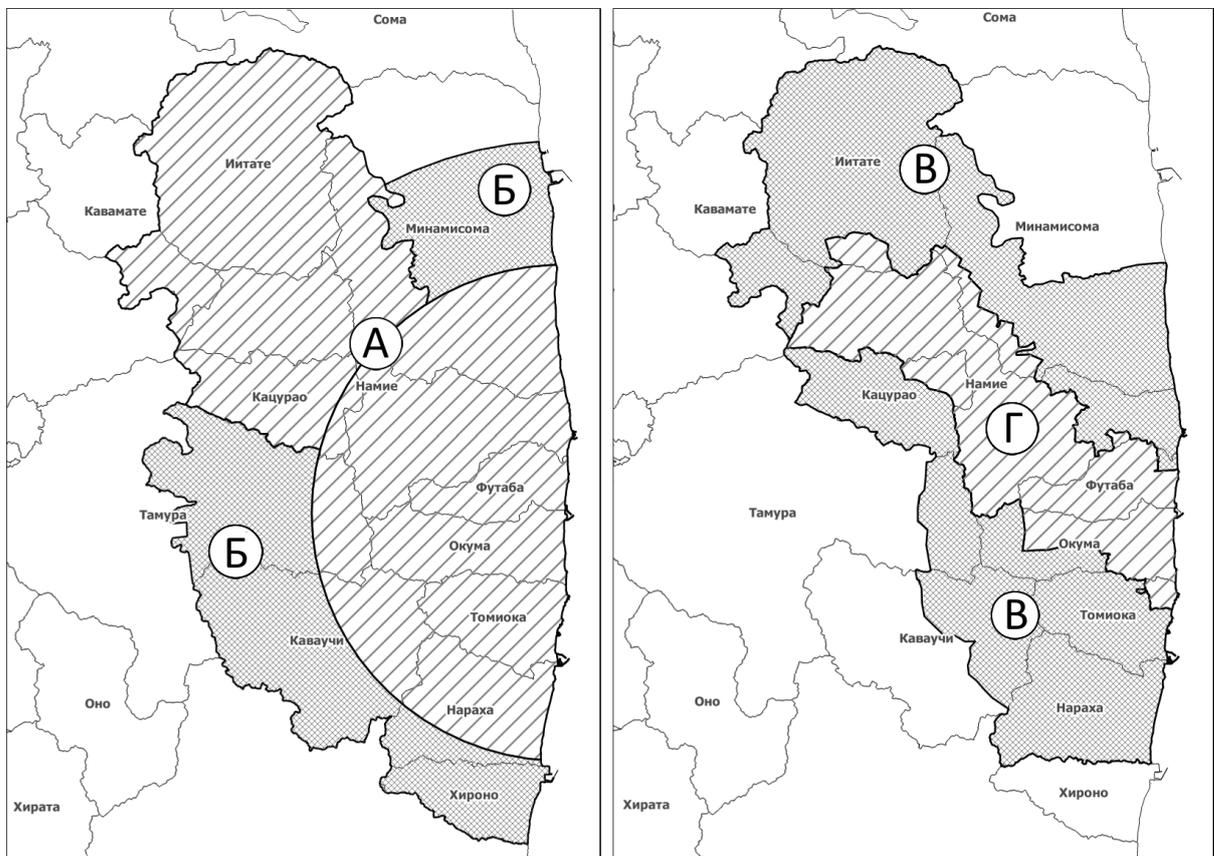


Рисунок 3.3 – Зоны проведения защитных мероприятий. «А» – зона обязательной эвакуации 2011 г.; «Б» – зона добровольной эвакуации 2011 г.; «В» – зона возвращения населения в 2014-2017 гг.; «Г» – зона долгосрочного отселения на момент 2017 г.

Источник: на основе [129, 134].

Расчеты доз проводились на основе реальных и прогнозируемых данных по радиационной обстановке с учетом фактора экранирования внешнего излучения $K=0,4$

(описание к формуле (1.1)). Данное значение рекомендовано документом ДВ-98 [12] для учета облучения населения от загрязненной почвы при нахождении в населенных пунктах.

Полученные оценки коллективных доз облучения в зонах «А» и «Б» в динамике приставлены на рисунке 3.4. Они демонстрируют, что в долгосрочной перспективе (за 75-летний период) длительная эвакуация в границах 2011 г. могла бы снизить дозы облучения населения на 13,5 тыс. чел.-Зв, что, в зависимости от выбора модели оценки (модель НРБ-99/2009 или NUREG 1530 Rev.1), приблизительно может соответствовать предотвращенному прямому ущербу от облучения \$0,5-7,7 млрд.

В этих расчетах, учитывались дозы за период со 2-го по 75-й год от внешнего облучения (Рисунок 3.4) и дозы за первый год с момента эвакуации, полученные в исследовании [31], оцениваемые в 4,5 тыс. чел.-Зв, где дополнительно учитывалось ингаляционное поступление радионуклидов в период активной фазы аварии.

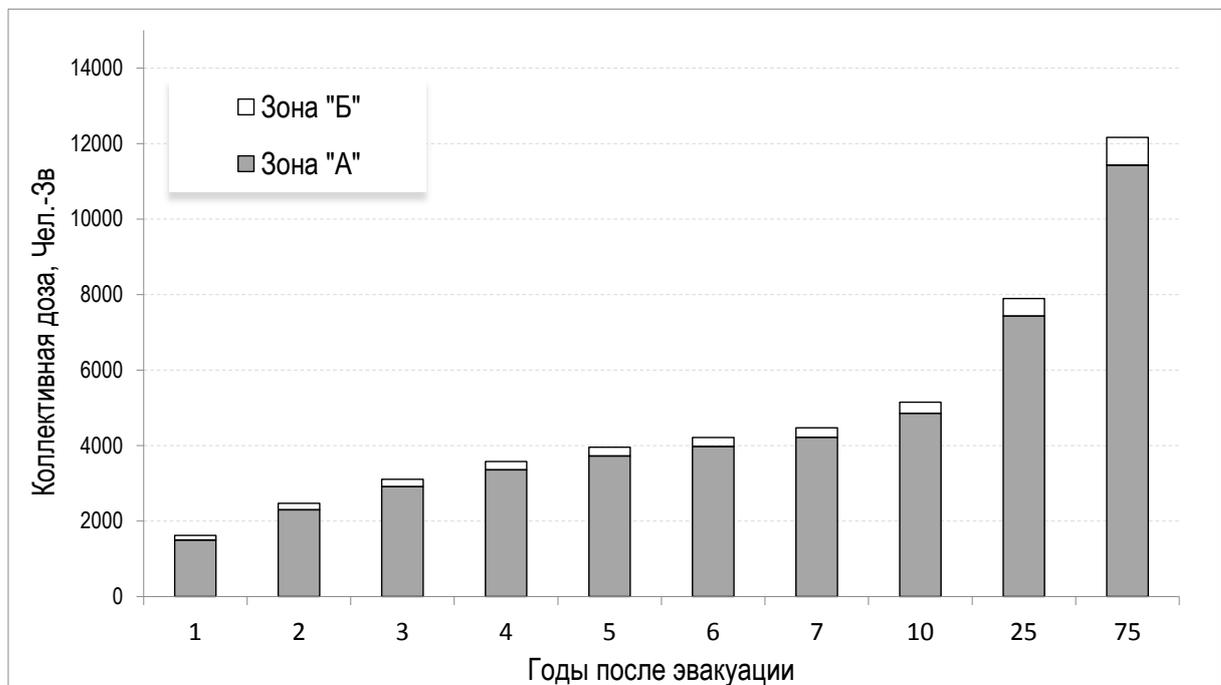


Рисунок 3.4 – Оценка прогнозируемой коллективной дозы облучения населения для зон эвакуации, объявленных в 2011 году: «А» – зона обязательной эвакуации, «Б» – зона добровольной эвакуации

Эти значения определяют максимальный ущерб для здоровья населения от радиационных последствий загрязнения зон «А» и «Б» префектуры Фукусима в отсутствие вмешательства. За первые 10 лет коллективные дозы для данной группы людей, численность которых оценивается в 145 тыс. чел., могли составить порядка 5 тыс. чел.-Зв или, в среднем, порядка 35 мЗв/чел. Для сравнения, после аварии на ЧАЭС коллективная доза для

неэвакуированных жителей на загрязненных территориях за первые 10 лет оценивалась в 42 тыс. чел.-Зв [62, 63, 64].

Оценки ожидаемых коллективных доз облучения жителей для зон «В» и «Г» в динамике представлены на рисунке 3.5. Можно отметить, что, хотя в зоне проведенной дезактивации «В» численность проживавшего до аварии населения была почти втрое выше, чем на долгосрочно отселяемых территориях в зоне «Г», ожидаемая коллективная доза облучения для нее оказалась ниже. Это наглядно демонстрирует, что планы по дезактивации территорий и возврату населения были реализованы в наименее загрязненных районах и при этом достаточно эффективно была решена задача снизить число долгосрочно отселяемых жителей.

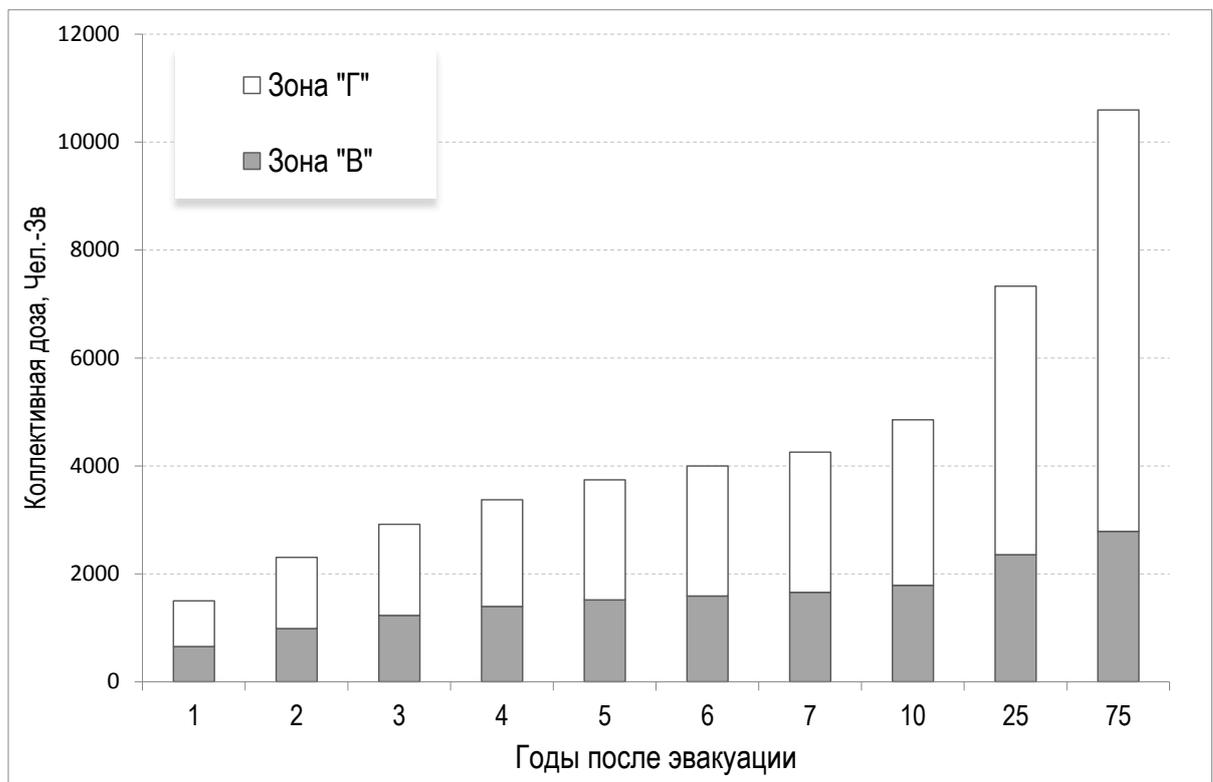


Рисунок 3.5 – Оценка прогнозируемой коллективной дозы облучения населения для зон эвакуации, объявленных в 2011 году: «В» – зона возвращения жителей в 2014-2017 гг., «Г» – зона долгосрочного отселения

На рисунке 3.6 представлено распределение числа жителей зоны «В» по предотвращенной индивидуальной дозе облучения за весь период действия режима временной эвакуации с учетом различных дат ее отмены в разных муниципалитетах. Данное распределение демонстрирует, что предотвращаемые за счет временной эвакуации индивидуальные дозы здесь не должны были превысить 50 мЗв. Таким образом, столь длительная эвакуация не привела к значимому снижению радиационных рисков, и, в соответствии с рекомендациями документа МКРЗ 103, ее продление в зоне «В» до 2014-2017 гг.

не было достаточно обоснованно. Отказ от длительной эвакуации в зоне «В» не мог бы привести к негативным клинически выявляемым эффектам для здоровья населения. В то же время, полученные результаты не позволяют судить о необходимости краткосрочной (до месяца) эвакуации на данной территории в активный период развития аварии, так как отсутствуют достоверные данные по радиационной обстановке за этот период. Предотвращенная за счет временной эвакуации в зоне «В» коллективная доза облучения от загрязнения почвы была оценена в 1,53 тыс. чел.-Зв, что эквивалентно предотвращению ущерба от облучения \$58-880 млн.

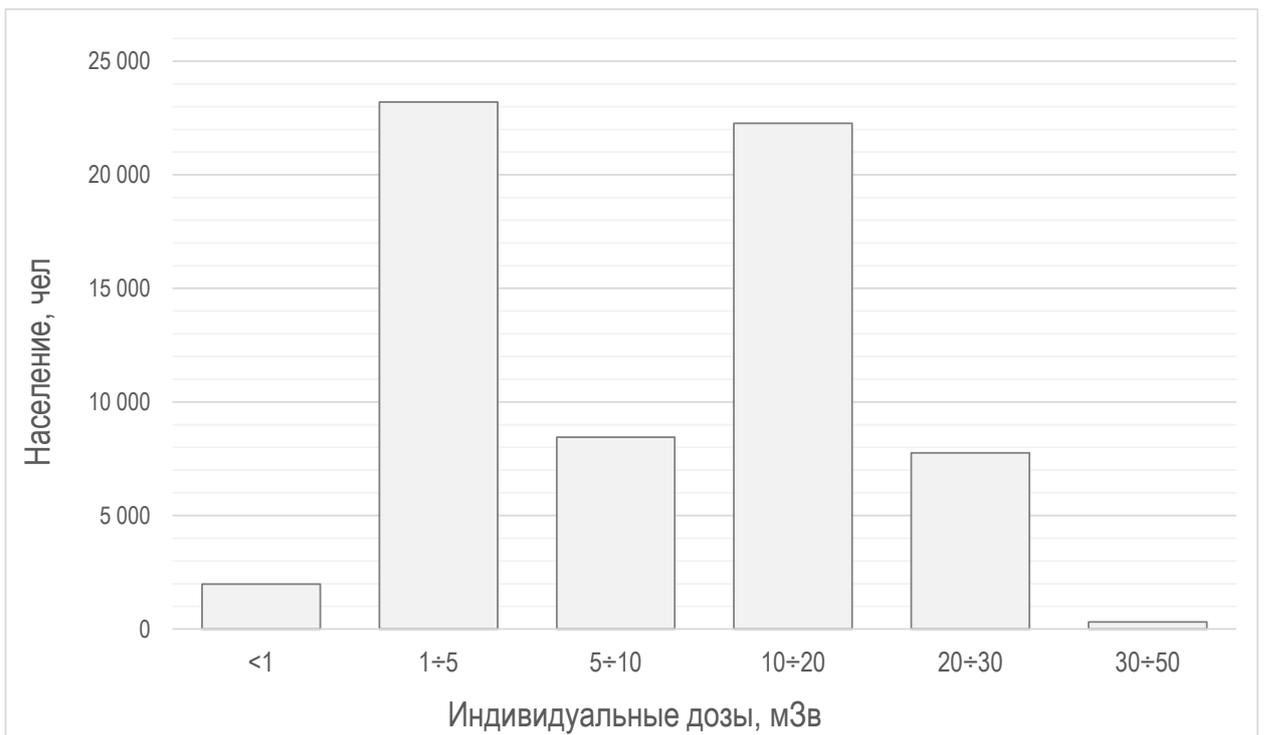


Рисунок 3.6 – Распределение числа жителей в зоне «В» по величине предотвращенной индивидуальной дозы гамма облучения за все время их пребывания в эвакуации

Дозы, предотвращаемые за счет дезактивации в зоне «В» оцениваются как очень незначительные (менее 300 чел.-Зв в долгосрочной перспективе, оцененные на основании результатов дезактивации по муниципалитету Тамура [32]), в связи с чем ее положительный экономический эффект пренебрежимо мал в сравнении со стоимостью ее проведения.

На основании оценённых данных по дозам также можно сделать вывод, что из потенциально возможных 13,5 тыс. чел.-Зв облучения в долгосрочной перспективе по всей территории префектуры, порядка 6,3 тыс. чел.-Зв были предотвращены за счет проведенной эвакуации в зонах «В» и «Г» к 2017 г., а еще 6,0 тыс. чел.-Зв будет предотвращено в зоне «Г» при бессрочном продлении отселения в ней (оценивается до 2086 г.). Таким образом,

предпринятые меры в значительной степени нейтрализуют радиационные риски на территории префектуры Фукусима.

Оценки экономических последствий поставарийного вмешательства в префектуре Фукусима

В первые годы после аварии в префектуре Фукусима наблюдался общий экономический спад, который выражался в снижении доходов муниципалитетов, объемов промышленного и сельскохозяйственного производства, по сравнению с доаварийными показателями (Рисунки А.3-А.4 приложения А), масштабы которого приводились в разделе 1.1. Он во многом был обусловлен вторичными эффектами аварии – ограничением экспорта из радиационно загрязненных и прилегающих к ним районов, а также приостановкой работы других АЭС в Японии, что отразилось на доходах и расходах населения многих префектур.

Для оценки экономического эффекта от проведения эвакуационных мероприятий в префектуре Фукусима были первоначально рассчитаны основные характеристики зон проведения защитных мероприятий, установленных в 2011 и 2017 годах (Таблицы. 3.5-3.8, обозначения в соответствии с рисунком 3.3) [25].

Таблица 3.5 – Оценка основных параметров территории в зонах эвакуации

Зона	Население, чел	Домохозяйства	Площадь, км ²		
			Полная	Сельскохозяйственные земли	Застроенные земли
«А»	86 591	28 963	1 126,07	206,07	41,61
«Б»	58 664	20 460	475,00	89,61	22,80
В сумме	145 255	49 424	1 601,07	295,68	64,41

Таблица 3.6 – Оценка экономических параметров для зон эвакуации

Зона	Доходы, млн долл. США/год	Товарное производство, млн долл. США/год	Производство агропродукции, млн долл. США/год	Стоимость недвижимости, млн. долл. США
«А»	6 906,4	1 357,1	101,8	3 244,2
«Б»	4 098,0	1 191,1	26,4	1 693,0
В сумме	11 004,3	2 548,2	128,2	4 937,2

Таблица 3.7 – Оценка основных параметров территории в зонах отселения и проведения дезактивации

Зона	Население, чел	Домохозяйства	Площадь, км ²		
			Полная	Сельскохозяйственные земли	Застроенные земли
«В»	63 967	21 365	829,81	155,97	29,31
«Г»	22 807	7 651	332,70	51,12	12,68
В сумме	86 774	29 016	1162,51	207,08	41,99

Таблица 3.8 – Оценка экономических параметров для зон отселения и проведения дезактивации

Зона	Доходы, млн долл. США/год	Товарное производство, млн долл. США/год	Производство агрпродукции, млн долл. США/год	Стоимость недвижимости, млн. долл. США	Регулярные пособия на время эвакуации, млн. долл. США /год	Единовременные пособия при возвращении, млн. долл. США
«В»	4 675,3	960,7	72,4	2 329,7	752,3	153,8
«Г»	2 251,3	399,5	30,9	914,5	268,2	55,1
В сумме	6 926,6	1 360,2	103,3	3 244,2	1 020,5	208,9

На базе этих данных были получены оценки совокупных экономических издержек, связанных с проведением эвакуации в префектуре Фукусима, в частности:

- потери доходов муниципалитетов по зонам «В» и «Г»;
- компенсационные выплаты эвакуированным жителям зон «В» и «Г»;
- потери стоимости всего недвижимого имущества по зоне «Г».

Оценки совокупных издержек и выгод, полученные на основании характеристик территорий и оценок доз на население, представлены в таблице 3.9.

К прямым затратам, обусловленным реализацией стратегии по защите населения, были отнесены официальные суммы, направленные на дезактивацию территорий в зоне «В», а также регулярные и единовременные пособия эвакуированным жителям. Для оценки суммы выплат населению использовалось предположение, что в зоне «Г» жители получали компенсации только в течение первого года, до момента окончательного отселения. Эти выплаты были оценены в сумму около \$270 млн. Жители зоны «В» получали регулярные пособия все время пребывания в эвакуации, с учетом различных сроков ее длительности в разных муниципалитетах, и единовременные пособия по возвращению из эвакуации.

К основным прямым ущербам для государства были отнесены потери доходов на всех эвакуированных территориях из-за приостановки на них экономической деятельности и потери стоимости недвижимости для зоны отселения (Таблица 3.8). Несмотря на то, что можно оценить суммы потерь доходов за год на основании данных статистики за предаварийные годы, нельзя достоверно установить, потери за какой период могут быть обоснованно отнесены к ущербу экономики префектуры или государства. Формально, суммы недополученных доходов для зоны отселения «Г» за 6 лет с момента аварии достигли \$13,5 млрд (или \$41,5 млрд для зон «В» и «Г»), но в каком объеме и за какой период они были напрямую компенсированы, не удалось установить на основании имеющейся в открытом доступе информации.

Таблица 3.9 – Оценки издержек и выгод при реализации мероприятий на территории префектуры Фукусима

Источник издержек или выгод	Сумма
Максимальный потенциальный ущерб для здоровья населения от аварии в долгосрочной перспективе (75-летний период)	\$0,5-7,7 млрд (13,5 тыс. чел.-3в)
Недополученный доход в зонах «В» и «Г» за 2011-2017 гг.	\$41,5 млрд
Компенсации на время действия эвакуации и единовременные пособия при возвращении по зоне «В»	\$4,4 млрд
Потери стоимости недвижимости в зоне «Г»	\$0,91 млрд
Затраты на проведение дезактивации в зоне «В»	\$12 млрд
Суммарные затраты и ущербы по префектуре Фукусима из-за эвакуации и дезактивации к 2017 г.	\$58,8 млрд
Выгоды от эвакуации и временного отселения в зонах «В» и «Г» до 2017 г.	\$0,23-3,5 млрд (6,0 тыс. чел.-3в)
Выгода от временного отселения в зоне «В» за период с 2011 г. по 2014-2017 гг.	\$58-880 млн (1,53 тыс. чел.-3в)
Долгосрочные выгоды от проведения дезактивации в зоне «В»	<\$11-170 млн (<300 чел.-3в)
Максимальная совокупная выгода от проведения эвакуации и дезактивации территорий в префектуре Фукусима	\$3,7 млрд

Выгодой от реализации мер поставарийного вмешательства в префектуре Фукусима следует считать экономический эквивалент дозы коллективного облучения населения, которая была фактически предотвращена за счет временной эвакуации и дезактивации в зоне «В» и отселения в зоне «Г». Принимается, что добровольная эвакуация в зоне «Б» была несистемной и, ввиду низких уровней загрязнения ее территории, не могла привести к значимым положительным эффектам для здоровья населения.

При оценке положительного экономического эффекта от эвакуации совокупно в зонах «В» и «Г» до середины 2017 г. учитывались также оценки доз за первый год после аварии из исследования [31]. Аналогичный пересчет не производился отдельно для зоны «В», но предполагается, что, ввиду ее удаленности от АЭС, вклад ингаляционного поступления радионуклидов в облучение населения здесь мог быть менее значительным, чем для зоны «Г».

Итоговое сравнение совокупных издержек с полученными выгодами от реализации сценария вмешательства в префектуре Фукусима (Таблица 3.9) демонстрирует, что издержки более чем в 15 раз превышают наиболее оптимистичные оценки выгод. Это подтверждает наше замечание, что вмешательство при радиационных авариях в густонаселенных и экономически развитых районах, с экономической точки зрения, как правило влечет за собой больший ущерб, чем предотвращаемые им радиологические последствия.

Полученные оценки экономического эффекта от вмешательства, на данный момент не могут быть точно сопоставлены с объемами реально выплаченных средств, так как до сих пор

неизвестны их конкретные источники, статьи и получатели. Однако, они могут послужить для обоснования таких выплат и сопоставления с другими расходами, связанными с аварией. В частности, совокупные прямые затраты государства на снижение воздействия радиационного фактора на население, с учетом официальной стоимости дезактивации в зоне «В» (\$12 млрд) и за ее пределами (\$12 млрд) могут быть оценены в \$70,2 млрд. Это приблизительно соответствует официальным суммам, которые компания ТЕРСО получила к первому кварталу 2018 года от государства для выплаты компенсаций, связанных с радиационным ущербом.

Динамика расходов и потерь государства, связанных с реабилитацией территории и защитой населения в префектуре Фукусима, приближенно рассчитана по годам и отображена на рисунке 3.7.

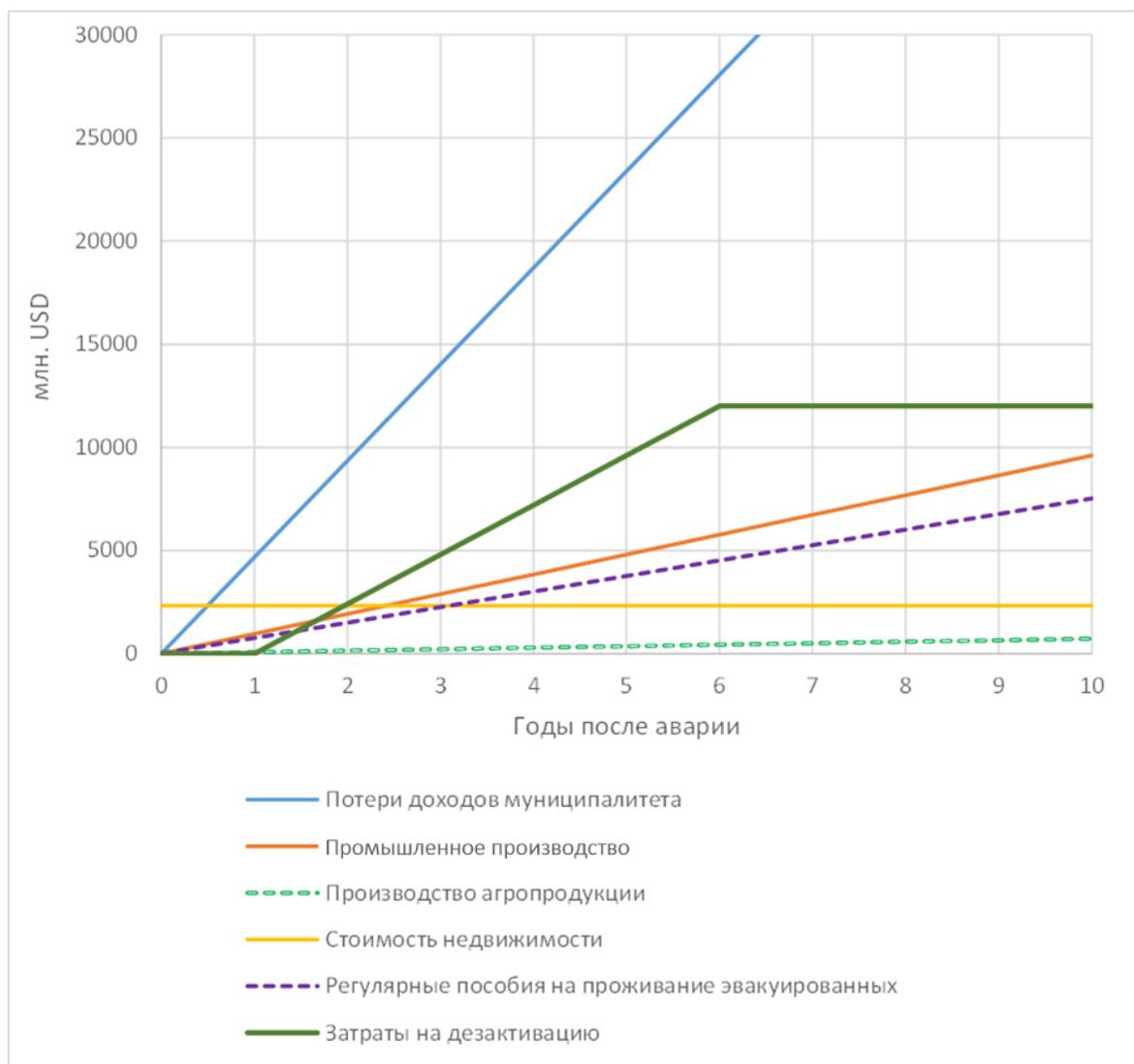


Рисунок 3.7 – Сравнительная динамика ущерба по различным статьям издержек для зоны проведения дезактивации

Из них следует, что затраты на дезактивацию сопоставимы с экономическими потерями, вызванными эвакуацией, и значительно превышают возможные прямые выгоды от снижения облучения жителей. В связи с этим ее проведение может быть оправдано только как мера по улучшению условий проживания населения, направленная на его возвращение, приостановку миграции и выплаты регулярных компенсаций, сумма которых в среднесрочной перспективе могла превысить стоимость проведения дезактивации. Как отмечалось ранее, такие опосредованные и отложенные во времени экономические эффекты вмешательства в перспективе также необходимо учитывать в балансе выгод и издержек и выработать для этого соответствующую методологию.

Оценка эффективности и оптимизация стратегии вмешательства

В целях выработки рекомендаций по снижению издержек при реализации стратегий защиты населения в префектуре Фукусима, в исследовании были также рассмотрены альтернативные гипотетические варианты проведения эвакуации на ее территории в границах, определяемых на основе значений ожидаемых индивидуальных доз облучения жителей за первый год после аварии. Были установлены границы зон для значений годовой дозы от 20 до 80 мЗв (при которых, в соответствии с рекомендациями МКРЗ 103, эвакуация не является обязательной мерой), рассчитаны их экономические параметры и оценены средние и максимальные индивидуальные дозы облучения жителей в долгосрочном периоде. Полученные результаты для них были сопоставлены с аналогичными характеристиками для зоны обязательной эвакуации в границах 2011 года (зона А на рисунке 3.3) и приведены в таблице 3.10.

Необходимо отметить, что официальная эвакуация 2011 года формально проводилась по границе с ожидаемой дозой 20 мЗв за последующий год, которая оценивалась японской стороной на основе параметров радиационного фона с учетом фактора экранирования излучения, принимаемого равным 0,73. В таблице 3.10 для определения границ зон были использовались расчетные значения годовой дозы с учетом более консервативного и рекомендованного российскими нормативными документами значения фактора экранирования 0,4. В связи с этим такая расчетная 20 мЗв зона будет значительно меньше официальной зоны эвакуации. В то же время, такой подход наглядно демонстрирует возможность сузить границы зон вмешательства в полном соответствии с нормативными рекомендациями.

На основании полученных оценок было обосновано, что проведение эвакуации в границах зоны с ожидаемой годовой дозой в 20 мЗв позволило бы эвакуировать на 68% меньше жителей, сократить потери доходов на 65% и объемы утрачиваемой недвижимости на 66% в сравнении с фактической зоной эвакуации в границах 2011 г. Эвакуация в границах до 50 мЗв за первый год, также допустимая в рамках рекомендуемых МКРЗ 103 уровней, позволила бы

снизить численность эвакуированных и экономические потери до 6% от фактических. Максимальная пожизненная (за последующие 75 лет) доза для неэвакуированных жителей в этом случае не превысила бы 730 мЗв (при средней 150 мЗв), что, хотя и требует вмешательства, но допустимо при столь длительном периоде наблюдения и, в общем, сравнимо с повседневными уровнями медицинского и техногенного облучения в индустриально развитых странах. Смягчение критериев эвакуации с 20 до 50 мЗв почти в 6 раз позволит снизить потери от проведения эвакуации, при этом, не будут нарушены основные требования норм радиационной безопасности относительно критериев неотложного проведения эвакуации. В то же время указанные дозы не будут соответствовать требованию обеспечения достаточно низкого техногенного облучения населения в повседневной деятельности. Данный эффект может быть сглажен за счет введения персональных компенсаций, которые должны быть невелики по сравнению с экономическими потерями, сопутствующими долгосрочной эвакуации или отселению. Такие компенсации могут применяться, чтобы сохранить привлекательность территории для проживания. Однако, опыт аварии на ЧАЭС демонстрирует, что вводимые для населения льготы и компенсации может быть сложно отменить в будущем, когда их изначальная причина уже будет устранена, но сами выплаты и финансовые вливания со стороны государства уже прочно закрепятся в экономической системе.

Таблица 3.10 – Социально-экономические параметры зон префектуры Фукусима, выделенных по расчетному уровню индивидуальной дозы внешнего гамма-облучения за 1-й год эвакуации

Доза за 1-й год, мЗв	Площади, км ²	Население, чел	Домохозяйства	Доход, млн долл. США/год	Товарное производство, млн долл. США/год	Стоимость недвижимости, млн долл. США/год	Макс. инд. доза для неэвакуированных за 75 лет, мЗв	Средн. инд. доза для неэвакуированных за 75 лет, мЗв
Зона обязательной эвакуации 2011 г.	1 126	86 591	28 963	6 906,4	1 357,1	3 244,2	140	–
>20	84,2	27 857	9 594	2 432,6	442,2	1 097,1	291	88
>30	55,7	14 424	4 941	1 408,2	280,5	521,8	437	110
>40	34,7	7 426	2 463	703,6	151,7	286,4	583	131
>50	22,2	4 376	1 358	402,1	87,7	186,2	728	151
>70	7,8	1109	323	90,3	20,3	59,6	1 020	184
>80	5,1	475	142	33,2	9,0	22,5	1 165	195

По результатам исследования был сделан вывод, что первичная эвакуация населения, проведенная в период активной фазы аварии, могла быть оправдана как мера предотвращения облучения населения в условиях недостатка информации о ходе ее протекания и с учетом небольших сопутствующих затрат. В то же время, на основании полученных экономических оценок, следует считать в целом экономически неэффективной реализацию долгосрочных мероприятий по защите населения и реабилитации территорий в префектуре Фукусима, так как из-за неоптимального планирования зон эвакуации и несвоевременного возвращения из нее населения, выгоды от их проведения оцениваются значительно ниже сопутствующих ущербов и совокупных затрат на их проведение. Причиной чрезмерных экономических потерь при реализации стратегии по защите населения в префектуре Фукусима следует считать недостаточный учет социальных и экономических эффектов при оценке баланса издержек и выгод, сопутствующих реализации высокзатратных мер вмешательства. При этом, на ранних стадиях выработки решений существовала возможность значительно оптимизировать затраты и сократить совокупные финансовые издержки, связанные с ликвидацией угрозы радиационного воздействия на населения за счет оптимизации зон эвакуации.

Основные выводы по главе 3:

- предложена структура организации данных для информационной системы анализа радиационной и социально-экономической ситуации и поддержки при выработке решений по вмешательству при радиационном загрязнении территории и подходы к их хранению и обработке на основе применения геоинформационных технологий и реляционных баз данных;
- разработана информационная система для анализа последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» на основе реляционной базы данных, наполненной актуальной информацией по экономике, населению, радиационной обстановке, а также административному делению и зонам проведения эвакуации, отселения и дезактивации в границах территории префектуры Фукусима;
- с помощью разработанной информационной системы были получены численные оценки радиационных последствий загрязнения территории, потенциальных радиационных рисков для населения, а также экономических ущербов, затрат и выгод при реализации мер поставарийного вмешательства; дана оценка эффективности реализованным мероприятиям по защите населения и дезактивации территории;
- проанализирована зависимость совокупного ущерба от величины дозового критерия принятия решения по эвакуации для территории префектуры Фукусима; предложены меры по оптимизации стратегии эвакуации и снижения сопутствующих ущербов за счет ее проведения в границах, определенных по более мягкому критерию (50 мЗв/год), допустимому в

рамках действующих международных рекомендаций МКРЗ по обеспечению радиационной безопасности в ситуациях аварийного облучения населения.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе, на основе анализа опыта ликвидации последствий крупных радиационных аварий на объектах атомной энергетики в 1950-2011 гг., предложены методологические подходы и методы для обоснования экономически эффективных стратегий реализации мероприятий по защите населения и реабилитации радиационно загрязненных территорий, базирующиеся на сопоставлении сопутствующим вмешательству экономических выгод и издержек.

Предложенные подходы и методы апробированы на реальных статистических данных по крупной радиационной аварии. Получены численные оценки социальных и экономических последствий реализации стратегии вмешательства для пострадавшей территории и предложены рекомендации по повышению эффективности планирования защитных и реабилитационных мероприятий.

Основные итоги выполненной работы заключаются в следующем:

В работе проанализированы состав и содержание мероприятий, предпринимаемых для защиты населения и реабилитации загрязненных территорий при ликвидации последствий крупных радиационных аварий в период 1950-2011 гг. На основе этого анализа и собственных оценок радиационных и экономических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» в исследовании обосновывается вывод о низкой экономической эффективности реализованных стратегий по обеспечению безопасности населения и реабилитации пострадавших территорий, которая выражается в чрезмерных затратах на проведение защитных и реабилитационных мероприятий в сравнении с экономическими выгодами от конечного снижения уровней облучения населения.

Проведено структурирование основных мер по защите населения и реабилитации загрязненных территорий в соответствии со стоимостью, стадией и дозиметрическими критериями их применения на основании действующих отечественных и международных рекомендаций в сфере радиационной безопасности. Установлены неопределенности при трактовке критериев и выборе масштабов реализации наиболее высокзатратных мер по отселению жителей, введению экономических ограничений и дезактивации территорий, которые могут применяться и при дозах облучения, не опасных для населения, что может повлечь за собой необоснованные финансовые затраты. Автором обосновывается подход к оценке экономических последствий радиационных аварий, при котором основное внимание в структуре ущербов при реализации мер по защите населения и реабилитации загрязненных территорий уделяется результатам принятия неоптимальных и неэффективных решений по их

проведению. Это особенно актуально для территорий с относительно невысокими уровнями загрязнения, где ожидаемые дозовые нагрузки на население составляют до 100 мЗв/год. Для их снижения предлагается разработать методологические подходы по выработке стратегий поставарийного вмешательства, базирующиеся на сопоставлении ожидаемых издержек и выгод с учетом действующих нормативов в сфере обеспечения радиационной безопасности.

В качестве направления развития систем поддержки принятия решений, а также теории и методологии проблемы экономической оценки эффективности и прогнозирования затрат по защите населения и реабилитации территорий при их аварийном радиационном загрязнении, автором предлагается:

- развитие подходов к выработке эффективных стратегий по защите населения и реабилитации радиационно загрязненных территорий на основе анализа баланса сопутствующих экономических издержек и выгод;
- развитие методологических подходов к оценке экономических последствий аварийного радиационного загрязнения территорий на основе прогнозирования и оценки эффектов коллективного облучения населения (а также его предотвращения).
- разработка и применение специализированных информационных систем для оценки последствий загрязнения территории и информационной поддержки принятия решений по мерам поставарийного вмешательства.

В исследовании предложены теоретические подходы к выработке эффективных стратегий вмешательства на основе анализа баланса сопутствующих издержек и выгод, а также критерии эффективности сценариев поставарийного вмешательства при радиационных авариях по параметрам мощности дозы излучения на момент принятия решения о вмешательстве, остаточной годовой дозы после вмешательства и предотвращаемой дозы облучения за счет его реализации. Критерии предложены для стратегий проведения дезактивации с отселением и без отселения, а также только для отселения. Решена задача оптимизации вмешательства при максимизации выгод и минимизации издержек при дезактивации с отселением и без него по параметру остаточной годовой дозы облучения. В работе обосновывается, что для задач оптимизации издержек при вмешательстве может использоваться критерий, базирующийся на разности выгод и издержек, тогда как критерий, основанный на их соотношении, является несостоятельным и может давать неадекватные результаты.

Апробирование предложенных критериев на реальных примерах выявило ряд ограничений к их применению на практике, обусловленных упрощенным подходом к выработке анализа баланса издержек и выгод, а также неучетом при этом ряда значимых социально-экономических факторов. Автором были обоснованы следующие рекомендации по усовершенствованию процедуры выработки стратегии вмешательства: необходимость

учитывать в балансе издержек и выгод компенсации населению за ухудшение условий проживания в результате загрязнения или вмешательства; учитывать возможные нерадиационные риски для здоровья, вызванные вмешательством; рассматривать принятие решений по вмешательству как итерационный процесс, на каждом этапе которого для оценки эффективности производится попарное сравнение альтернативных сценариев, где невмешательство нужно рассматривать также как меру, имеющую свой экономический эффект. Предложены выражения для оценки экономического эффекта для случаев, когда в качестве альтернативы невмешательству рассматривается эвакуация и отселение, а альтернативой дезактивации с реабилитацией территории и возвращением населения из эвакуации служит долгосрочное отселение. Обоснован выбор расчетных моделей на базе документов НРБ 99/2009 и NUREG 1530 Rev.1 для получения средней и верхней оценок финансового эквивалента ущерба здоровью при облучении с учетом экономических особенностей территории и доступности информации по составу населения.

В исследовании разработан метод оценки эффективности дезактивации загрязненных территорий за счет учета изменения радиационной обстановки в условиях внешнего воздействия и под влиянием естественных процессов радиационного распада и заглубления радиоизотопов в почве, актуальный для условий масштабной и длительной дезактивации. Метод позволяет также оценить экономическую выгоду и рентабельность проведения дезактивации, опираясь на предположение, что выгода определяется из произведения величины предотвращаемой дозы коллективного облучения населения на нормативно установленный стоимостный эквивалент единицы дозы. Метод апробирован при анализе мероприятий дезактивации в муниципалитете Тамура (пр. Фукусима, Япония) в 2012-2014 гг., в результате чего была оценена реальная эффективность предпринятых мер и продемонстрирована их чрезмерная стоимость в сравнении с достигнутыми эффектами по снижению доз облучения населения.

Разработана схема организации информационной системы с использованием геоинформационных технологий и реляционных баз данных, повышающей достоверность исходных данных при анализе социально-экономических и радиационных последствий загрязнения территорий при радиационных авариях и позволяющая повысить обоснованность принимаемых решений по защите населения реабилитации территорий. На ее основе разработана информационная система на актуальных данных по радиационной обстановке, демографии, землепользованию и экономике префектуры Фукусима для анализа последствий ее радиационного загрязнения и реализации стратегии поставарийного вмешательства в результате аварии на АЭС «Фукусима-1» в 2011 г.

Автором получены детальные оценки ожидаемых доз облучения населения, экономических потерь, ущербов и выгод, связанных с радиационным загрязнением территории префектуры Фукусима и последующей реализацией, мер поставарийного вмешательства по двум зонам эвакуации, установленным в 2011 г, по зонам поведения дезактивации с возвращением населения и зоне постоянного отселения, определенным к 2017 г. На их основе получены оценки: максимальных ожидаемых в долгосрочной перспективе совокупных экономических потерь от коллективного облучения населения в префектуре Фукусима (в отсутствии вмешательства) – до \$7,7 млрд; совокупных затрат и потерь от эвакуации и отселения к 2017 г – \$58,8 млрд; максимальных выгод от реализации мер вмешательства – \$3,7 млрд. Продемонстрировано, что решения по эвакуации и отселению части территорий в префектуре Фукусима позволяют в долгосрочной перспективе на 91% снизить возможный ущерб от облучения населения, что позволяет считать предпринятые меры эффективными с точки зрения обеспечения безопасности населения. В то же время, обоснована низкая экономическая эффективность реализованной стратегии вмешательства, так как, из-за неоптимального планирования зон эвакуации и несвоевременного возвращения из нее населения, совокупные экономические издержки к 2017 г. почти в 16 раз превысили максимальные оценки выгод от снижения уровней облучения населения к этому времени. Причиной чрезмерных экономических потерь при осуществлении стратегии по защите населения в префектуре Фукусима следует считать недостаточный учет социальных и экономических эффектов при оценке баланса издержек и выгод, сопутствующих реализации высокочрезмерных мер вмешательства, и недостаток отработанных методов и инструментов информационной поддержки для проведения соответствующего анализа.

Предложена стратегия оптимизации издержек вследствие эвакуации и отселения жителей за счет выбора зоны проведения этих мер по критерию ожидаемой индивидуальной дозы облучения за первый год после аварии. Оптимизация по дозе 20 мЗв позволила бы сократить экономический ущерб на 65% от фактического при соблюдении рекомендаций МКРЗ 103 по принятию решений о вмешательстве, и на 94% – при оптимизации по критерию 50 мЗв, также ограниченно допустимого по МКРЗ 103 без критического увеличения радиационного риска для населения.

Предлагаемые в исследовании решения могут использоваться постоянно действующими и координационными органами системы РСЧС, АО «Концерном «Росэнергоатом» и оказывающими им техническую и информационную поддержку научно-исследовательскими организациями:

– при экономическом обосновании мер защиты населения и реабилитации территории на этапе планирования стратегии вмешательства в целях повышения его эффективности и

снижения необоснованных социальных и экономических потерь при ликвидации последствий радиационных аварий;

– для оценки последствий радиационных рисков и экономического ущерба в результате аварийного загрязнения территорий при экономическом и экологическом обосновании строительства либо вывода из эксплуатации объектов атомной энергетики в районах ведения активной экономической деятельности.

Предполагаются следующие дальнейшие пути развития темы данного исследования:

– полученные в работе результаты могут быть использованы для выработки подходов к зонированию территорий вокруг объектов использования атомной энергии, в соответствии с Общими требованиями безопасности МАГАТЭ, для целей экономически эффективного планирования мероприятий по защите населения при крупных радиационных авариях на основе статистического анализа данных по населению и экономике территорий, с применением автоматизированных информационных систем;

– полученные результаты по информационному обеспечению выработки стратегий вмешательства, методы оценки ущербов от облучения и затрат на реализацию мер вмешательства могут быть использованы при разработке методов оценки радиационных рисков и экономических последствий для систем прогнозирования радиационной обстановки при аварийных выбросах на объектах атомной энергетики.

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ И УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

АО	–	Акционерное общество
АЭС	–	Атомная электростанция
б/р	–	Безразмерная величина
ВВП	–	Валовой внутренний продукт
ВНД	–	Валовой национальный доход
ВНП	–	Валовой национальный продукт
ВОЗ	–	Всемирная организация здравоохранения
ВУРС	–	Восточно-уральский радиоактивный след
ГИС	–	Геоинформационная система
ЖРО	–	Жидкие радиоактивные отходы
ИБРАЭ РАН	–	Институт проблем безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук
ИНЕС	–	международная шкала ядерных событий (INES – International Nuclear Event Scale)
МАГАТЭ	–	Международное агентство по атомной энергии
МКРЗ	–	Международная комиссия по радиационной защите
МНПК	–	Международная научно-практическая конференция
МНТК	–	Международная научно-техническая конференция
МЧС	–	Министерство Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий
МЭД	–	Мощность эквивалентной дозы (гамма-излучения)
НИР	–	Научно-исследовательская работа
НКДАР ООН	–	Научный комитет ООН (Организации объединенных наций) по действию атомной радиации
ПО	–	Производственное объединение
РАО	–	Радиоактивные отходы
РГНФ	–	Российский гуманитарный научный фонд
РСЧС	–	Российская единая система предупреждения и ликвидации чрезвычайных ситуаций

РЦЖ	–	Рак щитовидной железы
СанПиН	–	Санитарно-эпидемиологические правила и нормативы
СМИ	–	Средства массовой информации
СУБД	–	Система управления базами данных
СХК	–	Сибирский химкомбинат
США	–	Соединенные Штаты Америки
ФАНО	–	Федеральное агентство научных организаций
ФГБОУ ВПО	–	Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования
ХЛБ	–	Хроническая лучевая болезнь
ЧАЭС	–	Чернобыльская атомная электростанция (Украина)
ЧС	–	Чрезвычайная ситуация
\$	–	Доллар США (денежная единица)
¥	–	Японская йена (денежная единица)
£	–	Фунт стерлингов Великобритании (денежная единица)
LLE	–	Lost Life Expectancy – ожидаемое снижение продолжительности жизни
МEXT	–	Министерство образования, культуры, спорта, науки и технологий Японии
MS	–	Microsoft Corporation
NRC	–	Комиссия по ядерному регулированию (США)
NUREG	–	Нормативный документ Комиссии по ядерному регулированию США (US Nuclear Regulatory Commission Regulation)
PSA	–	Вероятностные модели оценки безопасности (Probabilistic safety assessments)
SNL	–	Сандийские национальные лаборатории (Sandia National Laboratories, США)
TEPCO	–	Токийская энергетическая компания (Tokyo Electric Power Company, Incorporated)
UNSCEAR	–	НКДАР ООН (The United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation)

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. О социальной защите граждан, пострадавших вследствие Чернобыльской катастрофы : закон СССР от 12.05.1991 N 2146-1 [Электронный документ]. Библиотека нормативно-правовых актов СССР. – URL: http://www.libussr.ru/doc_ussr/usr_18729.htm (дата обращения: 28.09.2019).
2. О социальной защите граждан, подвергшихся воздействию радиации вследствие катастрофы на Чернобыльской АЭС : закон Российской Федерации № 1244-1 от 15 мая 1991 года // Ведомости Съезда народных депутатов Российской Федерации и Верховного Совета Российской Федерации. – 1991. – 23 мая. – N 21. – Ст. 699.
3. О защите населения и территорий от чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера : федеральный закон от 21 декабря 1994 г. N 68-ФЗ : принят Государственной Думой 11 ноября 1994 года // Российская газета. – 1994. – 24 декабря. – N 250.
4. О радиационной безопасности населения : федеральный закон от 9 января 1996 г. N 3-ФЗ : принят Государственной Думой 5 декабря 1995 года // Российская газета. – 1996. – 7 января. – N 9.
5. Об использовании атомной энергии : федеральный закон от 21 ноября 1995 г. N 170-ФЗ : принят Государственной Думой 20 октября 1995 года // Российская газета. – 1995. – 28 ноября. – N 230.
6. Постановление Совета Министров СССР № 1167-511сс от 11.06.1954 г. // Архив ПО «Маяк». Ф. 1. Оп. 19. Ед. 2.
7. Постановление Совета Министров СССР № 2186-1030сс от 21.10.1954 г. // Архив ПО «Маяк», Ф.1. Оп. 19. Ед. 3.
8. Постановление Совета Министров СССР № 299-145сс от 20.03.1957 г. // Архив ПО «Маяк». Ф.1. Оп. 28. Ед. 1.
9. Постановление Правительства Российской Федерации от 13.05.1996 № 577 «О федеральной целевой программе «Социальная и радиационная реабилитация населения и территорий Уральского региона, пострадавших вследствие деятельности производственного объединения «Маяк», на период до 2000 года» // Российская газета. – 1996. – 25 мая.
10. Нормы радиационной безопасности (НРБ – 99). Санитарные правила и нормативы СанПиН 2.6.1.2523-09. Ионизирующее излучение, радиационная безопасность. – М.: Минздрав России, 1999. – 72 с.
11. РД 03-496-42. Методические рекомендации по оценке ущерба от аварий на опасных производственных объектах : утв. постановлением Госгортехнадзора России от

29.10.02 N 63. – М. : Государственное унитарное предприятие «Научно-технический центр по безопасности в промышленности Госгортехнадзора России», 2002. – 33 с.

12. ДВ-98. Руководство по установлению допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферу. – Москва : Госкомэкология России, Минатом России, 1999. – Т. 1, 2. – 329 с.

13. МУ 2.6.1.30–04 Организация и проведение радиационно-дозиметрического контроля при ликвидации последствий радиационной аварии. – М. : Федеральное управление «Медбиоэкстрем», 2004. – 66 с.

14. МР 2.6.1.27–2003. Зона наблюдения радиационного объекта. Организация и проведение радиационного контроля окружающей среды. – М. : МинАтом России, МинЗдрав России, 2003. – 67. с. [Электронный документ] – URL: <https://files.stroyinf.ru/Data1/54/54898> (дата обращения: 28.09.19).

15. СП 2.6.1.2612-10 (ОСПОРБ-99/2010) Основные санитарные правила обеспечения радиационной безопасности. – М.: Федеральный центр гигиены и эпидемиологии Роспотребнадзора, 2010. – 83 с.

16. ИНЕС. Руководство для пользователей международной шкалы ядерных и радиологических событий. Издание 2008 года. – Вена: МАГАТЭ, 2010. – 250 с. [Электронный ресурс]. – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/INES-2008-R_web.pdf – заглавие экрана. (дата обращения: 15.05.2018).

17. Международная комиссия по радиологической защите, Рекомендации 2007 года Международной комиссии по радиационной защите, Публикация 103 МКРЗ, пер. с англ., Москва : изд-во ООО ПКФ «Алана», 2009. – 344 с.

18. 25 лет чернобыльской аварии. Итоги и перспективы преодоления ее последствий в России. 1986-2011 / Под ред. Шойгу С. К., Большова Л. А. – М. : МЧС России, 2011. – 81 с.

19. Аветисов, Г. М., Алексахин Р. М., Гасилина Н. К. и др. Сообщение №4. Состояние агропромышленного комплекса. Санитарно-гигиенические и противоэпидемические мероприятия при чрезвычайных ситуациях. Защита населения и реабилитация территорий, пострадавших от аварии на Чернобыльской АЭС. Характеристика ситуации и стратегия дальнейших контрмер / Г. М. Аветисов, Р. М. Алексахин, Н. К. Гасилина // Медицина катастроф. – 1997. – № 2 (18). – С. 16-22.

20. Аклеев, А. В., Голощапов П. В., Деггева М. О. и др. Радиоактивное загрязнение окружающей среды в регионе Южного Урала и его влияние на здоровье населения / А. В. Аклеев, П. В. Голощапов, М. О. Деггева и др. – М. : ЦНИИ Атоминформ, 1991. – 63 с.

21. Акт комиссии МСМ от 25.11.57 о расследовании аварии на объекте 25 // Архив ПО «Маяк». Ф. 1. Оп. 30. Сд. 75.
22. Алексахин, Р. М., Булдаков Л. А. и др. Крупные радиационные аварии: последствия и защитные меры. / Р. М. Алексахин, Л. А. Булдаков – М.: ИздАТ, 2001. – 752 с.
23. Антропова, З. Г., Белова Е. И., Дибобес И. К. и др. Итоги изучения и опыт ликвидации последствий аварийного загрязнения территории продуктами деления урана / З. Г. Антропова, Е. И. Белова, И. К. Дибобес и др.; Под ред. А. И. Бурназяна; М-во здравоохранения СССР. – М. : Энергоатомиздат, 1990. – 143 с.
24. Арон, Д. В. Анализ последствий эвакуации населения при аварии на АЭС «Фукусима-1» / Д. В. Арон // Экономика природопользования. – 2015. – № 3. – С. 122-131.
25. Арон, Д. В. Оценки экономических последствий и эффективности временной эвакуации населения в префектуре Фукусима. / Д. В. Арон // Радиация и Риск. – Москва. – 2019. – Т. 28. – № 3. – С. 24-35.
26. Арон, Д. В., Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Панченко С. В., Токарчук Д. Н. Анализ радиологических и социально-экономических последствий аварии на АЭС в префектуре Фукусима./ Д. В. Арон, Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов и др. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций. – 2012. – № 3. – С. 97-108.
27. Арон, Д. В., Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Панченко С. В., Токарчук Д. Н. Анализ влияния радиационных критериев эвакуации населения на социально-экономические последствия аварии на АЭС в префектуре Фукусима (Япония) / Д. В. Арон, Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов и др. // Атомная энергия. – 2012. – Т. 112. – № 3. – С. 163-168.
28. Арон, Д. В., Арутюнян Р. В., Большов Л. А., Панченко С. В., Токарчук Д. Н. Анализ зависимости возможных социально-экономических последствий аварии на АЭС «Фукусима-1» от критериев вмешательства / Д. В. Арон, Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов и др. // Авария на АЭС «Фукусима-1» : Опыт реагирования и уроки : труды ИБРАЭ РАН. – Москва : Наука, 2013. – Вып. 13. – С. 138-153.
29. Арон, Д. В., Дьяков С. В., Зарянов А. В. Подходы к стоимостной оценке ущерба здоровью населения при анализе последствий радиационных аварий / Д. В. Арон, С. В. Дьяков, А. В. Зарянов // М. : Радиация и Риск. – 2019. – Т. 28. – № 2. – С. 75-86
30. Арон, Д. В., Методы анализа эффективности дезактивации территории префектуры Фукусима (Япония) / Д. В. Арон // Статистика и экономика. – 2017. – Т. 14. – № 3. – С. 114-124.
31. Арон, Д. В., Павлова М. В., Панченко С. В. Оценки масштаба социально-экономических последствий аварии на АЭС в префектуре Фукусима. / Д. В. Арон, М. В.

Павлова, С. В. Панченко // Известия Российской академии наук. Энергетика. – 2013. – № 5. – С. 65-71.

32. Арон, Д. В., Тихомиров Н. П., Цуглевич В. Н. Анализ эффективности дезактивации территории в префектуре Фукусима на примере муниципалитета Тамура / Д. В. Арон, Н. П. Тихомиров, В. Н. Цуглевич // Экономика природопользования. – 2015. – № 3. – С. 113-121.

33. Арутюнян, Р. В., Большов Л. А., Линге И. И., Мелихова Е. М., Панченко С. В. Уроки Чернобыля и Фукусимы: актуальные проблемы совершенствования системы защиты населения и территорий при авариях на АЭС / Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов, И. И. Линге и др. // Медицинская радиология и радиационная безопасность. – 2016. – Т. 61. – № 3. – С. 36-51.

34. Арутюнян, Р. В., Данилян В. А., Высоцкий В. В. и др. Анализ и оценка радиоэкологических последствий ядерной аварии в бухте Чажма : Препринт №ИВРАЭ-98-09 / Р. В. Арутюнян, В. А. Данилян, В. В. Высоцкий и др. – М. : ИБРАЭ РАН, 1998. – 63 с.

35. Балацкий, О. Ф. Антология экономики чистой среды : избранные научные труды / О. Ф. Балацкий. – Сумы : Университетская книга, 2007. – 272 с.

36. Балацкий, О. Ф. Экономика чистого воздуха / О. Ф. Балацкий. – Киев : Наукова думка, 1979. – 295 с.

37. Белова, И. В. Экономическая оценка последствий радиоактивного загрязнения окружающей среды (на примере аварии на ЧАЭС) : дис. ... канд. экон. наук. : 08.08.03 / Белова Инна Валерьевна. – Сумы : СумДУ, 1996. – 212 с.

38. Булдаков, Л. А. Метод восстановления дозы излучения в щитовидной железе от инкорпорированного ^{131}I . / Л. А. Булдаков // Медицинская радиология. – 1993. – Т. 38. – № 6. – С. 20-24.

39. Волобуев, П. В., Чуканов В. Н., Штинов Н. А. и др. Восточно-Уральский радиоактивный след : Проблемы реабилитации населения и территорий Свердловской области / П. В. Волобуев, В. Н. Чуканов, Н. А. Штинов и др.; Рос. акад. наук. Урал. отд-ние, Ин-т пром. экологии. – Екатеринбург : УрО РАН, 2000. – 283 с.

40. Вопросы радиозащиты. Труды ИБРАЭ РАН / Под ред. Большова Л. А. – М. : Наука, 2009. – 446 с.

41. Даванков, И. Ю. Ущерб, нанесенный экономике и социальной сфере территорий области, пострадавших вследствие аварии на ПО «Маяк» / И. Ю. Даванков // Общественные слушания Радиационные аварии на Южном Урале: уроки и выводы : сб. докладов. – Челябинск: Администрация Челябинской области, 1997. – С. 25-28.

42. Демидчик, Е. П., Цыб А. Ф., Лушников Е. Ф. Рак щитовидной железы у детей. / Е. П. Демидчик, А. Ф. Цыб, Е. Ф. Лушников // М.: Медицина, 1996. – 208 с.
43. Емельянов, В. М., Коханов В. Н., Некрасов П. А. Защита населения и территорий в чрезвычайных ситуациях : учебное пособие для высшей школы / В. М. Емельянов, В. Н. Коханов, П. А. Некрасов. – М. : Академический проспект, 2007. – 475 с.
44. Израэль, Ю. А. Атлас современных и прогнозных аспектов последствий аварии на Чернобыльской АЭС на пострадавших территориях России и Беларуси. / Ю. А. Израэль, под ред. И. М Богдевич. – Москва–Минск: Фонд «Инфосфера» – НИА-Природа, 2009. – 140 с.
45. Изучение радиозологических, радиационно-гигиенических и социально-хозяйственных последствий массированного радиоактивного загрязнения больших площадей (1958-1984 гг.). Том V. Обеспечение радиационной защиты населения: Отчет о НИР. / Научн. рук. Терновский И. А., Теверовский Е. Н. – Озерск : Фонды ПО «Маяк». – 1984. – Инв. № ОН-2167.
46. Изучение радиозологических, радиационно-гигиенических и социально-хозяйственных последствий массированного радиоактивного загрязнения больших площадей (1958-1984 гг.). Том VI. Биологическое действие радиоактивного загрязнения на природные объекты: Отчет о НИР / Научн. рук. Терновский И. А., Теверовский Е. Н. – Озерск : Фонды ПО «Маяк», 1984. – Инв. № ОН-2168.
47. Изучение радиозологических, радиационно-гигиенических и социально-хозяйственных последствий массированного радиоактивного загрязнения больших площадей (1958-1984 гг.). Том IV. Сельскохозяйственное использование загрязненной территории: Отчет о НИР. Научн. рук. Терновский И. А., Теверовский Е. Н. – Озерск : Фонды ПО «Маяк», 1984. – Инв. № ОН-2166.
48. Ильин, Л. А. Регламенты радиационного воздействия, лучевые нагрузки на население и медицинские последствия чернобыльской аварии / Л. А. Ильин // Медицинская радиология. – 1991. – Т. 36. – № 12. – С. 9-17.
49. Ильин, Л. А. Дозовые нагрузки на население и медицинские последствия Чернобыльской аварии : Информационный бюллетень №10. Центр общественной информации по атомной энергии. / Л. А. Ильин. – М. : ЦНИИАтоминформ, 1992. – С. 35-47.
50. Ильясов, Д. Ф. Подходы к экономическому обоснованию нормативов радиационной безопасности при аварийных ситуациях. / Д. Ф. Ильясов // М. : РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2015. – № 2. – С. 168-173.

51. Ильясов, Д. Ф. Стоимостная оценка ущерба потерь здоровья населения от радиационного воздействия / Д. Ф. Ильясов // М. : РИСК: Ресурсы, Информация, Снабжение, Конкуренция. – 2014. – Вып. – № 3. – С. 180-183.
52. Исходные материалы для подготовки постановлений Правительства СССР по оздоровлению экологической и социально-экономической обстановки в зоне деятельности ПО «Маяк» Минатомэнергопрома СССР. – Челябинск, 1990. – Т. 1. – 320 с.
53. Козлов, В. Н., Аклеев А. В., Софьин С. П. и др. Управление социальными процессами в условиях радиоактивного загрязнения : Ком. по радиац. и экол. безопасности, реабилитации пострадавших территорий Администрации Челяб. обл. / В. Н. Козлов, А. В. Аклеев, С. П. Софьин и др. – Челябинск : Челяб. гос. ун-т, 1998. – 147 с.
54. Константинов, Ю. О. Критерии для принятия неотложных решений о мерах защиты населения в случае аварии на АЭС / Ю. О. Константинов // Радиационная безопасность и защита АЭС. – 1985. – Вып. 9. – С. 148-152.
55. Концепция базовых вариантов последствий возможных аварий на АС для экстренного принятия мер по защите персонала и населения : Отчет. – М. : ФГУДП «ВНИИАЭС», ГНЦ-ИБФ, НПО «Тайфун» и ИБРАЭ РАН, 2002. – 71 с.
56. Косенко, М. М. Медицинские последствия облучения населения вследствие радиационных инцидентов на Южном Урале : автореф. дис. ... д-ра мед. наук : 14.00.05 / Коменко Мира Михайловна. – М., 1991. – 30 с.
57. Кофф, Г. Л. , Гусев А. А. , Воробьев Ю. Л., Козьменко С. Н. Оценка последствий чрезвычайных ситуаций. / Г. Л. Кофф, А. А. Гусев, Ю. Л. Воробьев и др. – М. : изд. -полиграф, комплекс «РЭФИА», 1997. – 364 с.
58. Круглов, А. К. Как создавалась атомная промышленность в СССР / А. К. Круглов. – М. : ЦНИИАтоминформ, 1995. – 380 с.
59. Линге, И. И., Меркушов В. П., Осипьянц И. А., Симонов А. В. Проблема минимизации ущерба при радиационных авариях / И. И. Линге, В. П. Меркушов, И. А. Осипьянц и др. // Труды II Всероссийской конференции «Теория и практика экологического страхования». – М. : 1996. – С. 29-34.
60. Моделирование и изучение механизмов переноса радиоактивных веществ из наземных экосистем в водные объекты зоны влияния Чернобыльской аварии. Проект экспериментального сотрудничества № 3 : Заключительный отчет. – Люксембург: Комиссия Европейских сообществ, 1996. – 196 с.

61. Новоселов, А. Л. Экономика природопользования : учебное пособие для студ. учреждений высш. проф. образования / А. Л. Новоселов. – М. : Издательский центр «Академия», 2012. – 240 с.
62. Океанов, А. Е., Якимович Г. В., Ванегель С. А. Изменение тенденций заболеваемости раком в Беларуси после чернобыльской катастрофы / А. Е. Океанов, Г. В. Якимович, С. А. Ванегель // Радиация и риск : Бюл. Национального радиационно-эпидемиологического регистра. – 1995. – № 6. – С. 216-235.
63. Осечинский, И. В., Мартиросов А. Р., Зингерман Б. В. и др. Лейкозы и другие гемобластозы в Брянской области России после Чернобыльской катастрофы / И. В. Осечинский, А. Р. Мартиросов, Б. В. Зингерман и др. // Радиация и риск : Бюл. Национального радиационно-эпидемиологического регистра. – 1995. – № 6. – С. 184-200.
64. Присяжнюк, А. Е., Грищенко В. Г., Загордонец В. А. и др. Изучение возможных радиационных раков после аварии на Чернобыльской АЭС на наиболее загрязненных радионуклидами территориях Украины / А. Е. Присяжнюк, В. Г. Грищенко, В. А. Загордонец // Радиация и риск : Бюл. Национального радиационно-эпидемиологического регистра. – 1995. – № 6. – С. 201-215.
65. Проектное задание на работы, связанные с проведением оздоровительных мероприятий в районе рек Теча и Исеть. Сводный СФР. 1957 // Архив ПО «Маяк». Ф. 12. Оп. 17. Ед. 66, 67.
66. Романов, Г. Н. Радиационная авария на ПО «Маяк»: практика контрмер, их эффективность и извлеченные уроки / Г. Н. Романов // Вопросы радиационной безопасности. – 1997. – № 3. – С. 3-17.
67. Сауров, М. М., Гнеушева Г. И., Косенко М. М. Демографические исследования в радиационной гигиене / М. М. Сауров, Г. И. Гнеушева, М. М. Косенко. – М.: Медицина, 1987. – 226 с.
68. Справка о затратах в связи с выполнением Постановлений СМ СССР и СМ РСФСР. 1959. // Архив ПО «Маяк». Ф.1, Оп. 30 «в». Ед.38.
69. Старик И. Е. (председатель комиссии). О мероприятиях по ликвидации сброса активных вод с завода Б и по снижению облучаемости на заводе : Докладная записка 05.02.1952 г. // Архив ГТО «Маяк». Ф. 1. Оп. 13. Ед. 38.
70. Стародубцев, И. А., Елохин А. П. Оценка ущерба радиоактивного загрязнения окружающей среды на объектах использования атомной энергии в условиях радиационной аварии / И. А. Стародубцев, А. П. Елохин // М.: Проблемы ядерной, радиационной и экологической безопасности. – 2015. – № 2 (15). – С. 7-23.

71. Степаненко, В. Ф., Цыб А. Ф., Гаврилин Ю. И. и др. Дозы облучения щитовидной железы населения России в результате аварии на Чернобыльской АЭС (ретроспективный анализ) / В. Ф. Степаненко, А. Ф. Цыб, Ю. И. Гаврилин и др. // Радиация и риск : Бюл. Национального радиационно-эпидемиологического регистра. – 1996. – № 7. – С. 225-245.
72. Тихомиров, Н. П., Арон Д. В. Методы обоснования рациональных стратегий обеспечения радиационной безопасности (при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации) / Н. П. Тихомиров, Д. В. Арон // Экономика природопользования. – 2016. – № 4. – С. 75-84.
73. Тихомиров, Н. П., Арон Д. В., Ивандиков П. В. Экономическое обоснование и оптимизация стратегий обеспечения безопасности при чрезвычайных ситуациях с утечкой радиации / Н. П. Тихомиров, Д. В. Арон, П. В. Ивандиков // Экономика, Статистика и Информатика. – 2016. – № 4. – С. 56-63.
74. Тихомиров, Н. П., Арон Д. В., Критерии экономической эффективности реабилитации загрязненных территорий / Н. П. Тихомиров, Д. В. Арон // Вестник Российского экономического университета имени Г. В. Плеханова. – 2017. – № 4 (94). – С. 120-125.
75. Федорова, М. В., Краснопольский В. И., Лягинская А. М. и др. Репродуктивное здоровье женщины и потомство в регионах с радиоактивным загрязнением (последствия аварии на ЧАЭС) / М. В. Федорова, В. И. Краснопольский, А. М. Лягинская и др. – М. : «ПАРАД», 1997. – 212 с.
76. Филюшкин, И. В., Петоян И. М. Теория канцерогенного риска воздействия ионизирующих излучений. / И. В. Филюшкин, И. М. Петоян. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 161 с.
77. Ярмоненко, С. П. Жизнь, рак, радиация. / С. П. Ярмоненко. – М. : Фирма коммерч. рекламы и науч.-техн. пропаганды «ИздАТ», 1993. – 159 с.
78. Ярмоненко, С. П. Радиобиология человека и животных : учебное пособие / С. П. Ярмоненко. – М. : Высш. шк., 2004. – 549 с.
79. Викимэпия. Интерактивный картографический интернет-портал [Электронный ресурс]. – URL: <http://wikimapia.org> (дата обращения: 05.03.2018).
80. Департамент энергетики США – официальный сайт. Результаты радиационного мониторинга в пр. Фукусима [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.energy.gov/articles/us-department-energy-releases-radiation-monitoring-data-fukushima-area> (дата обращения: 28.09.2019).
81. Министерство окружающей среды Японии. Официальный интернет-ресурс. Раздел с актуальной информацией о ходе дезактивации на территории Японии [Электронный ресурс] – URL: <http://josen.env.go.jp/en/decontamination> – заглавие экрана (дата обращения: 28.09.2019).

82. Официальное сообщение компании ТЕРСО по текущим выплатам на 2 января 2013 г. [Электронный ресурс]. – URL: http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/betu13_e/images/130204e0401.pdf (дата обращения: 28.09.2019).
83. Ashleya, S. F. Vaughanb G. J., Nuttalla W. J. etc. Predicting the cost of the consequences of a large nuclear accident in the UK. / S. F. Ashleya, G. J. Vaughanb, W. J. Nuttalla etc. // Elsevier : Process Safety and Environmental Protection. – 2017. – N 112. P. 96-113.
84. Burke, R. P. Aldrich D. C., Rasmussen N. C. Economic risks of nuclear power reactor accidents / R. P. Burke, D. C. Aldrich, N. C. Rasmussen. – Massachusetts : Sandia National Laboratories, 1984. – 71 p.
85. Cardis, E., Anspaugh L., Ivanov V. K. et al. Estimated Long Term Health Effects of the Chernobyl Accident. / E. Cardis, L. Anspaugh, V. K. Ivanov et al. // Vienna : In Proceedings of an IAEA Conference One Decade after Chernobyl : Summing up the Consequences of the Accident – 1996. – 8-12 April. – P. 241-27.
86. Chanin, D. I., Murfin W. B. Site Restoration: Estimation of Attributable Costs from Plutonium-Dispersion Accidents : Contract Report (SAND96-0957) / D. I. Chanin, W. B. Murfin – Albuquerque : Sandia National Laboratories, 1996.
87. Chanin, D. I., Sprung J. L., Ritchie L. T. et. al. MELCOR Accident Consequence Code System (MACCS), SAND86-1562, NUREG/CR-4691 / D. I. Chanin, J. L. Sprung, L. T. Ritchie et. al. – Albuquerque, NM : Sandia National Laboratories, 1990. – February.– 278 p. [Электронный документ] – URL: <https://www.osti.gov/servlets/purl/7038439> (дата обращения: 29.09.2019).
88. Charnock, T. W., Bexon A. P., Sherwood J., Higgins N. A., Field S. J. A geographic information system based level 3 probabilistic accident consequence evaluation program. / Thomas William Charnock, Antony Paul Bexon, Jonathan Sherwood et. al // ANS PSA 2013 International Topical Meeting on Probabilistic Safety Assessment and Analysis. – Columbia, SC : PACE, 2019, September 22-26. – 9 p. [Электронный ресурс] – URL: https://www.phe-protectionservices.org.uk/cms/assets/gfx/content/resource_3255cs2067e2650c.pdf (дата обращения: 28.09.2019).
89. Crick, M. J. Derived intervention levels for invoking countermeasures in the management of contaminated agricultural environments. Division of nuclear safety. / M. J. Crick. – Vienna: IAEA, 1991. – 23 p.
90. Dose estimates from severe accidents beyond emergency planning zone (VTT-R-00432-15) : Research report / Jukka Rossi, Mikko Ilvonen. – Finland : VTT, 2015. – 45 p.
91. Ehrhardt, J., Shershakov V., Zheleznyak M., Mikhalevich A. RODOS: Decision Support System for off-Site Nuclear Emergency Management in Europe: Final Project Report (RUR 19144 EN) / J. Ehrhardt, V. Shershakov, M. Zheleznyak. et. al. – European Commission, 2000. – p.

1087-1096. [Электронный документ] – URL: <https://docplayer.net/8217528-Rodos-decision-support-system-for-off-site-emergency-management-in-europe.html> (дата обращения: 29.09.2019).

92. Generic handbook for assisting in the management of contaminated inhabited areas in Europe following a radiological emergency / Brown J [etc.]. – Oxford: EURANOS, 2007. – 86 p.

93. Health risk assessment from the nuclear accident after the 2011 Great East Japan earthquake and tsunami, based on a preliminary dose estimation. – Geneva : World Health Organization, WHO Press, 2013. – 172 p.

94. Higgins, N. A., Jones C., Munday M., Balmforth H., Holmes W., Pfuderer S., Mountford L., Harvey M., Charnock T. COCO-2: a model to assess the economic impact of an accident : Report / N. A. Higgins, C. Jones, M. Munday et. al. – Health Protection Agency, 2008. – No. HPA-RPD-046. – 198 p. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.phe-protectionservices.org.uk/cms/assets/gfx/content/resource_3255cs2067e2650c.pdf (дата обращения: 29.09.2019).

95. von Hippel, F. N., Schoeppner M. Economic Losses From a Fire in a Dense-Packed U.S. Spent Fuel Pool. / Frank N. von Hippel, Michael Schoeppner // Science & Global Security. – 2017. – N 2. – p. 80-92.

96. IAEA-TECDOC-953. Method for the Development of Emergency Response Preparedness for Nuclear or Radiological Accidents. – Vienna : IAEA, 1997. – 124 p.

97. IAEA-TECDOC-955. Generic Procedures for Determining Protective Actions during a Reactor Accident. – Vienna : IAEA, 1997. – 239 p.

98. ICRP Publication 26. Recommendations of the International Commission on Radiological Protection. Annals of the ICRP. – Oxford: Pergamon Press, 1977. – V. 21. – 87 p.

99. ICRP Publication 55. Optimization and decision-making in radiological protection. – Annals of ICRP : Pergamon Press, 1989. – Vol. 20. – N 1. – p. 1182-1188.

100. ICRP Publication 60: The 1990 Recommendations of the International Commission on Radiological Protection, Annals of the ICRP. – Oxford: Pergamon Press, 1991. – Vol. 21. – №1-3. – 249 p.

101. ICRP Publication 63. Principles for Intervention for Protection of the Public in a Radiological Emergency. – Annals of ICRP : Pergamon Press, 1993. – Vol. 22. – N 4. – 40 p.

102. International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources : Safety Series. – Vienna : IAEA, 1996. – № 115. – 48 p.

103. Intervention criteria in a nuclear or radiation emergency. Safety series No. 109. – Vienna: IAEA, 1994. – 117 p.

104. Ivanov, V. K., Tsyb A. F., Gorsky A. I. et al. Leukemia and thyroid cancer in Emergency Workers of the Chernobyl accident: estimation of radiation Risks (1986-1995) / V. K. Ivanov, A. F. Tsyb, A. I. Gorsky et al. // Radiation Environ Biophys. – 1997. – №36. – P. 9-16.
105. Jacob, P., Kenigsberg Y., Zvonova I. et al. Childhood exposure due to the Chernobyl accident and thyroid cancer risk in contaminated areas of Belarus and Russia / P. Jacob, Y. Kenigsberg, I. Zvonova et al. // British Journal of Cancer. – 1999.– N 80(9). – P. 1461-1469.
106. Jacob, P., Lituraev, I. Pathway analysis and dose distributions / P. Jacob, I. Lituraev. – Luxemburg : EUR 16541 – Joint study project №5. – 1996. – VIII. – P. 19-25.
107. Kishimoto, A., Oka T., Nakanishi J. The cost-effectiveness of life-saving interventions in Japan: Do chemical regulations cost too much? / Atsuo Kishimoto, Toshihiro Oka, Junko Nakanishi // Chemosphere. – Vol. 53. – Issue 4. – 2003. – P. 291-299.
108. Kosenko, M. M., Akleyev A. A., Degteva M. O. et al. Analysis of Chronic Sickness Cases in the Population of Southern Urals. Bethesda, USA. / M. M. Kosenko, A. A. Akleyev, M. O. Degteva et al. // Bethesda, Maryland : Armed Forces Radiobiology Research Inst., 1994. – 94 p.
109. Murakami, M., Tsubokura M., Ono K. etc. Additional risk of diabetes exceeds the increased risk of cancer caused by radiation exposure after the Fukushima disaster [Электронный ресурс] / M. Murakami, M. Tsubokura, K. Ono etc. // PLOS ONE open access journal. – 2017. – September 28. – URL: <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185259> (дата обращения: 29.09.2019).
110. NUREG/CR-6525, Rev. 1. SECPop2000: Sector Population, Land Fraction, and Economic Estimation Program / – Washington: Sandia National Laboratory. U. S. Nuclear Regulatory Commission Office of Nuclear Regulatory Research, 2003. – 410 p.
111. One decade after Chernobyl : Summing Up the Consequences of the Accident. Jointly sponsored by the European Commission, International Atomic Energy Agency, World Health Organization, in co-operation with the United Nations (Department of Humanitarian Affairs), ... et al. – Vienna : IAEA, 1996. – 555 p. [Электронный документ] – URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/Pub1001_web.pdf (дата обращения: 28.09.2019).
112. Radioactivity in the Baltic Sea. 1984-1991. Baltic Marine Environment Protection Commission № 61. – Helsinki : HELCOM, 1995/ – 187 p. [Электронный документ]. – URL: <http://www.helcom.fi/Lists/Publications/bsep61.pdf> (дата обращения: 28.09.2019).
113. Reassessment of NRC's Dollar Per Person-Rem Conversion Factor Policy. NUREG-1530, Rev. 1 – Washington D.C. : U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC), 2015. – 65 p. [Электронный ресурс] – URL: <https://www.nrc.gov/docs/ML1523/ML15237A211.pdf> (дата обращения: 29.09.2019).

114. Reassessment of NRC's Dollar Per Person-Rem Conversion Factor Policy. NUREG-1530. – U.S. : Washington D.C. : Nuclear Regulatory Commission (NRC), 1995. – 28 p. [Электронный ресурс] – URL: <https://permanent.access.gpo.gov/gpo79175/ML063470485.pdf> (дата обращения: 05.03.2018).
115. Reichmuth, B., Short S., Wood T. Economic Consequences of a Rad. Nuc. Attack: Cleanup Standards Significantly Affect Cost. Working Together: Research & Development Partnerships in Homeland Security Conference. / B. Reichmuth, S. Short, T. Wood – Boston : International security Partnership, 2005. – 24 p.
116. The Follow-up IAEA International Mission on Remediation of Large Contaminated Areas Off-Site the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Tokyo and Fukushima Prefecture : IAEA Final Report. Japan : IAEA, 2013. – 14-21 October – 57 p. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.iaea.org/sites/default/files/final_report230114.pdf (дата обращения: 28.09.2019).
117. The Geological Society of Japan (JGS) [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.geosociety.jp/hazard/content0058.html> – заглавие экрана (дата обращения: 05.03.2018).
118. Tikhomirov, N. P., Aron D. V. Management Optimization of Rehabilitation Processes for Polluted Territories / Nikolay P. Tikhomirov, Dmitry V. Aron // CEUR Workshop Proceedings Proceedings of the VIII International Conference on Optimization and Applications (OPTIMA-2017). October 2-7. Montenegro : Petrovac. – 2017. – P. 556-561, [Электронный ресурс] – URL: <http://ceur-ws.org/Vol-1987> (дата обращения: 28.09.2019).
119. Tokyo Electric Power Company Holdings, Inc. Official Website [Электронный ресурс]. – URL: www.tepco.co.jp (дата обращения: 28.09.2019).
120. Tronko, N. D., Epstein Y., Oleinik V. et al. Thyroid gland in children after Chernobyl accident (yesterday and today) : in Nagasaki Symposium on Chernobyl / N. D. Tronko, Y. Epstein, V. Oleinik // Amsterdam : Elsevier. – 1994. – P. 31-46.
121. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2000). Source and Effects of Ionizing Radiation. Vol. II, Effects. UNSCEAR 2000 Report to the General Assembly, with Scientific Annexes. – New York : United Nations sales publication, 2000. – 153 p.
122. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNSCEAR 2006). UNSCEAR 2006 Report. Annex A. Epidemiological Studies of Radiation and Cancer. – New York : United Nations sales publication, 2008. – 310 p.
123. Williams, E. D., Becker D., Demidchik E. P. et al. Effects on the thyroid in populations exposed to radiation as a result of the Chernobyl accident / E. D. Williams, D. Becker, E. P. Demidchik et al. // Proceedings of the Joint EU, IAEA and WHO International Conference «One Decade after Chernobyl» – Vienna : IAEA, 1996. – P. 207-230.

124. Act №110 on Special Measures Concerning the Handling of Environmental Pollution by Radioactive Materials Discharged by the Nuclear Power Station Accident Associated with the Tohoku District – Off the Pacific Ocean Earthquake that Occurred on March 11, 2011. – 34 p. [Электронный ресурс]. – URL: http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/special_act.pdf?20130118 (дата обращения: 28.09.2019).

125. Database for Radioactive Substance Monitoring Data. Japan Atomic Energy Agency. [Электронный ресурс]. – URL: <http://emdb.jaea.go.jp/emdb/en> – заглавие экрана (дата обращения: 05.03.2018).

126. Decontamination Guidelines. 2nd Ed. (Tentative Translation). – Japan : Ministry of the Environment, 2013. – 246 p. [Электронный ресурс] – URL: http://josen.env.go.jp/en/framework/pdf/decontamination_guidelines_2nd.pdf (дата обращения: 05.03.2018).

127. Financial Assistance from the Nuclear Damage Compensation and Decommissioning Facilitation Corporation. : Press Release. – Tokyo Electric Power Company, 2017. – Nov 22 [Электронный ресурс] – URL: http://www.tepco.co.jp/en/press/corp-com/release/2017/1466774_10469.html (дата обращения: 28.09.2019).

128. FY2013 1st Quarter Earnings Results (April 1 – June 30, 2013) : Supplemental Material. Japan : Tokyo Electric Power Company, 2013. – July 31. – 43 p. [Электронный ресурс] – URL: https://www7.tepco.co.jp/wp-content/uploads/hd05-02-03-001-001-130731_1-e.pdf (дата обращения: 28.09.2019).

129. FY2014 Decontamination Report – A Compilation of Experiences to Date on Decontamination for The Living Environment Conducted by The Ministry of the Environment – (Tentative Translation). – Japan : Ministry of the Environment, 2015. – March. – 430 p. [Электронный ресурс] – URL: http://josen.env.go.jp/en/policy_document/pdf/decontamination_report1503_full.pdf (дата обращения: 28.09.2019).

130. Japan statistic yearbook 2011 (Статистический ежегодник Японии 2011). – Statistical Research and Training Institute, MIC, 2011 [Электронный ресурс] – URL: <http://www.stat.go.jp/english/data/nenkan/back60> – заглавие экрана (дата обращения: 28.09.2019).

131. MACCS программный код. Официальный интернет-ресурс. [Электронный ресурс] – URL: <https://maccs.sandia.gov/maccs.aspx> – заглавие экрана (дата обращения: 29.09.2019).

132. MACCS2 Computer Code Application Guidance for Documented Safety Analysis : final report. – US Department of Energy, 2004. – 253 p. [Электронный ресурс] – URL: https://www.energy.gov/sites/prod/files/2013/07/f2/Final_MACCS2_Guidance_Report_June_1_2004.pdf (дата обращения: 28.09.2019).

133. Model description of the late economics modeling : Rodos report (draft), 2000. – 25 p. [Электронный ресурс] – URL: https://resy5.iket.kit.edu/RODOS/Documents/Public/Handbook/Volume3/4_3_3_Economics.pdf (дата обращения: 29.09.2019).
134. Monitoring information of environmental radioactivity level. Nuclear Regulation Authority, Japan [Электронный ресурс] – URL: <http://radioactivity.nsr.go.jp/map/ja/> – заглавие экрана (дата обращения: 28.09.2019).
135. Mufson, S. Japanese nuclear plants' operator scrambles to avert meltdowns. / Steven Mufson // The Washington Post. – 2011. 13 March [Электронный ресурс] – URL: <http://www.washingtonpost.com/wp-dyn/content/article/2011/03/12/AR2011031205493.html> (дата обращения: 28.09.2019).
136. National Land Numerical Information download service of Ministry of Land, Infrastructure, Transport and Tourism of Japan [Электронный ресурс] – URL: <http://nlftp.mlit.go.jp/ksj/index.html> – заглавие экрана (дата обращения: 28.09.2019).
137. OpenStreetMap. Открытый картографический интернет-сервис [Электронный ресурс] – URL: <https://www.openstreetmap.org/> (дата обращения: 28.09.2019).
138. Pitney Bowes Company. Official Website. Mapinfo Pro [Электронный ресурс] – URL: <https://www.pitneybowes.com/us/location-intelligence/geographic-information-systems/mapinfo-pro.html> (дата обращения: 28.09.2019).
139. QGIS – свободная географическая информационная система с открытым кодом [Электронный ресурс] – URL: <https://qgis.org/ru/site/> – заглавие экрана (дата обращения: 05.03.2018).
140. Statistics Bureau, Ministry of Internal Affairs and Communications. Официальный интернет-ресурс Бюро статистики Японии. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.stat.go.jp/english> – заглавие экрана. (дата обращения: 28.09.2019).
141. The Global Land Cover Facility [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.landcover.org> – заглавие экрана (дата обращения: 26.03.2019).
142. The Ministry of Education, Culture, Sports, Science and Technology Official Website [Электронный ресурс] – URL : <http://www.mext.go.jp> (дата обращения: 28.09.2019).
143. The Official Report of The Fukushima Nuclear Accident Independent Investigation Commission. Executive summary. The National Diet of Japan, 2012. – 88 p. [Электронный ресурс] – URL: https://www.nirs.org/wp-content/uploads/fukushima/naaic_report.pdf (дата обращения: 28.09.2019).

ПРИЛОЖЕНИЕ А (СПРАВОЧНОЕ)

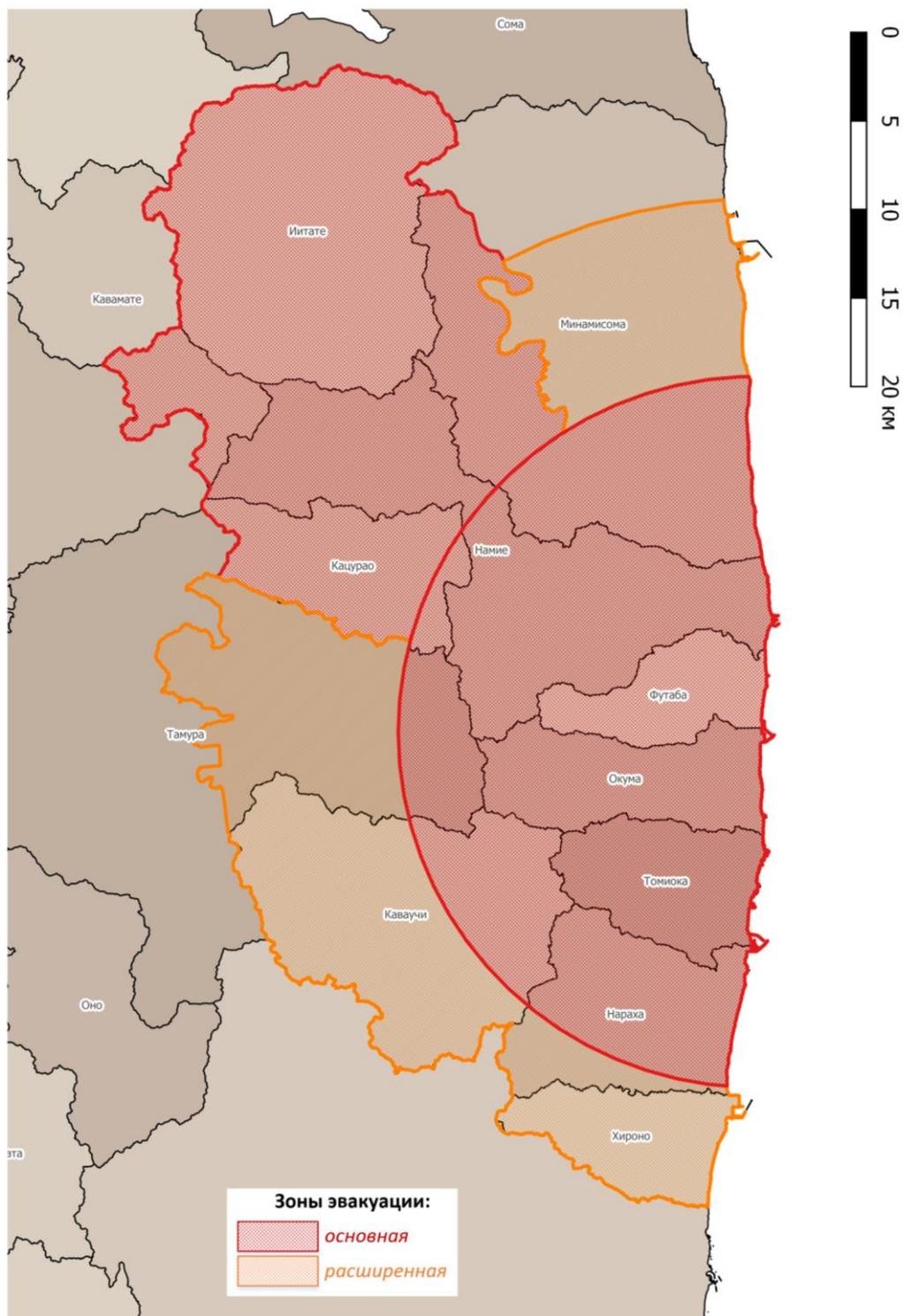


Рисунок А.1 – Зоны эвакуации в префектуре Фукусима в 2011 году

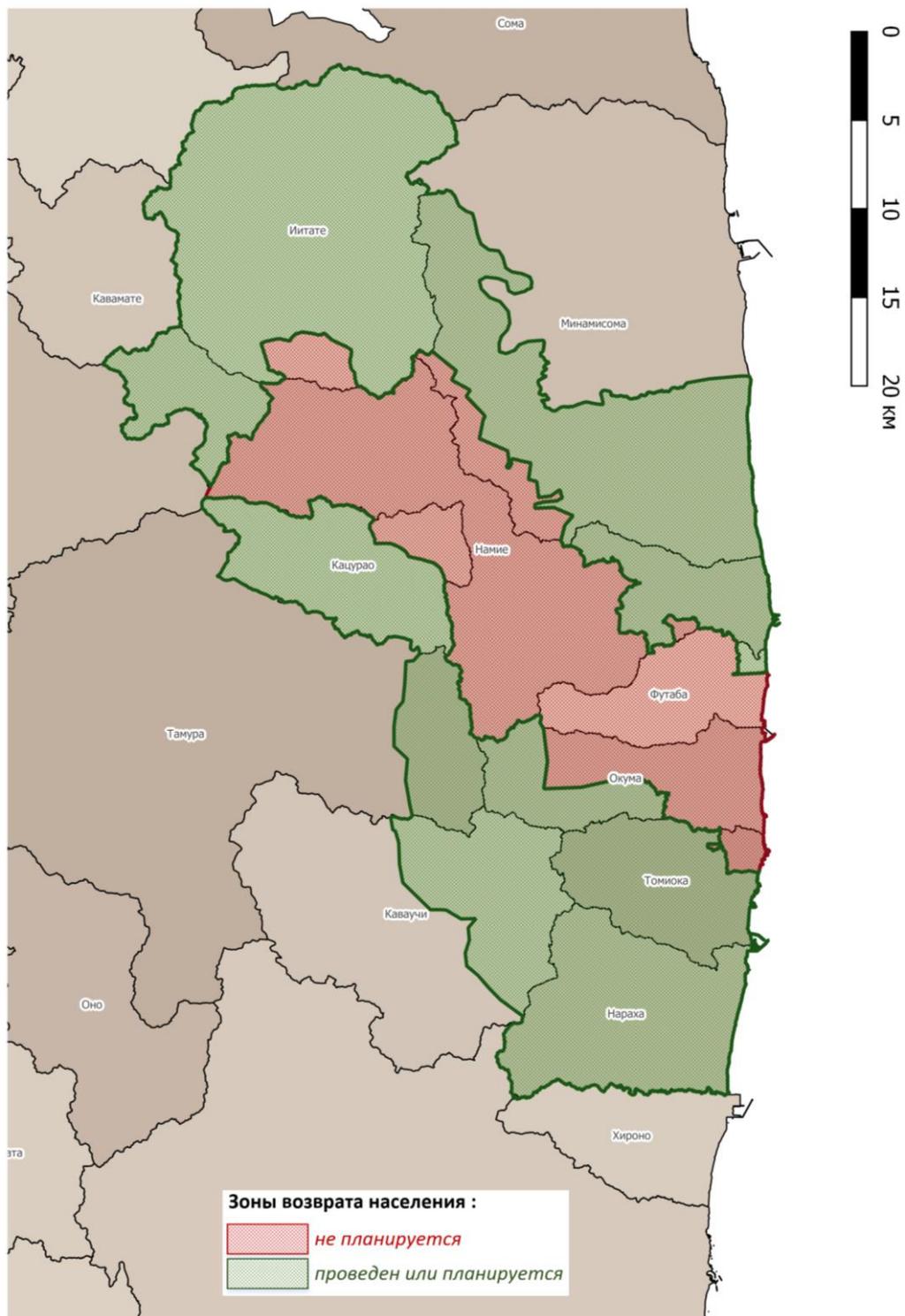


Рисунок А.2 – Зоны, где в 2017 году окончательно планировался возврат населения после дезактивации и зоны, где возвращение населения откладывалось на неопределенный срок

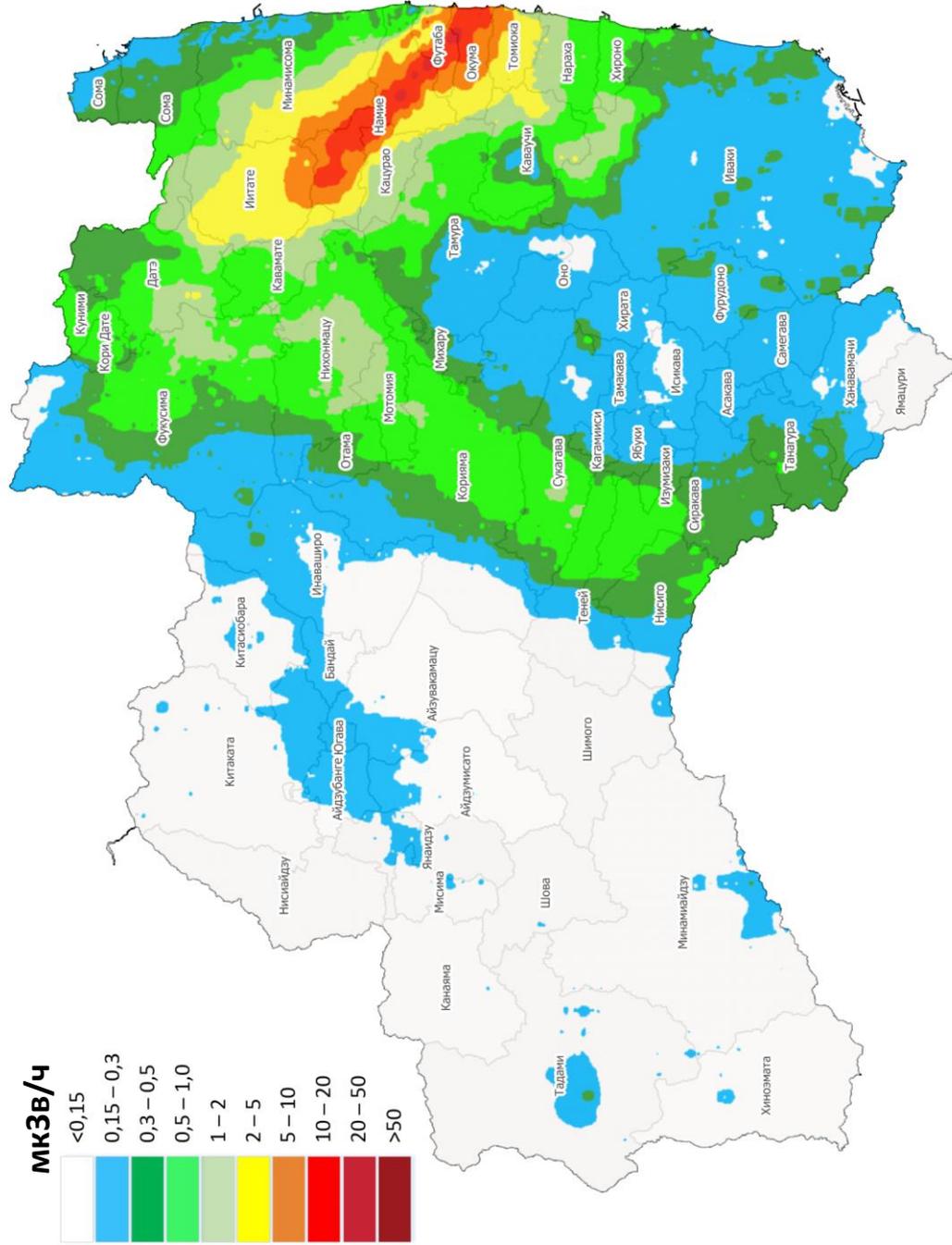


Рисунок А.8 – Восстановленная карта МЭД гамма-излучения в префектуре Фукусима через год после аварии

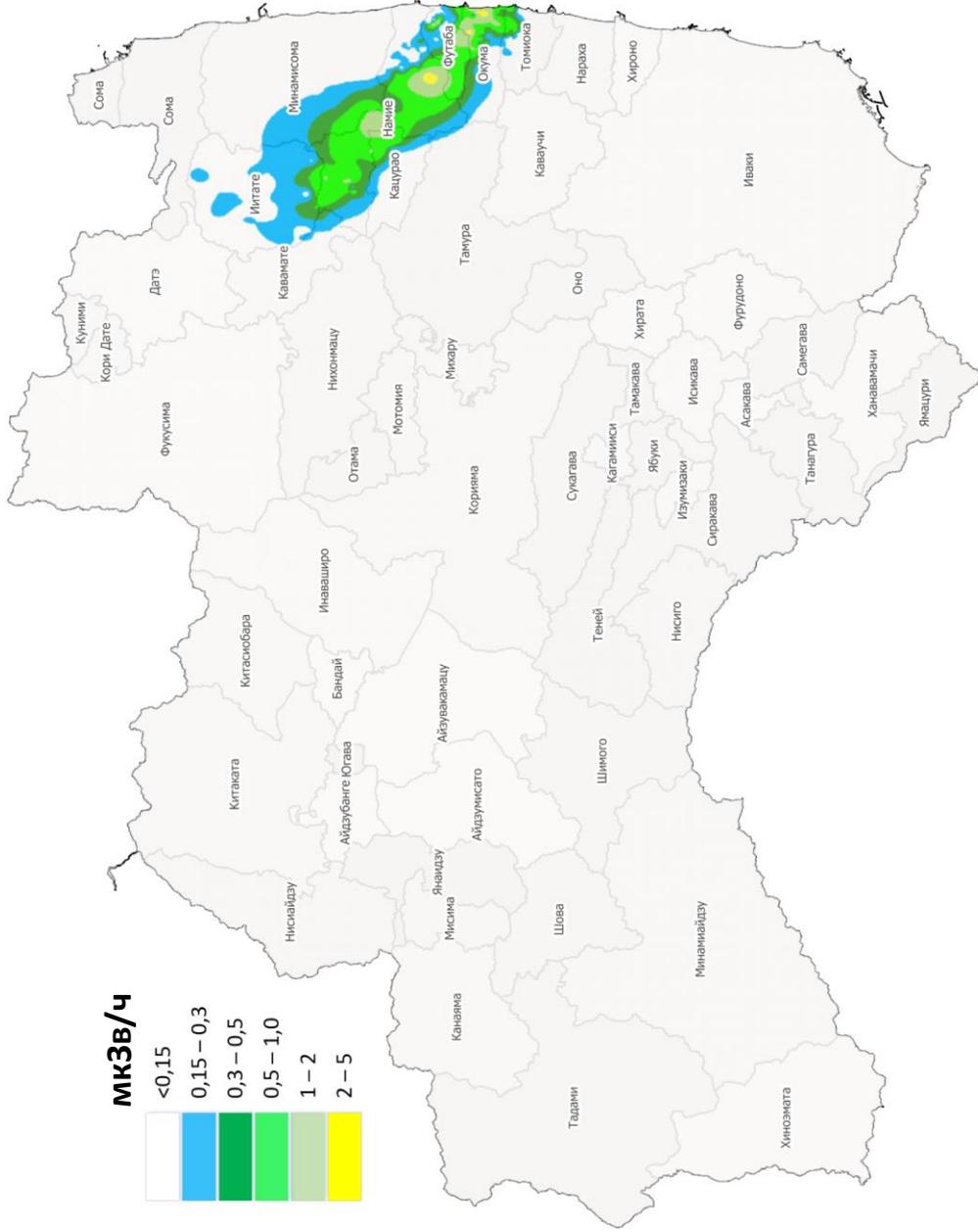


Рисунок А.12 – Восстановленная карта МЭД гамма-излучения в префектуре Фукусима через 75 лет после аварии

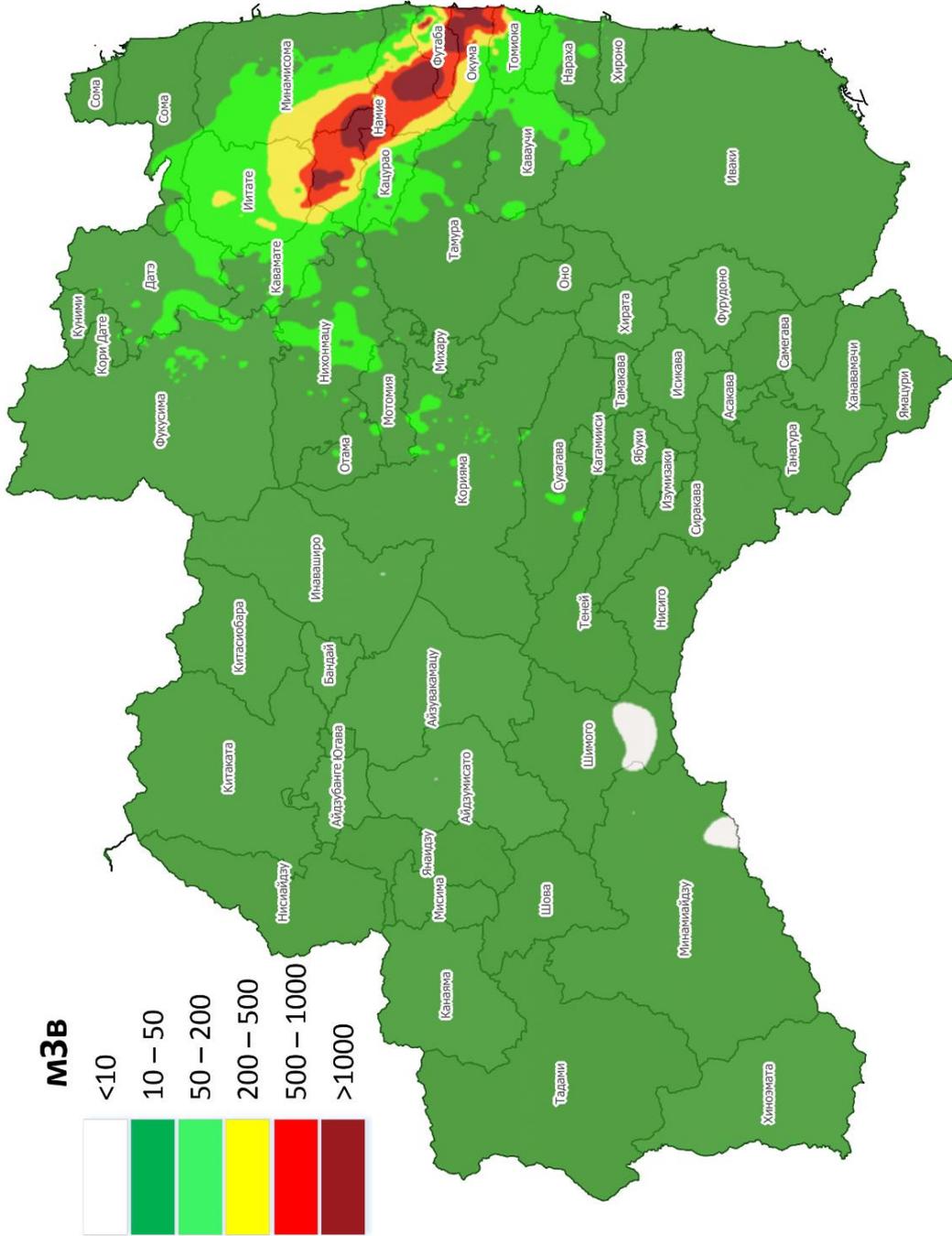


Рисунок А.17 – Восстановленная доза гамма-излучения в префектуре Фукусима за 75 лет после аварии