На правах рукописи

to Been B

Арон Дмитрий Викторович

Методы оценки эффективности стратегий реабилитации радиационно загрязненных территорий

Специальность: 08.00.13 – Математические и инструментальные методы экономики (экономические науки)

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени кандидата экономических наук

Работа выполнена на кафедре математических методов в экономике Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Российский экономический университет имени Г.В. Плеханова», г. Москва

Научный руководитель

доктор экономических наук, профессор

Тихомиров Николай Петрович

Официальные оппоненты: Крышев Иван Иванович

доктор физико-математических наук, профессор по кафедре экологии, ФГБУ «Научно-производственное объединение «Тайфун», институт проблем мониторинга окружающей среды, главный научный сотрудник лаборатории эколого-геофизического моделирования и анализа риска

Вишняков Яков Дмитриевич

доктор технических наук, профессор, ФГБОУ ВО «Государственный университет управления», научный руководитель кафедры управления природопользованием и экологической безопасностью

Ведущая организация

федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Защита состоится 16 января 2020 г. в 14:00 часов на заседании диссертационного совета Д 212.196.15 на базе ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, Стремянный пер., д. 36, корп. 3, ауд. 353.

С диссертацией и авторефератом можно ознакомиться в Научноинформационном библиотечном центре им. академика Л.И. Абалкина ФГБОУ ВО «РЭУ им. Г.В. Плеханова» по адресу: 117997, г. Москва, ул. Зацепа, д. 43 и на сайте организации: http://ords.rea.ru/

Автореферат разослан «____» _____ 2019 г

Ученый секретарь диссертационного совета Д 212.196.15, доктор экономических наук, профессор M

Мхитарян Сергей Владимирович

І. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

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 трудноустранимым 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 Технического исследовательского Бристоля (Великобритания), 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. Ашлея, 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 Хиппеля, 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, предопределяют 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 МS Excel, СУБД МS Access, ГИС Маріпfo, ГИС QGIS, Autodesk MathCad.

Научная Разработаны И верифицированы новизна. 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 поставарийных 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 заглубления 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 поставариного 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 научнотехническую 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 научнопрактических 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 (ОРТІМА-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» (№15-02-00412a, 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.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ ДИССЕРТАЦИИ, ВЫНОСИМЫЕ НА ЗАЩИТУ

1. Структурирован состав основных мер, применяемых при радиационных авариях для защиты населения и реабилитации загрязненных территорий, по стадиям ликвидации последствий аварии и действующим дозовым нормативам их применения, а также уточнен состав издержек и выгод, связанных с их реализацией

На основании изученного опыта ликвидации последствий радиационных аварий и действующих в области радиационной безопасности отечественных и международных нормативных документов в работе систематизированы основные меры по обеспечению безопасности населения в условиях аварийного загрязнения территорий в соответствии с дозовыми критериями принятия решений на их применение (см. таблицу 1). Наиболее значимые по сопутствующим социальным и экономическим последствиям являются меры, предпринимаемые на поставарийной стадии и в долгосрочном периоде реагирования, среди которых выделены: общий контроль обстановки без вмешательства, временная эвакуация жителей, введение ограничений на экономическую деятельность, долгосрочное отселение и реабилитация территорий (включая дезактивацию).

Таблица 1 – Систематизация основных мер вмешательства в зависимости от ожидаемой дозы облучения населения (по нормативам НРБ 99/2009 и МКРЗ 103)

Дозовый		Мера вмешательства					
критерий	Невмеша-	Введение					
принятия	тельство	ограничений на	Дезактивация	Эвакуация	Отселение		
решения		деятельность					
<1 м3в/год	обосновано	не требуется					
1-20 мЗв/год	допускается	Mã	не требуется				
20-50 м3в/год 50-100 м3в/год	допускается только в ненаселен- ных	може	не требуется (может быть отменено при <10 мЗв/мес.) может рекомендо- ваться (или при >30 мЗв/мес.)				
>100 мЗв/год	территориях	обосновано	не обоснована, если не	00	босновано		
>500 мЗв/год		обязательно	планируется проживание	06	обязательно		

Из таблицы 1 следует, что высокозатратные меры по отселению, введению ограничений или дезактивации могут применяться и при дозах облучения, не опасных для населения, а масштабы их применения регламентируются нечетко. В этих условиях имеется возможность оптимизировать затраты и сопутствующие ущербы при их реализации через управление дозовыми критериями и за счет выбора более экономически эффективных стратегий.

В работе отмечено, что в соответствии с международными рекомендациями МКРЗ 103 и отечественными нормативами НРБ 99/2009 в области обеспечения радиационной безопасности населения, реализация мер поставарийного вмешательства должна осуществляться оптимально или, по крайней мере, эффективно с точки зрения достигаемого экономического и

радиологического результата. При этом под эффективностью понимается выполнение условия превышения стоимостного эквивалента выгоды, полученной в результате реализации мер вмешательства, над понесенными издержками, а под оптимальностью — максимизация этого превышения. Издержки и выгоды реализации мер вмешательства, представленных в таблице 1, приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Структура издержек и выгод при реализации поставарийных мер вмешательства

Мера вмешательства	Издержки	Выгоды		
Невмешательство	Ущерб от облучения населения за период бездействия.	_		
Введение ограничений на деятельность	Упущенная выгода (потеря доходов) населения, вызванная вводимыми ограничениями на экономическую деятельность за период их действия.	Выгоды от снижения доз облучения населения за счет ограничений.		
Дезактивация загрязненных территорий	Прямые затраты на проведение дезактивации. Ущерб от остаточного облучения после проведения дезактивации в долгосрочном периоде.	Выгоды от снижения доз облучения населения в долгосрочном периоде за счет снижения радиационного фона в результате дезактивации.		
Эвакуация	Затраты на проведение эвакуации. Затраты на проживание в эвакуации в течение времени ее действия. Упущенная выгода (потеря доходов) населения за период действия эвакуации. Ущерб от остаточного облучения после отмены эвакуации в долгосрочном периоде.	Выгоды от предотвращения облучения населения за период эвакуации.		
Отселение	Затраты на проведение отселения. Упущенная выгода (потеря доходов) населения на период адаптации после отселения. Суммарные потери недвижимости и имущества.	Выгоды от предотвращения облучения населения в долгосрочной перспективе.		

2. Выявлена низкая экономическая эффективность стратегий вмешательства при реализации поставарийных мер защиты населения и реабилитации загрязненных территорий в ходе ликвидации последствий крупных радиационных аварий

В работе отмечено, что ликвидация последствий крупных радиационных аварий в бывшем СССР и современной России на предприятии «Маяк» в 1950-х годах, ЧАЭС в 1986 году, Сибирском химкомбинате в 1993 году и АЭС «Фукусима-1» в Японии в 2011 году, как правило, сопровождалась временным отселением или эвакуацией жителей, а также введением ограничений на проживание, водопользование и ведение сельского хозяйства. Эти меры,

предпринятые на поставарийной стадии вмешательства, позволили значительно снизить уровни радиационного воздействия на население. Однако они зачастую были избыточны либо не были своевременно рационализированы в соответствии с дальнейшим изменением радиационной ситуации, из-за чего был нанесен значительный урон как социальной сфере, так и экономике затронутых территорий и государства в целом.

Избыточность и нерациональность при реализации отдельных мер проявлялась в длительном отселении жителей вместо краткосрочной эвакуации из районов с низкими уровнями радиационного загрязнения, введении строгих ограничений на экономическую деятельность и производство продуктов питания без своевременного учета улучшения радиационной обстановки, непропорционально больших по сравнению с полученным эффектом вложениях средств в дезактивацию и в другие меры реабилитации территории, организации системы выплаты компенсаций без учета дальнейшего снижения радиационных рисков для населения. Вводимые ограничения на проживание и хозяйственную деятельность на затронутых территориях также не всегда адекватно и своевременно корректировались со временем, что в долгосрочной перспективе приводило к их глубокому социальному и экономическому упадку.

В частности, при ликвидации последствий долгосрочных сбросов радиоактивных отходов с предприятия «Маяк» в р. Теча в 1950-1951 гг. прямые суммарные затраты, включающие расходы на переселение жителей до 1957 года, оценивались в 358 млрд руб. (все суммы приведены в эквиваленте на 2014 г.), что значительно превышает оценку 2001 г. по суммарному экологическому ущербу — не более 92 млрд руб., вызванному загрязнением, и оценку прямого ущерба в 4-9 млрд руб., полученную предприятием «Маяк» в 1990-е годы на основе экономического анализа.

В ходе ликвидации последствий аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г. затраты на снижение доз облучения населения по ряду реабилитационных мероприятий доходили до \$2-3 млн. на 1 чел.-Зв предотвращаемой коллективной дозы облучения, что превышает рекомендуемое значение его экономического эквивалента, равное величине среднегодового ВНД на душу населения. Имело место нерациональное превышение затрат по зоне льготного социально-экономического статуса в сравнении с зонами отселения и ограниченного проживания (в 3,2 и 2,3 раза соответственно, в пересчете на единицу годовой дозы облучения), где радиационные риски были выше. Аналогичные примеры могут быть приведены по опыту ликвидации последствий других аварий.

Отмечено, что проблема низкой эффективности принимаемых решений особенно актуальна для территорий, где уровни радиационного загрязнения относительно невысоки (от

20 до 100 мЗв прогнозируемой индивидуальной дозы облучения в год) и нет жестких дозовых ограничений на применение основных мер вмешательства.

Из результатов проведенного анализа следует, что решение проблемы рационализации стратегий вмешательства предполагает необходимость обоснования корректных условий и критериев применения мер по снижению доз облучения населения и реабилитации территорий, подвергшихся радиационному загрязнению.

3. Разработан подход к формированию рациональных стратегий вмешательства при радиационных авариях, характеризующихся превышением связанных с ними выгод над издержками, и уточнен состав критериев оптимизации стратегий вмешательства

В работе предложен подход, предполагающий принятие решений по реализации сценариев вмешательства при радиационных авариях на основе условий их эффективности и критериев оптимальности, базирующихся на принципах превышения стоимостного эквивалента выгод от последствий вмешательства над связанными с ними издержками и максимизации этого превышения соответственно, с учетом действующих дозовых ограничений в области обеспечения радиационной безопасности населения. Оценки издержек и выгод при реализации отдельных мероприятий вмешательства определены ниже в рамках описания критериев их применимости.

В работе были рассмотрены четыре потенциальных критерия оптимальности сценария вмешательства: на максимизацию пользы от вмешательства: K_I =«Предотвращенный ущерб»-«Затраты на вмешательство»; на минимизацию издержек: K_2 = «Остаточный ущерб от облучения после вмешательства»+«Затраты на вмешательство»; на минимизацию затрат на единицу стоимости предотвращенного ущерба: K_3 =«Затраты на вмешательство» / «Предотвращенный ущерб»; на максимизацию удельной эффективности затрат: K_4 = «Стоимость предотвращенного ущерба» / «Затраты на вмешательство». Эти критерии для сценария проведения дезактивации загрязненной территории без отселения представлены следующими выражениями (1)-(4):

$$K_1 = \mathcal{G} \cdot N \cdot (D - D_R) - c_e \cdot \ln(D/D_R) \rightarrow \max;$$
 (1)

$$K_2 = \mathcal{G} \cdot N \cdot D_R + c_e \cdot \ln(D/D_R) \rightarrow \min;$$
 (2)

$$K_3 = \frac{c_e \cdot \ln(D/D_R)}{9 \cdot N \cdot (D - D_R)} \to \min;$$
(3)

$$K_4 = \frac{\mathcal{G} \cdot N \cdot (D - D_R)}{c_e \cdot \ln(D/D_R)} \to \max,$$
(4)

где D и D_R — индивидуальные дозы облучения за конкретный период в отсутствии мер вмешательства и в результате их реализации для N жителей, проживающих на затронутых территориях, 3в; θ — стоимостный эквивалент единицы коллективной дозы облучения, ед. валюты/чел.-3в, значения которого, в соответствии с рекомендациями HPБ 99/2009 (Российская Федерация) и NUREG 1530 Rev.1 (США, 2015 г), оцениваются в диапазоне от среднегодовой величины ВНД на душу населения до \$510 тыс/чел.-3в; c_e — оценочная стоимость дезактивации территории с кратностью снижения дозы в e раз, ед. валюты.

При условии зависимости параметров K_1 - K_4 от величины остаточной дозы облучения после вмешательства D_R , ее оптимальное значение определяется из условия $dK_i/dD_R=0$, где i-номер критерия. Из уравнения (5) следует, что оптимальное значение остаточной дозы облучения для сценария дезактивации определяется как (6):

$$\frac{dK_1}{dD_R} = \frac{dK_2}{dD_R} = 9 \cdot N - \frac{c_e}{D_R} = 0, \qquad (5)$$

$$D_R^{onm} = \frac{c_e}{g \cdot N} \,. \tag{6}$$

В то же время, из $\frac{dK_3}{dD_R} = \frac{dK_4}{dD_R} = 0$ следует, что $\ln D/D_R = \frac{D-D_R}{D_R} = 0$ и $D_R^{onm} = D$. Этот результат свидетельствует, что критерии K_3 и K_4 являются некорректными для данной постановки задачи. Таким образом, для оценки экономической эффективности и оптимальности стратегий поставарийного вмешательства при радиационных авариях предлагается

использовать критерии, эквивалентные K_1 и K_2 , основанные на оптимизации разности

сопутствующих ему выгод и издержек.

4. 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 него хода дезактивационных работ и природных процессов

В работе отмечено, что основные показатели, характеризующие экономический эффект от реабилитации загрязненных территорий, в частности, средняя по территории кратность снижения радиационного фона после дезактивации f и экономическая выгода от ее проведения $Q_{\rm des}^+$, используемые при выработке критериев вмешательства, зависят от

изменяющихся во времени и усредненных по территории параметров мощности дозы гамма-излучения (МЭД) $\dot{D}_R(t)$ при реализации мер дезактивации и $\dot{D}(t)$ – в условиях невмешательства. В работе предложено уточнить эти параметры с учетом хода работ по дезактивации и протекания в почве естественных процессов радиоактивного распада и заглубления радиоизотопов, а также влияния дезактивации на интенсивность заглубления. Учет естественных процессов особенно важен при длительной дезактивации обширных территорий, где они вносят заметный вклад в изменение радиационной обстановки.

Параметр $\dot{D}(t)$ в естественных условиях без вмешательства определяется процессами радиоактивного распада и заглубления в почве долгоживущих гамма-излучающих радиоизотопов ¹³⁴Cs и ¹³⁷Cs, характерных для большинства сценариев её радиационного загрязнения при авариях на АЭС, и описывается выражением (7):

$$\dot{D}(t) = \dot{D}(0) \cdot F_{\nu}(t) \cdot F_{\nu}(t), \tag{7}$$

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 (8):

$$F_r = \sum_{i} [\psi_i(0) \cdot \exp(-\lambda_i \cdot t)], \tag{8}$$

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, зависящий от химических свойств радиоактивных соединений и состояния почвы, учитывающий экспериментально установленную неравномерность во времени процесса заглубления радионуклидов в ней, описываемый выражением (9):

$$F_d(t) = a_1 \cdot \exp(-\frac{\ln 2}{\tau_1} \cdot t) + a_2 \cdot \exp(-\frac{\ln 2}{\tau_2} \cdot t), \qquad (9)$$

где τ_1 =1,5 года, τ_2 = 50 лет, а безразмерные коэффициенты a_1 и a_2 подбираются индивидуально для каждого сценария аварийного загрязнения на основании натурных измерений параметров радиационной обстановки в динамике.

Параметр $\dot{D}_R(t)$ для обширной неоднородной территории, на каждом малом участке которой последовательно проводятся дезактивационные процедуры с эффективностью f' по снижению МЭД (f' может быть достоверно установлена путем измерений МЭД на месте, в отличии от f), описывается выражением (10):

$$\dot{D}_{R}(t) = \begin{cases}
\dot{D}(t), & 0 \le t \le T_{1} \\
\dot{D}(t) \cdot (1 - \frac{t - T_{1}}{T_{2} - T_{1}}) + \frac{1}{T_{2} - T_{1}} \cdot \int_{T_{1}}^{t} \frac{\dot{D}(0)}{f'} \cdot F_{r}(t) \cdot F_{d}(t + t_{R}) \cdot \frac{F_{d}(x)}{F_{d}(t_{R})} dx, & T_{1} < t < T_{2}, \\
\frac{1}{T_{2} - T_{1}} \cdot \int_{T_{1}}^{T_{2}} \frac{\dot{D}(0)}{f'} \cdot F_{r}(t) \cdot F_{d}(t + t_{R}) \cdot \frac{F_{d}(x)}{F_{d}(t_{R})} dx, & T_{2} < t
\end{cases} (10)$$

где T_1 и T_2 — моменты начала и завершения дезактивации на всей территории, лет; t_R — параметр, характеризующий изменение интенсивности заглубления из-за проведения дезактивации, лет (устанавливается экспериментально по результатам измерений МЭД. Для дезактивации в пр. Фукусима (Япония), t_R установлен равным 8 годам).

На основании результатов дезактивации в муниципалитете Тамура (пр. Фукусима) в 2012-2017 гг. на рисунке 1 представлены сравнительные графики спада усредненной по территории величины МЭД с учетом дезактивации (функция (10)) и без нее (функция (7)).

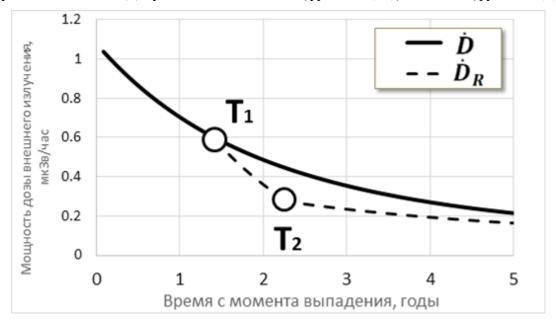


Рисунок 1 — Сравнительные графики динамики усредненной по территории мощности дозы без дезактивации \dot{D} и с дезактивацией \dot{D}_R

Уточненные формулы (9)-(10) позволяют оценить экономическую выгоду $Q_{\partial e_3}^+$ от дезактивации территории, определяемую снижением стоимостного ущерба здоровью населения за период проживания $[t_1; t_2]$, и среднюю эффективность f дезактивации для всей территории, которые определяются выражениями (11) и (12):

$$Q_{\partial e_3}^+ = \mathcal{G} \cdot N \cdot K \cdot \int_{t_1}^{t_2} \left(\dot{D}(t) - \dot{D}_R(t) \right) dt , \qquad (11)$$

$$f = \dot{D}(\tau) / \dot{D}_R(\tau), \tag{12}$$

где τ — момент времени после завершения дезактивации на всей территории; K — безразмерный фактор экранирования, учитывающий нахождение людей в зданиях.

5. Определены условия рациональности стратегий вмешательства на радиационно загрязненных территориях и найдены решения задачи их оптимизации

В работе определены условия эффективности различных сценариев реализации мер поставарийного вмешательства на основании принципа обеспечения превышения приобретаемых выгод над издержками. Для сценария проведения дезактивации загрязненных территорий без отселения жителей условия его эффективности по величине средней ожидаемой индивидуальной предотвращаемой дозы $\Delta D = D - D_R$ за конкретный период к моменту T и мощности эквивалентной дозы гамма-излучения (МЭД) $\dot{D}(T_1)$ на момент принятия решения определяются выражениями (13)-(14):

$$\Delta D \ge \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Q^{-}}{\mathcal{G} \cdot N}; \tag{13}$$

$$\dot{D}(T_1) \ge \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Q^{-}}{g \cdot N \cdot k_0(T_1, T)} \cdot \frac{f}{f - 1}, \tag{14}$$

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

где $c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f$ — приближение функции затрат на проведение дезактивации территории с эффективностью f, ед. валюты; f — безразмерное среднее по территории относительное изменение МЭД в результате проведения дезактивации; c_{f_0} — затраты на дезактивацию территории с эффективностью f_0 , ед. валюты; Q^- — ущерб от облучения задействованного персонала, ед. валюты; μ — фактор ослабления интенсивности излучения со временем за счет естественных процессов (допускается использовать для периода наблюдения до 5 лет), лет $^{-1}$; T_1 и T_2 — моменты начала (принятия решения) и завершения дезактивации на территории, лет.

Условия (13)-(14) свидетельствуют, что дезактивация в экономически развитых и богатых странах и регионах, где параметр g традиционно высокий, при прочих равных условиях будет более экономически оправдана, чем в менее благополучных.

Условия эффективности стратегии дезактивации для величин изначальной и остаточной после дезактивации доз облучения населения будут иметь вид (15)-(16):

$$D \ge \frac{c_e}{g \cdot N} \cdot \frac{f_D}{f_D - 1} \cdot \ln(f_D); \tag{15}$$

$$D_{R} \ge \frac{c_{e}}{\mathcal{G} \cdot N} \cdot \frac{1}{f_{D} - 1} \cdot \ln(f_{D}), \tag{16}$$

где $f_D = D/D_R$ — кратность снижения средней индивидуальной дозы облучения; обозначение c_e аналогично приведенному для выражений (1)-(4).

Для сценария проведения эвакуации с одновременной дезактивацией территории условия эффективности по параметру ΔD аналогичны (13), а по $\dot{D}(T_1)$ имеют вид (17):

$$\dot{D}(T_1) \ge \frac{c_{f_0} \cdot \log_{f_0} f + Q^{-}}{g \cdot N \cdot (\frac{1 - \exp(-\mu T_1)}{\mu} + \frac{f - 1}{f} \cdot \frac{\exp(-\mu T_1) - \exp(-\mu T)}{\mu})},$$
(17)

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

Условия для этих же параметров, обеспечивающие обоснованность решения о постоянном отселении без проведения дезактивации, характеризуются выражениями (18)-(19):

$$\Delta D \ge \frac{Q^{-}}{g \cdot N} \,; \tag{18}$$

$$\dot{D}(T_0) \ge \frac{Q^- + D_{bg}(T) \cdot \mathcal{G} \cdot \mathbf{N}}{\mathcal{G} \cdot \mathbf{N}} \cdot \frac{\mu}{1 - \exp(-\mu T)},\tag{19}$$

где Q^- — затраты, связанные с процедурой отселения, потерей основных фондов и отчуждением территорий, ед. валюты; T_0 — момент начала отселения, лет; $D_{bg}(T)$ — средняя индивидуальная доза жителя в отселении в условиях естественного фона к моменту T , 3в.

Оценка оптимальной величины остаточной дозы облучения населения для сценария дезактивации без отселения за первый год после ее завершения получена в форме (6). Для сценария дезактивации с одновременной эвакуацией жителей она, в общем случае, может быть определена выражением (20):

$$D_R^{onm} = \frac{c_e}{g \cdot N} \cdot (1 + q^-), \qquad (20)$$

где q^- — безразмерная поправка, учитывающая затраты на обеспечение эвакуации и сопутствующие ей экономические издержки в сравнении с затратами на дезактивацию.

В работе также представлены варианты уточнения полученных результатов, учитывающие в составе выгод и издержек компенсационные выплаты либо другие формы покрытия персонального ущерба населению $c_{npoж}(T)$ из-за изменения условий проживания в течение времени T, вызванного радиационным загрязнением территории либо ухудшением социально-экономических условий из-за реализации мер вмешательства. Задача такой компенсации заключается в соблюдении социальной справедливости и предотвращении миграции населения. На практике она может выражаться в форме денежных выплат, льгот, затрат на улучшение условий проживания, в том числе, затрат на реабилитацию территории.

В исследовании обоснована необходимость учитывать в балансе выгод и издержек дополнительный ущерб $C_{{\scriptscriptstyle HPD}}$, обусловленный повышением нерадиационных заболеваемости, вызванных проведением защитных мероприятий введением или ограничительных мер в экономике. Это предложение базируется на результатах исследований, демонстрирующих рост заболеваемости диабетом у жителей префектуры Фукусима, переживших эвакуацию, в сравнении с контрольной группой жителей, для которой в аналогичных условиях эвакуация не проводилась. На реальных данных показано, что нерадиационные риски и ущербы для здоровья населения при проведении эвакуации могут в десятки раз превосходить потенциальные риски и ущерб от радиационных эффектов, обусловленных облучением в малых дозах. При обосновании мер вмешательства в разных странах оценки ущербов c_{npose} и c_{nep} предложено ставить в зависимость от благосостояния государства, показателей ВВП и ВНД территории, где произошла авария.

Кроме того, автором предложены альтернативные процедуры принятия решений по вмешательству, базирующиеся на попарном сравнении его конкурирующих сценариев на этапах реализации стратегии ликвидации последствий радиационной аварии, где невмешательство рекомендуется рассматривать как самостоятельный сценарий и учитывать его экономический эффект Q_{neem} в соответствии с выражением (21):

$$Q_{\text{\tiny HEGM}} = -\sum_{i} \Delta D_{i}^{k}(T) \cdot \mathcal{G}_{i} - N \cdot c_{\text{\tiny NDOMC}}(T), \qquad (21)$$

где $N \cdot c_{npose}$ (T) — совокупный ущерб от облучения N жителей за период наблюдения T, ед. валюты; $\sum_i \Delta D_i^k(T) \cdot \mathcal{G}_i$ — прогнозируемый ущерб здоровью от коллективного облучения с дозой ΔD_i^k по i-ой группе населения за период наблюдения T, ед. валюты. На основе этого подхода в работе предложены выражения для расчета величины экономического эффекта для сценариев, когда в качестве альтернативы невмешательству рассматривается эвакуация и

отселение, а альтернативой дезактивации с реабилитацией территории и возвращением населения из эвакуации служит долгосрочное отселение.

6. Разработана информационная система оценки социальноэкономической и радиационной ситуации в зонах потенциального аварийного радиационного загрязнения, обеспечивающая сбор, хранение и первичную обработку актуальных данных, верифицированная для территорий, пострадавших при аварии на АЭС «Фукусима-1», на период 2011-2017 гг.

В работе отмечено, что экономическая обоснованность оценок эффективности вмешательства при ликвидации последствий радиационных аварий напрямую зависит от полноты и достоверности исходной информации о радиационной и социально-экономической обстановке на загрязненных территориях. Располагаемая на практике информация, как правило, этим требованиям не соответствует из-за неактуальности, неполноты, отсутствия единого формата хранения данных и объединяющей их структуры. Для устранения данного недостатка предложено применять специализированные информационные системы основе геоинформационных систем (ГИС) и систем управления базами данных (СУБД) для сбора, хранения и анализа информации, свойственной ситуации аварийного радиационного загрязнения территории, при принятии решений по их реабилитации и защите населения с учетом сопутствующих экономических выгод и издержек. Общая схема организации такой системы представлена на рисунке 2.

На базе рассмотренной структуры была разработана информационная система для оценки социально-экономических и радиационных последствий, а также эффективности реализованных мероприятий по защите населения и реабилитации пострадавших от загрязнения территорий префектуры Фукусима в результате радиационной аварии на АЭС «Фукусима-1». Для ее наполнения были агрегированы и структурированы на регулярной пространственной сетке с разрешением 100×100 м по всей территории префектуры актуальные данные из открытых официальных источников по демографии, экономике, землепользованию, радиационной обстановке и зонам проведения поставарийных мероприятий в период 2011-2017 гг. Полученные с ее помощью оценки выгод, затрат и ущербов к 2017 г. от реализации поставарийных мероприятий на территории префектуры Фукусима представлены в таблице 3.

Выгоды от предотвращения облучения за счет проведения эвакуации, отселения жителей и дезактивации территорий оценены на основе значений потенциальных коллективных доз облучения жителей, проживавших в зонах проведения этих мероприятий.

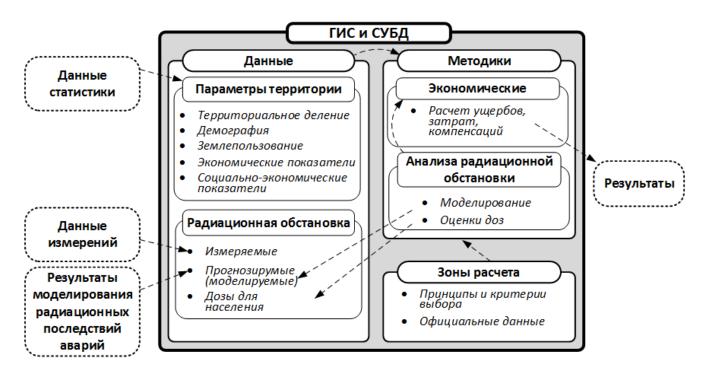


Рисунок 2 — Общая схема организации информационной системы для анализа последствий радиационных аварий

Таблица 3 – Оценки затрат, ущербов и выгод при реализации мероприятий на территории префектуры Фукусима

Статья затрат, ущербов или выгод	Сумма	
	(коллективная доза)	
Максимальный потенциальный ущерб для здоровья населения от аварии	\$0,5-7,7 млрд	
в долгосрочной перспективе (75-летний период)	(13,5 тыс. челЗв)	
Недополученный доход из-за проведенной эвакуации и отселения за 2011-2017 гг.	\$41,5 млрд	
Денежные компенсации жителям, временно пребывавшим в эвакуации в 2011-2017 гг.	\$4,4 млрд	
Потери недвижимости из-за отселения	\$0,91 млрд	
Затраты на проведение дезактивации	\$12 млрд	
Суммарные затраты и ущербы по префектуре Фукусима из-за эвакуации и дезактивации за 2011-2017 гг.	\$58,8 млрд	
Выгоды от снижения доз облучения за 2011-2017 гг. за счет эвакуации и	\$0,23-3,5 млрд	
отселения жителей	(6,0 тыс. челЗв)	
Выгода от снижения доз облучения за счет временной эвакуации,	\$58-880 млн	
действовавшей в период с 2011 г. по 2014-2017 гг.	(1,53 тыс. челЗв)	
Долгосрочные потенциальные выгоды от снижения доз облучения за	<\$11-170 млн	
счет проведенной дезактивации	(<300 челЗв)	
Максимальная совокупная выгода от проведения эвакуации, отселения и дезактивации территорий в префектуре Фукусима до 2017 г.	\$3,7 млрд	

На основании полученных оценок были сделаны следующие заключения:

- предпринятые меры поставарийного вмешательства позволяют на 91% (46,6% в период 2011-2017 гг. и 44,4% в последующем долгосрочном периоде) сократить дозы облучения населения, вызванные загрязнением территории префектуры Фукусима;
- издержки вмешательства в 16 и более раз превысили потенциальный радиационный ущерб от загрязнения территорий, который оценен в \$0,5-7,7 млрд, в зависимости от выбора методики расчета;
- выгода от временной эвакуации жителей оказалась значительно ниже суммы компенсаций, выплаченных им за этот период;
- затраты на дезактивацию многократно превысили выгоды от предотвращаемого
 за ее счёт ущерба от облучения жителей в долгосрочном периоде;
- совокупные затраты и ущербы от проведения эвакуации, отселения и дезактивации в префектуре Фукусима к концу 2017 г. оценены в \$58,8 млрд (\$70,2 млрд в сумме с затратами на дезактивацию за пределами префектуры Фукусима).

Полученные оценки в целом свидетельствуют, что реализацию мероприятий по защите населения и реабилитации территорий в префектуре Фукусима следует считать экономически неэффективной, так как из-за неоптимального планирования зон эвакуации и несвоевременного возвращения из нее населения выгоды от их реализации оцениваются значительно ниже сопутствующих издержек. Причиной чрезмерных экономических потерь при осуществлении стратегии защиты населения и реабилитации территорий в префектуре Фукусима следует считать недостаточный учет социальных и экономических эффектов при оценке выгод и издержек вмешательства.

7. Предложены рекомендации по рационализации сценария поставарийного вмешательства в префектуре Фукусима

В работе оценены ожидаемые экономические эффекты от проведения долгосрочной эвакуации с последующим отселением, как наиболее затратного вида вмешательства, на территории префектуры Фукусима в зонах, определяемых по критерию ожидаемой дозы облучения жителей от 20 до 80 мЗв за первый год после аварии и сопоставлены с эффектами от проведенных в 2011 г эвакуации и отселения. Эвакуация в этих условиях, в соответствии с указаниями МКРЗ 103, является рекомендуемой, но не обязательной мерой. В качестве сопутствующих ущербов рассматриваются потери доходов, которые должны быть компенсированы жителям при длительной эвакуации или отселении, а также потери недвижимости из-за отселения.

Результаты свидетельствуют, что проведение эвакуации по критериям 20 м3в/год и 50 м3в/год (с учетом поправки K=0,4 из формулы (11) на экранирование внешнего излучения в населенных пунктах), допускаемой с учетом международных норм обеспечения радиационной безопасности, позволило бы снизить издержки до 35% и 6% соответственно, без критического увеличения радиационного риска для населения (см. таблицу 4). Данные выводы относятся только к эвакуации или отселению после прекращения процесса радиационного загрязнения территории.

Таблица 4. Социально-экономические параметры территорий в префектуре Фукусима, выделенных по уровню индивидуальной дозы гамма-облучения за 1-й год после аварии

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 эвакуации и отселения 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

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертации предложены методологические подходы и методы для обоснования эффективных стратегий реализации мероприятий по защите населения и реабилитации радиационно загрязненных территорий в результате аварий на объектах атомной энергетики, основанные на сопоставлении сопутствующих экономических выгод и издержек.

Предложенные подходы и методы верифицированы 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.

Предлагаемые в исследовании решения могут использоваться на этапе планирования стратегии вмешательства при ликвидации последствий радиационных аварий на действующих объектах атомной энергетики в целях повышения его эффективности и снижения необоснованных социальных и экономических потерь.

IV. СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых научных изданиях:

- 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 0,53 п.л.
- 2 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 // Радиация и Риск. Москва : 2019. Т. 28. № 2. С. 75-86 0,69 п.л. (авторских 0,66 п.л.).
- 3 Арон, Д. В., Методы анализа эффективности дезактивации территории префектуры Фукусима (Япония) / Д. В. Арон // Статистика и экономика. Москва : -2017. Т. 14. № 3. С. 114-124. ISSN:2500-3925. 0.53 п.л.
- 4 Арон, Д. В., Тихомиров Н. П. 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. 0,28 п.л. (авторских 0,06 п.л.).
- 5 Aron, Dmitry V. Tikhomirov Nikolay P. 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. Petrovac. Montenegro. : 2017. PP. 556-561, ISSN 1613-0073, 0,44 п.л. (авторских 0,22 п.л.).
- 6 Арон, Д. В., Тихомиров Н. П., 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. 0,48 п.л. (авторских 0,12 п.л.).
- 7 Арон, Д. В., Тихомиров Н. П. 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. 0,43 п.л. (авторских 0,09 п.л.).

- 8 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. 0,43 п.л. (авторских 0,41 п.л.).
- 9 Арон, Д. В. Анализ последствий эвакуации населения при аварии на АЭС «Фукусима-1» / Д. В. Арон // Экономика природопользования. 2015. № 3. С. 122-131. 0,48 п.л.
- 10 Арон, Д. В., Павлова М. В., Панченко С. В. Оценки масштаба социальноэкономических последствий аварии на АЭС в префектуре Фукусима / Д. В. Арон, М. В. Павлова, С. В. Панченко // Энергетика. Известия Российской академии наук. -2013. - № 5. - C.65-71. -0.37 п.л. (авторских -0.29 п.л.).
- 11 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. Вып. 3. С. 163-168. 0,37 п.л. (авторских 0,33 п.л.).
- 12 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 = THE ANALYSIS OF RADIOLGICAL, SOCIAL AYD ECONOMIC CONSEQUENCES OF ACCIDENT ON NPP IN FUKUSHIMA PREFECTURE / Д. В. Арон, Р. В. Арутюнян, Л. А. Большов и др. // Проблемы безопасности и чрезвычайных ситуаций = Safety and emergencies problems. -2012. -№ 3. C. 97-108. 0.44 п.л. (авторских 0.31 п.л.).

Статьи в других научных изданиях:

13 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. – 0,54 п.л. (авторских – 0,27 п.л.).