



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра природопользования и устойчивого развития полярных областей

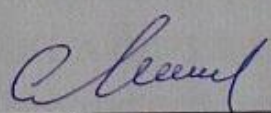
ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
Магистерская диссертация

На тему Оценка потенциальной опасности Ленинградской АЭС

Исполнитель Сандимиров Сергей Борисович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доктор биологических наук
(ученая степень, ученое звание)

Витковская Светлана Евгеньевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой 
(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Макеев Вячеслав Михайлович
(фамилия, имя, отчество)

«6» июня 2017г.

Санкт-Петербург
2017

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	4
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ.....	9
ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМА ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ.....	10
1.1. Понятия, принципы и нормы радиационной безопасности в системе оценки риска чрезвычайных ситуаций.....	12
1.1.1. Основные понятия радиационной безопасности.....	12
1.1.2. Принципы и задачи радиационной безопасности.....	17
1.1.3. Нормирование в радиационной безопасности.....	20
1.1.3.1. Проблемы нормирования малых доз радиации.....	25
1.2. Механизм биологического воздействия ионизирующих излучений.....	30
1.3. Обеспечение радиационной безопасности на объектах атомной энергетики.....	33
1.4. Проблемы образования отходов ядерного топливного цикла.....	37
ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	45
2.1. Объекты исследования.....	45
2.2. Методы исследования.....	47
ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС.....	50
3.1. Воздействие Ленинградской АЭС на окружающую среду при работе в штатном режиме.....	52
3.1.1. Оценка содержания техногенных радионуклидов в почве на территории Ленинградской АЭС.....	58
3.1.2. Нерadiационные факторы воздействия Ленинградской АЭС на Копорскую губу Финского залива.....	65

3.1.2.1. Тепловое воздействие на Копорскую губу в районе размещения Ленинградской АЭС.....	68
3.1.2.2. Химическое воздействие на Копорскую губу в районе размещения Ленинградской АЭС.....	72
3.2. Обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом на Ленинградской АЭС.....	74
3.2.1. Важнейшие направления решения проблем накопления радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива на Ленинградской АЭС.....	78
ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....	83
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	87

ВВЕДЕНИЕ

Переход человеческой культуры в постиндустриальную эпоху и нарастающие процессы глобализации в конце второй половины XX века поставили общество перед задачами глобального масштаба, среди которых доминирующее положение заняла проблема энергетики. Стремительно нарастающая зависимость человечества от традиционных энергоресурсов, таких как природный газ, каменный уголь и нефть, борьба за контроль над ними, энергетические кризисы – все это потребовало принципиально новых решений для механизмов переработки природных ресурсов в электроэнергию.

Структура электроэнергетики во второй половине XX века пополнилась различными альтернативными источниками энергии. Среди них достойным конкурентом традиционным энергоресурсам стала атомная энергетика.

Спустя более чем полвека после запуска первой АЭС, атомная энергетика действительно совершила революцию на рынке электроэнергии, заняв значительную долю в нем (рис. 1). По состоянию на 02.05.2017 в мире насчитывается 447 энергоблоков установленной мощностью 392 ГВт, строятся еще 59 и планируется 170 [95].

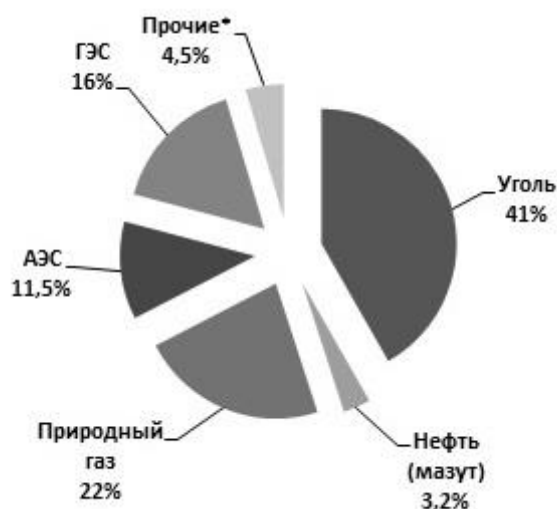


Рис. 1. Структура генерации электроэнергии в мире по видам топлива [92]

Однако, несмотря на конкурентные преимущества и большой потенциал, мирный атом в своем развитии столкнулся с рядом проблем, связанных со специфическим явлением радиоактивности. В формирующейся радиофобии важную роль сыграл тот еще факт, что процесс деления ядер урана изначально изучался для создания мощнейшего оружия в истории человечества [5, с. 7].

Атомная энергетика имеет свои специфические аспекты влияния на природную среду. На ее развитие оказывает влияние целый спектр объективно существующих факторов: экологических, экономических, социальных, медико-биологических, психологических, региональных факторов риска.

Едва было предотвращено оплавление активной зоны реактора на американской АЭС Три Майл Айленд (Three Mile Island) в 1979 году, но не удалось избежать глобальной экологической катастрофы и человеческих жертв после аварий на Чернобыльской АЭС в 1986 году и на «Фукусиме-1» в 2011 году. Не смотря на то, что сегодня ни в структуре энергетики, ни в какой-либо другой промышленной отрасли, не уделяется столько внимания вопросам технического обеспечения безопасности и регламентации нормативов, как в атомной энергетике, статистический анализ рисков аварий прошлых лет диктует свои аспекты дальнейшего развития: некоторые страны отказываются от атомной энергетики в пользу традиционных энергоресурсов. Помимо отсутствия эффективных решений для исключения возникновения подобных рисков в будущем, острые дебаты ведутся вокруг экономической эффективности атомной энергетики и экологической безопасности, нелегального распространения ядерных материалов, проблемы утилизации ядерных отходов и оценки воздействия атомной энергетики на окружающую среду и здоровье человека при работе в штатном режиме [36, 94].

Но, несмотря на это, атомная энергетика обладает рядом таких же объективных преимуществ перед традиционными энергоресурсами:

- Запасы углеводородов и каменного угля не только гиперболически истощаются, но и используется некомплексно. В то же время доказанные запасы ^{235}U не колеблются так часто, как запасы нефти,

природного газа и угля, что формирует значительную стабильность цен на уран и дает гарантию обеспечения топливом атомной энергетики [5];

- Энергия, выделяемая в ядерных реакторах, несоизмеримо больше, чем в результате обычной химической реакции (например, сжигания), поэтому для выработки электроэнергии требуется на порядок меньше топлива. Например, 1 кг низкообогащенного урана (~4% ^{235}U) при полном расщеплении выделяет энергию, эквивалентную сжигаю примерно 100 т высококачественного каменного угля или 60 т нефти [36];
- Работа АЭС в штатном режиме сопровождается практически полным отсутствием вредных выбросов в окружающую среду. В первую очередь, это связано с тем, что на АЭС не происходит сжигание атмосферного кислорода – самоподдерживающаяся ядерная реакция обеспечивается делением ядер ^{235}U , а не химическими реакциями [44];
- Даже если разведанные запасы урана будут несоизмеримы с их потреблением, атомная энергетика не останется без топлива, так как ядерное топливо потенциально практически неисчерпаемый источник энергии. В реакторах на быстрых нейтронах посредством двух последовательных β -распадов облучают ^{238}U и ^{232}Th до ^{239}Pu и ^{233}U соответственно. ^{239}Pu и ^{233}U рассматриваются как вторичное ядерное топливо [63].

В нашей стране вопрос развития атомной энергетики является одним из наиболее актуальных для энергетики страны в целом. Россия является одним из лидеров в области технологий мирного атома. В стране действуют 10 АЭС: 35 энергоблоков установленной мощностью 26,8 ГВт, которые вырабатывают 18,6% всего производимого электричества в стране и 7,5% в мировой структуре атомной энергетики. При этом в Европейской части России доля атомной энергетики достигает 30%, а на Северо-западе – 37% [62]. Россия на своей

территории строит еще 7 энергоблоков, 25 планируется. Больше энергоблоков, чем Россия, строит только Китай [95].

В настоящей работе основное внимание уделяется одной из проблем эксплуатации АЭС: радиоактивного загрязнения природной среды в условиях нормальной работы. Работа АЭС в штатном режиме не исключает поступление в окружающую среду радиоактивных веществ [32]. Именно АЭС ответственны за регулярное поступление техногенных радионуклидов в воздух, воду и почву. Включаясь в биологические миграционные цепочки, они попадают в организм животных и человека, что приводит к формированию дополнительного (к естественному фону) источника облучения. Это определяет важность оценки содержания этих радионуклидов в почве, воде и воздухе на территории АЭС.

В России в рамках обеспечения радиационной безопасности подобная оценка проводится для всех атомных электростанций. Для Ленинградской АЭС исключительную важность оценки потенциальной опасности определяет, во-первых, ее географическое расположение на берегу Финского залива всего в 42 км от центра третьего по населению города Европы – Санкт-Петербурга; во-вторых, ее значимость для самого города – она обеспечивает 50% его энергопотребления. Помимо оценки радиационной безопасности Ленинградской АЭС для комплексной оценки потенциальной опасности важно изучить нерадиационные факторы воздействия на экосистемы, таких как, тепловое загрязнение (сброс подогретых вод), химическое загрязнение и биологическое загрязнение водоема-охладителя АЭС.

Цель данного исследования состоит в детальной оценке опасности воздействия на окружающую среду Ленинградской АЭС.

Исходя из поставленной цели, ставятся следующие **задачи** для ее достижения:

- рассмотреть теоретические основы радиационной безопасности в системе оценки воздействия радиационно-опасных объектов на окружающую среду и здоровье человека;
- проанализировать основные характеристики Ленинградской АЭС;

- проанализировать радиационные и нерадиационные факторы воздействия Ленинградской АЭС на окружающую среду при работе в штатном режиме;

Предметом исследования является воздействие атомной энергетики на окружающую среду.

Объектом исследования является импактная зона Ленинградской АЭС.

Теоретической и методической основой диссертационной работы выступают научные труды отечественных и зарубежных ученых и исследователей в области радиационной безопасности, радиобиологии, радиоэкологии, а также в области воздействия атомных электростанций на окружающую среду и здоровье человека.

Информационно-статистическую базу исследования составляют официальные публикации Министерства энергетики России, официальные отчеты по экологической безопасности Государственной корпорации «Росатом» и «Национального оператора по обращению с радиоактивными отходами». Были использованы материалы собственных экспериментальных исследований и материалы научно-исследовательских институтов, организаций и ведомств, занимающихся анализом электроэнергетики: Мировой ядерной ассоциации, Международного энергетического агентства, Всемирного энергетического совета, Массачусетского технологического института и др.

Объем и структура работы: работа изложена на 98 страницах компьютерного текста, состоит из введения, 3 глав, заключения, списка литературы, включающего 95 наименований, в том числе 16 на английском языке. Диссертация иллюстрирована 25 рисунками и 14 таблицами, не имеет приложений.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ СОКРАЩЕНИЙ

АСКРО – автоматизированная система контроля радиационной обстановки;

БВ – бассейн выдержки;

ВК – взвешивающие коэффициенты;

ЕРФ – естественный радиационный фон;

ЖРО – жидкие радиоактивные отходы;

ДВ – допустимый выброс;

ДЖН – долгоживущие радионуклиды;

КЖН – короткоживущие радионуклиды;

МАГАТЭ – Международное агентство по атомной энергии;

МБК – металлобетонные контейнеры;

МЗА – минимально значимая активность;

МЗУА – минимально значимая удельная активность;

МКРЗ – Международная комиссия по радиологической защите;

НКДАР ООН – Научный комитет ООН по действию атомной радиации;

НРБ – Нормы радиационной безопасности (СанПиН 2.6.1.2523-09);

ОЯТ – отработавшее ядерное топливо;

ПДД – предельно допустимая доза;

ПЗРО – пункт захоронения радиоактивных отходов;

РАО – радиоактивные отходы;

РБГ – радиоактивные благородные газы;

РБМК – реактор большой мощности канальный;

СЗЗ – санитарно-защитная зона;

ТВЭЛ – тепловыделяющий элемент;

ТРО – твердые радиоактивные отходы;

ХОЯТ – хранилище отработавшего ядерного топлива;

ХТРО – хранилище твердых радиоактивных отходов;

ЯТЦ – ядерный топливный цикл.

ГЛАВА 1. ПРОБЛЕМЫ ОБЕСПЕЧЕНИЯ РАДИАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Обобщая причины случившихся нештатных ситуаций и аварий прошлых лет на радиационно-опасных объектах, можно прийти к выводу, что существовали три основные причины: техническое несовершенство защитных систем ядерных реакторов, человеческий и природные факторы. Все эти факторы долгое время не изучались или изучались весьма слабо в рамках обеспечения радиационной безопасности, так как существовали специфические причины, связанные с первоначальными этапами изучения цепной ядерной реакции.

Начальные этапы исследований по радиоактивному распаду ядер урана мотивировались исключительно военными целями, так как «требовалось скорейшее наращивание ядерного потенциала страны, поэтому вопросами радиационной и экологической безопасности не уделялось должного внимания. Большой проблемой для обеспечения радиационной безопасности являлась также сверхзакрытость отрасли и недостаток научных исследований по воздействию ядерных технологий на здоровье человека и окружающую среду» [44, с. 7].

Ситуация изменилась с возникновением первых нештатных ситуаций на радиационно-опасных объектах и безмерным накоплением радиоактивных отходов. Методологическое развитие радиационной безопасности началось с бурным развитием атомной энергетики в 80-х годах.

Радиоактивное загрязнение окружающей среды может произойти в результате испытаний или применения ядерного оружия; аварий на атомных электростанциях и других радиационно-опасных объектах, имеющих ядерные энергетические установки; захоронения отходов ядерного топливного цикла, а также научно-исследовательских и медицинских центров; аварийных ситуаций

различной степени во время транспортировки радиоактивных материалов и т.д.[30, с. 4].

В рамках настоящей работы особенное внимание уделяется изучению обеспечения радиационной безопасности на радиационно-опасных объектах, работающих в нормальном режиме. К таковым, в первую очередь, относятся объекты атомной энергетики.

Очевидно, что по мере истощения ресурсов горючих полезных ископаемых, атомная энергетика будет приобретать все большее значение. В условиях молниеносного развития цивилизации постиндустриального общества человечество неизбежно столкнется с проблемой энергетического голода, если тенденции расхода углеводородного сырья будут сохраняться. В XXI веке среди альтернативных источников энергии только мощные АЭС смогут стать достойной прогрессивной заменой энергетике, работающей на традиционных энергоресурсах. В то же время история атомной промышленности знает драматические события, последствия которых не ликвидированы до настоящего времени. В связи с возрастающими надеждами на атомную энергетику несомненный интерес представляет систематизация сведений об обеспечении радиационной безопасности [5, 18, 36, 94].

«Специфическим фактором для атомной энергетики является создание и накопление искусственных радионуклидов, которые при определенных обстоятельствах могут поступать в окружающую среду» [25, с. 13]. Развитие ядерного производства потребовало извлечения колоссального количества радиоактивного сырья, которое способно на порядок повышать местный радиационный фон. Загрязнение радионуклидами биогеоценозов действует на популяции животных, которые длительно находились в условиях неизменного радиационного фона. При отсутствии контроля над распространением радионуклидов в биосфере неизбежно произойдут непредсказуемые генетические изменения в животном и растительном мире.

Вместе с тем ионизирующее излучение, возникающее при распаде радионуклидов, не является новым фактором в развитии биосферы. «Живые

организмы постоянно испытывают действие ионизирующего излучения. Любой живой организм немного радиоактивен, так как в любой живой ткани присутствуют в следовых количествах радиоактивные вещества» [25, с. 7]. Главной же целью науки радиационной безопасности является создание состояния защищенности от вредного техногенного ионизирующего излучения.

1.1 Понятия, принципы и нормы радиационной безопасности в системе оценки риска чрезвычайных ситуаций

1.1.1 Основные понятия радиационной безопасности

В соответствии с федеральным законом Российской Федерации «О радиационной безопасности населения» от 9 января 1996 года N 3-ФЗ, «радиационная безопасность – это состояние защищенности настоящего и будущего поколений людей от вредного для их здоровья воздействия ионизирующего излучения» [91].

Радиоактивность (от лат. *radio* – излучаю, *radius* – луч, *activus* – действенный) – самопроизвольное (спонтанное) превращение нестабильных атомных ядер в другие ядра, сопровождающееся выделением энергии в виде электромагнитного излучения (гамма- и рентгеновское излучение) и корпускулярных частиц (альфа-, бета-, нейтронное, позитронное излучение) [44, с. 8].

Радиоактивные излучения, происходящие в природе без внешнего воздействия, называются естественной радиоактивностью, а в искусственно полученных под воздействием альфа- и нейтронного излучений веществах (с помощью ядерных реакций) – искусственной или наведенной радиоактивностью [2, с. 15].

Ядерная реакция – превращение атомных ядер, вызванное их взаимодействием с элементарными частицами, в том числе гамма-квантами, или друг с другом [44, с. 10].

Цепная ядерная реакция – последовательность ядерных реакций, в которых один из реагентов, необходимых для поддержания этой последовательности, воспроизводится в этих же реакциях [44, с. 11].

Скорость распада радиоактивных веществ постоянна и равна [44, с. 13]:

$$A = \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

где

A – активность (число распадов в единицу времени);

N – число ядер;

t – время;

λ – радиоактивная постоянная, равная доле ядер, распадающихся в единицу времени.

Это основной закон радиоактивного распада, показывающий его экспоненциальный характер.

Период полураспада ($T_{1/2}$) - это время, в течение которого система радиоактивных элементов распадается в примерном отношении $\frac{1}{2}$ [44, с. 13]. В табл. 1 приведены характеристики самых распространенных в природе изотопов.

Таблица 1. Характеристики некоторых природных изотопов [44, с. 14]

Изотоп	$T_{1/2}$, лет	Доля в природной смеси изотопов, %
^{238}U	$4,5 \cdot 10^9$	99,28
^{235}U	$7,0 \cdot 10^8$	0,71
^{234}U	$2,4 \cdot 10^8$	0,0054
^{232}Th	$1,4 \cdot 10^{10}$	~ 100
^{40}K	$1,3 \cdot 10^9$	0,0117
^{87}Rb	$4,9 \cdot 10^{10}$	5,6

^{147}Sm	$1,6 \cdot 10^{11}$	15,07
-------------------	---------------------	-------

Активность – мера радиоактивности какого-либо количества радионуклида, находящегося в данном энергетическом состоянии в данный момент времени. Активность равна отношению числа самопроизвольных ядерных превращений в этом источнике за малый интервал времени (dN) к величине этого интервала (dt) [66, с. 1]:

$$A = \frac{dN}{dt}$$

В системе СИ активность измеряется в беккерелях (Бк), соответствующего одному распаду в секунду.

Для обеспечения радиационной безопасности большое значение имеют следующие меры, основанные на значении активности: активность удельная (объемная), активность минимально значимая (МЗА) и активность минимально значимая удельная (МЗУА).

Активность удельная – отношение активности радионуклида в веществе к массе (объему) вещества. Единица измерения – Бк/кг, или Бк/м³ [66, с. 1].

Активность минимально значимая (МЗА) – активность открытого источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которого требуется разрешение органов государственной санитарной-эпидемиологической службы на использование такого источника [66, с. 1].

Активность минимально значимая удельная (МЗУА) – удельная активность открытого источника ионизирующего излучения в помещении или на рабочем месте, при превышении которого требуется разрешение государственной санитарной-эпидемиологической службы на использование такого источника [66, с. 1].

Доза поглощенная – величина энергии ионизирующего излучения, которая была передана веществу. Единица измерения – грей (Гр) = Дж·кг⁻¹ [66, с. 2-3].

Для человека смертельной дозой будет является величина 6 Гр, равная 6 Дж/кг (количество энергии, заключенное в стакане горячего чая). Для сравнения смертельная доза для бактерий на порядок больше - ~ 100 Гр [44, с. 42].

Доза поглощенная не в полной мере демонстрирует реальное воздействие ионизирующего излучения на живой организм. Разные виды ионизирующих излучений при одинаковых дозах создают разное воздействие на организм. Это обусловлено неодинаковой плотностью ионизации – удельной ионизацией. Чем выше удельная ионизация, тем больше эффект биологического действия облучения. Одна и та же поглощенная доза различных видов ионизирующего излучения приводит к разной степени поражения организма. Для того, чтобы учитывать этот фактор, введены так называемые взвешивающие коэффициенты (ВК) ионизирующих излучений [2, с. 24].

В соответствии с СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности» (НРБ-99/2009) [84] установлены следующие средние значения взвешивающих коэффициентов для ионизирующих излучений:

- фотоны любых энергий – 1;
- электроны и мюоны любых энергий – 1;
- протоны с энергией более 2 МэВ -5;
- нейтроны с энергией:
 - менее 10 кэВ медленные, тепловые и промежуточные) – 5;
 - от 10 до 100 кэВ – 10;
 - от 100 кэВ до 2 МэВ (быстрые) – 20;
 - от 2 МэВ до 20 МэВ (быстрые) – 10;
 - более 20 МэВ (быстрые) – 5;
 - альфа-частицы, осколки деления, тяжелые ядра – 20.

С учетом взвешивающих коэффициентов для оценки биологической эффективности различных видов ионизирующего излучения введено понятие эквивалентной дозы. Ее значение равно дозе поглощенной, умноженной на

взвешивающий коэффициент. Единица измерения в системе СИ – зиверт (Зв) [44, с. 42].

$$D_{\text{экв.}} = D_{\text{полг.}} \cdot \text{ВК}$$

Но для полной оценки биологического воздействия ионизирующего излучения необходимо также учитывать факт разной чувствительности тканей организма человека. Для случаев неравномерного облучения разных органов или тканей человека введено понятие эффективной эквивалентной дозы. Ее значение равно произведению эквивалентной дозы на взвешивающий коэффициент для тканей и органов (табл. 2) [44, с. 42].

$$D_{\text{эфф.}} = D_{\text{экв.}} \cdot w$$

Таблица 2. Взвешивающие коэффициенты для тканей и органов (w) [84]

Орган или ткань	w
Гонады	0,20
Толстый кишечник	0,12
Желудок	0,12
Красный костный мозг	0,12
Легкие	0,12
Грудная железа	0,05
Мочевой пузырь	0,05
Печень	0,05
Щитовидная железа	0,05
Пищевод	0,05
Кожа	0,01
Поверхность кости	0,01
Весь организм	1

Для повышения эффективности обеспечения радиационной безопасности используются еще два ключевых понятия: годовая и коллективная эффективные эквивалентные дозы.

Годовая эффективная эквивалентная доза – это сумма эффективной эквивалентной дозы внешнего облучения, полученной за календарный год, и ожидаемой дозы внутреннего облучения, обусловленной поступлением за этот же год в организм радионуклидов. Единица измерения – зиверт (Зв) [2, с. 25].

Коллективная эффективная эквивалентная доза – это мера коллективного риска возникновения стохастических эффектов облучения, равная сумме индивидуальных коллективных доз. Единица измерения – человеко-зиверт (чел.-Зв) [2, с. 26].

1.1.2 Принципы и задачи радиационной безопасности

Защита населения при чрезвычайных ситуациях - это комплекс мероприятий, имеющих цель не допустить неблагоприятного воздействия чрезвычайных ситуаций или максимально ослабить степень их воздействия. Эффективность защиты населения достигается на основе учета принципов обеспечения безопасности в чрезвычайных ситуациях и наилучшего использования всех средств и способов [4, с. 135].

По признаку реализации принципов обеспечения безопасности их можно разделить на три группы: заблаговременная подготовка, дифференцированный подход и комплексность мероприятий [4, с. 135].

- Заблаговременная подготовка предполагает, прежде всего, накопление средств защиты (коллективных и индивидуальных) от опасных и вредных факторов и поддержание их в готовности для использования населением;
- Дифференцированный подход предполагает, что характер и объем защитных мероприятий устанавливается в зависимости от вида источников опасных и вредных факторов, а также от местных условий;
- Комплексность мероприятий заключается в эффективном применении средств и способов защиты от последствий

чрезвычайных ситуаций и их согласованном осуществлении со всеми мероприятиями по обеспечению безопасности в ЧС.

Обеспечение радиационной безопасности – одна из ключевых составляющих частей обеспечения безопасности населения стран, где используются объекты атомной энергетики и ядерного топливного цикла. Главная цель радиационной безопасности – охрана здоровья населения и персонала от вредного воздействия ионизирующего излучения. Для достижения этой цели преследуются основные принципы и нормы радиационной безопасности без необоснованных ограничений полезной деятельности в различных областях хозяйства, в науке и медицине. Радиационная безопасность использует все выше перечисленные принципы, но в случае нормальной работы радиационно-опасных объектов (отсутствие ЧС), ключевое значение имеет заблаговременная подготовка и дифференцированный подход. В связи с этим, обеспечение радиационной безопасности при нормальной эксплуатации всех радиационно-опасных объектов обеспечивается следующими основными принципами [7, 91]:

- не превышать допустимые пределы индивидуальных доз облучения граждан от всех источников излучения (принцип нормирования);
- в случае, если использование источника ионизирующего излучения влечет за собой риск возможного вреда больший, чем полученная польза для человека и общества, то все виды деятельности с этим источником ионизирующего излучения необходимо запретить (принцип обоснования);
- принцип оптимизации основывается на поддержании на максимально возможном низком и достижимом уровне индивидуальных доз облучения и числа облучаемых лиц при использовании любого источника излучения, учитывая при этом экономические и социальные интересы;

Радиационная безопасность населения обеспечивается при соблюдении следующих условий [7]:

- создание условий жизнедеятельности людей, отвечающих требованиям НРБ-99/2009 [84];
- установление квот на облучение от разных источников излучения;
- эффективное планирование и проведение мероприятий по радиационной защите в нормальных условиях и в случае радиационной аварии;
- организация системы информации о радиационной обстановке.

Для оценки радиационной обстановки используются методы прогнозирования и данные разведки (данные радиационного дозиметрического контроля (РДК), производимого на местности).

Для оценки радиационной обстановки решаются следующие задачи [30, с. 6]:

- определение масштабов (зон) радиационного заражения;
- определение характера радиационного заражения, то есть расчет доз или уровня радиации;
- анализ радиационной обстановки и выбор наиболее целесообразных вариантов действий, при которых исключается радиационное поражение персонала, бойцов ВС, ГО, МЧС, спецподразделений и населения.

Радиационной обстановкой называют совокупность последствий радиоактивного загрязнения местности [30, с. 4].

Интенсивное развитие индустрий атомной энергетики и ядерно-оружейного цикла и широкое применение источников ионизирующего излучения в промышленности и медицине требует анализа риска возникновения радиационных аварий. Нормирование и ограничения в случае внештатных ситуаций на радиационно-опасных объектах требуют особенно жесткой регламентации и определенных принципов.

При аварии или обнаружении радиоактивного загрязнения ограничения облучения осуществляется защитными мероприятиями, которые применяются к окружающей среде и человеку. Последствиями этих мероприятий могут быть

нарушения нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории. Подобное вмешательство может повлечь за собой не только экономический ущерб, но и неблагоприятное воздействие на здоровье и психическое состояние населения. Поэтому при принятии решений о характере защитных мероприятий следует руководствоваться следующими принципами [7; 44, с. 101]:

- должны быть предприняты все возможные меры, чтобы предупредить лучевые поражения (эффекты), при этом дозы облучения у всех лиц из населения должны удерживаться ниже порога этих эффектов;
- предлагаемое вмешательство должно принести обществу и, прежде всего, облучаемым лицам больше пользы, чем вреда, то есть уменьшение ущерба от снижения дозы должен быть достаточным, чтобы оправдать вред и стоимость вмешательства, включая социальный аспект (принцип обоснования вмешательства);
- форма, масштаб и длительность вмешательства должны быть оптимизированы таким образом, чтобы чистая польза от снижения дозы, то есть польза от снижения радиационного ущерба за вычетом ущерба, связанного с вмешательством, была бы максимальной (принцип оптимизации вмешательства).

Но и при реализации этих принципов необходимо учитывать некоторые специфические аспекты. Во-первых, реализация первого принципа основывается на дозе облучения, а второго и третьего – на дозе облучения с момента проведения защитного мероприятия и до его отмены. Во-вторых, стохастические эффекты, появляющиеся в неопределенно отдаленной фазе (спустя 2 года и более) после аварии, являются достаточно редким событием и по своим проявлениям ничем не отличаются от аналогичных эффектов за счет других нерадиационных факторов [44, с. 101].

1.1.3 Нормирование в радиационной безопасности

При определенных уровнях воздействия на человека радиация вызывает серьезные изменения в состоянии здоровья. Правильная организация технологического процесса, проведение необходимых защитных мероприятий и обеспечение тщательного контроля над условиями труда – все это может уменьшить уровень воздействия радиационного фактора. Однако практически на любом производстве технически невозможно и экономически нецелесообразно полностью исключить воздействие неблагоприятных факторов. Так и при использовании атомной энергии нельзя полностью исключить вероятность облучения. Поэтому на всех этапах эксплуатации атомной энергии в разных целях, наряду с разработкой методик радиационного контроля и повышения надежности атомных установок и агрегатов, ключевое значение имеет исследование воздействия радиации на живые организмы.

Эти исследования преследуют цель установления границы опасности радиационного фактора, что позволяет научно обосновать критерии и подходы к регламентации тех уровней облучения, которые не вредны для человека и при которых риск для всего общества будет приемлемым и оправданным. По мнению Международной комиссии по радиологической защите (МКРЗ) «основой нормирования радиационного фактора является обеспечение защиты отдельных лиц, их потомства и человечества в целом и создание соответствующих условий для практической деятельности, при которой люди могут подвергнуться воздействию ионизирующих излучений» [44, с. 85].

В декларациях МКРЗ подчеркивается, что она предоставляет национальным комиссиям по защите от ионизирующих излучений отдельных стран право и ответственность за применения рекомендуемых в ее публикациях инструкций или правил соответственно внутригосударственным условиям [2, с. 101].

В нашей стране вопросами гигиенического нормирования ионизирующих излучений занимается научная комиссия по радиационной защите, действующая в качестве консультативного органа при РАМН.

Требования основного федерального закона, призванного к обеспечению радиационной безопасности в стране «О радиационной безопасности населения» N 3-ФЗ от 09.01.96 г. [91], регламентируется СанПиН 2.6.1.2523 [84] и распространяются на следующие виды воздействия ионизирующего излучения на человека [30, с. 11]:

- в условиях нормальной эксплуатации техногенных источников излучения;
- в результате радиационной аварии;
- от природных источников излучения;
- при медицинском облучении.

Оценка радиационной обстановки и ожидаемых медицинских последствий, а также обоснование защитных мероприятий и оценка их эффективности, основывается на суммарной дозе от всех видов излучения. В условиях штатной эксплуатации радиационно-опасных объектов для техногенного облучения персонала предел индивидуального пожизненного риска в течение года принимается округленно 10^{-3} , для населения - $5 \cdot 10^{-5}$. Уровень пренебрежимо малого риска составляет 10^{-6} [84].

Нормирование в соответствии с НРБ-09/2009 [84] при нормальной эксплуатации источников излучения осуществляется дифференцировано для следующих категорий облучаемых лиц:

- категория А, то есть персонал, работающий на РОО непосредственно с радиоактивными веществами;
- категория Б, персонал, работающий на РОО в условиях, исключающих работу с радиоактивными веществами;
- население, то есть все остальное население, включая лиц из персонала, работающих на РОО, но вне сферы и условий их деятельности.

Для этих категорий установлены соответствующие основные пределы доз облучения, приведенные в таблице 3 [30, с. 12].

Дозы от природного и медицинского облучения, дозы, полученные вследствие чрезвычайной ситуации на источнике ионизирующих излучений, не включены в основные пределы доз и нормируются отдельно (на эти виды облучения устанавливаются специальные ограничения).

Таблица 3. Основные пределы доз облучения [30, 12]

Категория населения	Эффективная годовая доза, мЗв/год	Максимальная мощность дозы	
		Эквивалентной, мкЗв/ч	Экспозиционной, мкР/ч
Группа А	20 мЗв/год за любые последовательные 5 лет, но не более 50	6,0	600
Группа Б	¼ значений группы А	1,4	140
Население	1 мЗв/год за любые последовательные 5 лет, но не более 5	0,6	60

В соответствии с радиобиологическими данным, биологический эффект от хронического облучения малыми дозами обусловлен только суммарной дозой облучения, полученной за много лет. Поэтому регламентируется только годовая ПДД. Такой подход к нормированию позволяет правильно организовать работу в радиационно-опасных условиях [44, с. 99]. Прогнозируемые уровни хронического облучения, при которых необходимо вмешательство, представлены в таблице 4.

Таблица 4. Уровни вмешательства при хроническом облучении [7]

Орган или ткань	Годовая поглощенная доза, Гр
Гонады	0,2
Хрусталик глаза	0,1

Красный костный мозг	0,4
----------------------	-----

При превышении мощности эффективной дозы γ -излучением в помещениях более чем на 0,2 мкЗв/ч, если невозможно снизить уровень радиации до установленного значения 0,6 мкЗв/ (табл. 3), то жильцов переселяют в другие помещения. При проведении противорадиационного вмешательства пределы установленных доз не применяются [84].

В случае возникновения внештатной ситуации на радиационно-опасном объекте принимаются практические меры для восстановления контроля над источником и сведение к минимуму доз облучения, количества облучаемых лиц из населения, радиоактивного загрязнения окружающей среды, экономических и социальных потерь, вызванных радиоактивным загрязнением.

При аварии на радиационно-опасном объекте допустимая эффективная доза облучения составляет 0,3 Зв (НРБ-99/2009 [84]). При достижении уровня дозы излучения за двое суток, превышение которого возможно повлечет клинически определяемые детерминированные эффекты (табл. 5), необходимы срочные меры защиты, в том числе медицинское вмешательство. При этом, в соответствии с принципом обоснования, вред здоровью от мер защиты не должен превышать пользы здоровью пострадавших.

Таблица 5. Прогнозируемые уровни облучения за 2 суток, при которых необходимо срочное вмешательство [30, с. 14]

Орган или ткань	Поглощенная доза за 2 суток, Гр
Все тело	1
Легкие	6
Кожа	3
Щитовидная железа	5
Хрусталик глаза	2
Гонады	3
Плод	0,1

Допустимое значение эффективной дозы, обусловленной суммарным воздействием природных источников излучения, для населения не устанавливается. На космическое излучение и внутреннее излучение человека, постоянно создаваемое природным изотопом ^{40}K , также не распространяются требования норм и правил [30, с. 13].

Согласно рекомендациям МКРЗ и ВОЗ радиационный уровень, соответствующий естественному фону 0,1 – 0,2 мкЗв/ч, принято считать нормальным; допустимым считают диапазон 0,2 – 0,6 мкЗв/ч, а выше 0,6 – 1,2 мкЗв/ч – повышенным [30, с. 13].

Если существует возможность присутствия в воде радионуклидов ^3H , ^{13}C , ^{131}I , ^{210}Pb , ^{238}Ra , ^{232}Th , то определение их удельной активности является обязательным. Уровень удельной активности для ^{222}Ra в питьевой воде составляет 60 Бк/кг [7].

1.1.3.1 Проблемы нормирования малых доз радиации

Представления о предельно допустимой дозе (ПДД) облучения серьезно менялись со временем. В 30-х годах прошлого века при ПДД 0,5 Зв/год наблюдалось достоверное увеличение заболеваний раком у врачей рентгенологов и специалистов, работающих с радиоактивными веществами (радием, торием и продуктами их распада). Однако даже после снижения ПДД до 0,15 Зв/год со временем было зафиксировано увеличение числа лейкозов у лиц, постоянно подвергающихся воздействию ионизирующих излучений. По рекомендации МКРЗ в 1965 году ПДД была снижена до 0,05 Зв/год. При этом значении ПДД больше не выявлялось систематического увеличения количества злокачественных образований различных органов и тканей и не наблюдалось ухудшения здоровья у специалистов за весь период трудовой деятельности [44, с. 86].

Однако эти обстоятельства в то же время требуют большей обоснованности в подходах к критериям нормирования. Отсутствие данных о повышенном выходе отдаленных последствий у специалистов не может служить основанием для категорического утверждения о невозможности их проявления при дозах 0,05 Зв/год или 2,5 Зв за все время профессиональной деятельности (~ 50 лет). Вероятность последствий настолько мала, что они не коррелируют с общей тенденцией возникновения так называемых спонтанных онкологических заболеваний, вероятность которых составляет $2 \cdot 10^{-3}$ в год, то есть ежегодно 2000 человек из 1 млн. умирают от злокачественных новообразований различных органов и тканей [44, с. 86].

В зависимости от особенностей биологического действия на живые организмы всю совокупность факторов физической, химической и биологической природы можно условно разделить на две большие группы: агенты (или факторы), обладающие порогом вредного действия (отсутствие биологического эффекта, если порог вредного действия не достигнут); агенты, лишенные таких свойств (порог вредного воздействия отсутствует). Исходя из этого все биологические эффекты и последствия воздействия ионизирующего излучения принято разделять на два класса: детерминированные и стохастические [6].

Детерминированные эффекты – это клинически значимые эффекты, проявляющиеся в виде явно выраженной патологии. Примерами служат острая и подострая или хроническая лучевая болезнь, лучевые ожоги, катаракта хрусталика глаза, временная или постоянная стерильность и др. Характерной особенностью детерминированных эффектов является пороговый характер. Степень тяжести таких эффектов прямо пропорциональна поглощенной дозе [6].

Значение дозовых «порогов» нестохастических эффектов (т.е. минимальных значений вызывающих их доз) имеет большое значение для диагностики и профилактики лучевых поражений. В таблице 6 представлены

минимальные величины доз ионизирующих излучений, вызывающих некоторые детерминированные эффекты облучения.

Таблица 6. Дозовые пороги некоторых детерминированных эффектов облучения организма человека [39]

Детерминированный эффект	Дозовый порог, Гр
Обратимая стерильность у мужчин	0,15
Лучевая катаракта	0,1-0,3
Острая лучевая реакция	0,25
Тошнота, рвота	0,5
Острая лучевая болезнь	1,0
Хроническая лучевая болезнь	1,0

Стохастические эффекты – это вероятностные, случайные эффекты, которые являются результатом повреждения одной клетки или небольшого их числа; дозовый порог для их возникновения отсутствует; от дозы зависит лишь вероятность возникновения поражения, но не его выраженность (степень тяжести). Это означает, что возникновение стохастических эффектов возможно при сколь угодно «малой» дозе облучения. Вероятность их возникновения тем меньше, чем ниже доза, но при этом качество эффекта остается неизменным [44, с. 44].

Современный уровень технического совершенства на радиационно-опасных объектах и менеджмент в рамках радиационной безопасности создает условия, при которых высокие дозы облучения являются весьма большой редкостью. Их получают лишь больные при лучевой терапии и отдельные лица

при авариях на производствах атомной промышленности. В связи с чем, интерес исследователей по нормированию ионизирующих излучений «смещен» в сторону изучения эффектов воздействия «малых» доз ионизирующего излучения [30, с. 51].

Подавляющее большинство людей на планете подвергаются воздействию низких уровней облучения – как за счет естественного фона, так и за счет всех техногенных источников, включая земную поверхность, загрязненную радионуклидами. Как уже говорилось в данной работе, при работе в штатном режиме, АЭС регулярно поставляют техногенные радионуклиды в почву, воздух и воду. Мигрируя по трофическим цепям, они в итоге попадают в организм человека, формируя дополнительный (к естественному) радиационный фон.

Понятие «малые дозы» на сегодняшний день не имеет четко выстроенного определения, оно не встречается в нормативно-правовых актах и носит рекомендательный характер. По имеющимся данным эпидемиологических исследований, при воздействии редкоионизирующей радиации в дозах 200 мГр и ниже не отмечено случаев детерминированного развития какой-либо патологии. В этом диапазоне не удастся выявить повышение даже стохастических эффектов, в том числе злокачественных опухолей. В связи с этим, Научный комитет ООН по действию атомной радиации (НКДАР ООН) рекомендовал дозы в 200 мГр и ниже относить к малым дозам, а мощность дозы 0,1 мГр/мин и ниже – к малым мощностям доз [60]; для млекопитающих – ниже 500 мГр [9]. «Но существуют подходы, по которым «малой» можно считать дозу, когда критическая мишень (ядро или клетка) получает в среднем не более одного радиационного события. К такому событию относят единичный проход ионизирующей частицы через мишень. При этом верхняя граница «малых» доз для редкоионизирующего излучения устанавливается на уровне 0,2 мГр» [52].

Вопрос о биологических эффектах действия «малых» доз облучения и проблема их количественной оценки сегодня являются предметом

многочисленных дискуссий и зачастую противоположных мнений по поводу их опасности для человека и окружающей среды. Если для детерминированных эффектов абсолютно точно доказано существование порога дозы, то для стохастических эффектов отсутствие порога является скорее гипотезой.

Существуют теории и результаты экспериментов, на основании которых авторы приходят к заключению об усилении эффекта облучения со снижением дозы. Эта гипотеза трактует, что в области «малых» доз на единицу дозы риск значительно выше, чем при «больших» дозах [44, с. 86; 53; 59]. Имеются также исследования, показывающие, что канцерогенная опасность при «малых» дозах облучения в 20-30 раз выше значений, которые предоставляет НКДАР (Научный комитет ООН по действию атомной радиации) и МКРЗ [13]. Однако эти данные подвергаются большой критике, и даже делаются выводы о существовании горметических эффектов при облучении малыми дозами.

Достоверно известно, что уменьшение естественного природного фона может привести к развитию различных неблагоприятных эффектов [27, 55]. При этом, компенсируя недостаток радиационного фона путем введения дополнительных источников радиации, можно нормализовать различные показатели жизнедеятельности [25, 56]. Более того, известен эффект радиационного гормезиса, при котором некоторое увеличение естественного радиационного фона сопровождается целым рядом положительных эффектов [8, 27, 54].

С целью повышения уровня обеспечения безопасности на радиационно-опасных объектах по рекомендации МКРЗ следует руководствоваться концепцией беспорогового действия радиации, согласно которой существует линейная зависимость биологических эффектов от дозы облучения, а также, что любая сколь угодно малая доза радиации оказывает вредное воздействие на организм. Как уже говорилось, сегодня эта концепция критикуется в связи с появлением публикаций, показывающих, что в области малых доз ионизирующего излучения использование этой модели нормирования некорректно [10, 17, 19, 45, 49, 58]. Доминирование концепции беспорогового

действия радиации привело к тому, что при исследовании воздействия ионизирующего излучения на здоровья человека экспериментальные результаты, показывающие положительное воздействие малых доз облучения, практически не принимались во внимание. Впервые обзор данных в материалах НКДАР ООН о положительных эффектах малых доз ионизирующего излучения был опубликован только в 1994 году [61].

Еще большие сомнения об исключительно вредном воздействии малых доз облучения вызывают исследования по воздействию на здоровье человека повышенного естественного радиационного фона (ЕРФ). В большинстве регионов мира население подвергается воздействию излучения ЕРФ в среднем 2,4 мЗв/год. Однако, в соответствии с данными МКРЗ, в мире многие люди подвергаются воздействию более высоких доз ЕРФ (5 мЗв/год и выше), но они не страдают от повышенной онкологической смертности или сокращения средней продолжительности жизни по сравнению с подобранной контрольной группой населения [61].

Однако, не смотря на критику концепции беспорогового действия ионизирующих излучений, консерватизм этой теории обоснован тем, что он базируется, с одной стороны, на невозможности прямых экстраполяций на человека результатов экспериментальных исследований, а с другой – на недостаточной репрезентативности эпидемиологических данных по численности соответствующих популяций человека по срокам наблюдения за ними [44, с. 92].

Признание отсутствия порога выхода неблагоприятных стохастических эффектов облучения позволяет выявить следующие принципы радиационной защиты, которые приняты в современном нормировании [44, с. 93]:

- рекомендуется исключить всякое необоснованное облучение там, где необходимость и целесообразность его являются неочевидными;

- дозы облучения должны поддерживаться на таких низких уровнях, какие можно разумно достигнуть с учетом экономических и социальных факторов.

1.2 Механизм биологического воздействия ионизирующих излучений

Исследование механизма биологического воздействия ионизирующих излучений является комплексной проблемой. Эта работа требует объединение усилий физиков, химиков, биофизиков, молекулярных биологов, а также представителей классических биологических направлений. Для выявления природы пусковых механизмов лучевого поражения потребовались физические исследования, для исследования характера структурных повреждений молекул – химические методы анализа, конечные этапы биологической реакции на облучение были исследованы биохимиками, цитологами и физиологами [37].

Основа биологического действия ионизирующих излучений лежит в передаче энергии, затрачиваемой на ионизацию и возбуждение молекул органов и тканей. Условно излучения можно поделить на непосредственно и косвенно ионизирующее. К первым относятся заряженные частицы: α , β -частицы, протоны и более тяжелые частицы, генерируемые на ускорителях. Ко второй группе относятся γ -лучами, рентгеновским и тормозным излучением, нейтронами и др [39, с. 34].

Реакция организма, вызванная после воздействия ионизирующих излучений, развивается по нескольким стадиям: физическая, физико-химическая, химическая и биологическая (табл. 7). Первые три представляют собой первичные или добиологические стадии. В значительной степени они являются общими как для живых организмов, так и для химических соединений, их растворов и смесей. Эти три стадии измеряются ничтожно малыми долями секунд, последняя фаза гораздо медленнее. Если в течение трех быстрых фаз происходят молекулярные изменения, то в четвертой – реализация

этих нарушений в функциональные и структурные повреждения клеток, тканей органов и организма в целом [11].

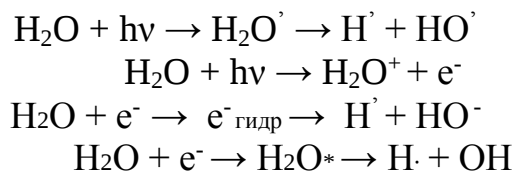
Таблица 7. Основные стадии в действии ионизирующих излучений на биологические системы [39, с.34]

Стадия	Процесс	Продолжительность, с
Физическая	Поглощение энергии излучения; образование ионизированных и возбужденных атомов и молекул.	$10^{-16} - 10^{-15}$
Физико-химическая	Перераспределение поглощенной энергии внутри молекул и между ними, образование свободных радикалов.	$10^{-14} - 10^{-11}$
Химическая	Реакция между свободными радикалами и между ними и интактными молекулами. Образование широкого спектра молекул с измененной структурой и функциональными свойствами.	$10^{-6} - 10^{-13}$
Биологическая	Последовательное развитие поражения на всех уровнях биологической организации: от субклеточного до организменного; развитие процессов биологического усилия и репарационных процессов.	Секунды – годы

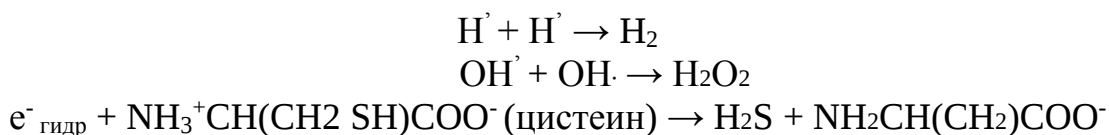
Физическая фаза характеризуется поглощением энергии ионизирующего излучения и сопровождается процессами ионизации и возбуждения атомов и молекул. Объектами ионизации оказываются белки, углеводы, нуклеиновые кислоты и различные низкомолекулярные органические и неорганические соединения. Вода в клетках поглощает 75% энергии, органические и неорганические соединения – 25% [11].

В физико-химической фазе энергия, поглощенная молекулами воды, реализуется разрывами химических связей и образованием высокоактивных в

химическом отношении радикалов типа O, H, HO. Высокая активность этих радикалов обуславливается наличием неспаренного электрона.



Продукты предшествующих реакций, в большей степени свободные радикалы, во время химической фазы вступают в реакции между собой и с органическими молекулами клеток. К высокореактивным продуктам, вступающим в реакции на химической стадии, относятся, прежде всего, радикалы OH[·], H[·] и гидратированный электрон (e⁻_{гидр}).



Существует определенная корреляция в формуле доза-эффект, которая характеризует тот факт, что большая доза облучения вызывает больше первичных повреждений и уменьшает возможность их достаточной репарации. Однако эта зависимость ставится под сомнение некоторыми исследователями (см. п. 1.1.3.1).

Активность радикалов различна и не отличается от активности радикалов, которые образуются спонтанно в процессе нормальной жизнедеятельности организма [11].

Сущность биологической фазы составляют вторичные (радиобиологические) эффекты, прослеживаемые на всех уровнях организации живого, начиная с субклеточного и завершая организменным. Наиболее чувствительными к облучению являются ядро, митохондрии, мембраны и особенно сильно ДНК. В результате облучения может наступить гибель клетки, потеря или замедление клеточного деления. Общебиологические изменения в клетках и органах характеризуются биохимическими, физиологическими и

морфологическими изменениями, нарушениями генетического кода, транслокации и трансляции [11].

Биологическая стадия облучения наиболее вариабельная по временным масштабам, она может длиться годами и даже десятилетиями, нередко в течение всей жизни организма, который подвергся облучению, иногда продолжаясь и у его потомков [11].

1.3 Обеспечение радиационной безопасности на объектах атомной энергетики

Как уже говорилось, одним из специфических экологических последствий эксплуатации атомной энергии являются появление и накопление в биосфере техногенных радионуклидов, и, как следствие, дополнительных источников облучения для населения и окружающих экосистем.

Прежде всего, опасность представляют выбросы радионуклидов в атмосферу. По большей части это смесь радиоактивных благородных газов (РБГ), газовая и аэрозольная фаза ^{131}I , аэрозоль смеси долгоживущих и короткоживущих радионуклидов (ДЖН и КЖН). За счет осаднения ДЖН из атмосферы возможно их попадание в почву, из почвы по трофическим цепям происходит миграция радионуклидов по трофическим цепям от растений до животных и человека. Суммарная активность выбросов на 91,7% обусловлена выбросами бета-активными нуклидами ($3,86 \cdot 10^{15}$ Бк), в составе которых на долю инертных радиоактивных газов приходится 86%, на долю трития – 6,9% (2010 г.). Когда в 2010 году был остановлен реактор на АДЭ-2 на ФГУП «Горно-химический комбинат» (г. Железнодорожный, Красноярский край), выбросы бета-активных нуклидов снизилось на 17,5 % [16].

Для персонала, непосредственно работающего на станции, источниками радиационной опасности в условиях нормальной эксплуатации являются реактор, трубопроводы и оборудование первого контура, бассейны выдержки с отработанным ядерным топливом, системы спецводоочистки и их

оборудование и т.д. Факторами радиационной опасности здесь выступают потоки внешнего ионизирующего излучения от этих источников, а также загрязнение воздуха рабочих помещений радиоактивными аэрозолями, загрязненность рабочих поверхностей, кожных покровов и спецодежды радиоактивными веществами. Эти факторы обуславливают выделение персонала в отдельные группы риска при нормировании (см. п. 1.1.3.). В отдельных помещениях режим работы персонала строго ограничивается по времени. В помещениях постоянного пребывания персонала уровень радиационного фона не должен превышать 14 мкЗв/ч [84].

Атомная электростанция может считаться экологически безопасной, если при строительстве, эксплуатации и выводе ее из эксплуатации состояние природного окружения (экосистем, ландшафтов и ландшафтных сопряжений) меняется не более, чем это признано допустимым (в случае нормальной работы АЭС) или приемлемым (на случай внештатных ситуаций) для данной АЭС и выбранного месте ее размещения, при этом качество условий жизни населения и персонала должно меняться не более, чем это допускают санитарно-гигиенические нормативы [46].

Для строительства АЭС и других предприятий атомной энергетики выдвигаются очень строгие требования правовых и нормативных документов, разработанных в соответствии с официальными рекомендациями международных организаций, таких как МАГАТЭ (Международное агентство по атомной энергии) и МКРЗ.

Согласно СП АС-2003[86] строительство АЭС должно вестись на расстояниях не ближе 25 км от городов с населением свыше 300 тыс. человек (население г. Сосновый Бор составляет 68 тыс. чел.) и не ближе 40 км от городов с населением 1 млн. человек (Ленинградская АЭС расположена в 42 км от административной границы Санкт-Петербурга и в 80 км от его центра). Вокруг станции должна быть предусмотрена санитарно-защитная зона (СЗЗ) радиусом 3-8 км и зона наблюдения радиусом от 20-40 км. В СЗЗ не должны располагаться жилые здания, детские учреждения и другие сооружения, не

относящиеся к АЭС. Размеры СЗЗ определяются прежде всего мощностью АЭС и природно-климатическими условиями. В пределах СЗЗ и зоны наблюдения осуществляется периодический радиационный контроль: отбор проб для радиометрических измерений (в радиусе 10-12 км) и измерение мощности экспозиционной дозы гамма-излучения сотрудниками АЭС, а также представителями Госкомгидромета и Роспотребнадзора [16].

При нарушении нормального режима работы реактора, то есть при возникновении аварийной ситуации, на станции происходит чрезвычайная ситуация. Вероятность возникновения внештатных ситуаций при эксплуатации АЭС – один из главных критериев оценки безопасности на радиационно-опасных объектах.

Типы аварий на АЭС: [30, с. 6]:

1. Гипотетические аварии происходят без разрушения ядерного реактора. Например, при оплавлении тепловыделяющих элементов (ТВЭЛов) или разрыве магистрального трубопровода, а также при нарушении герметичности технологической защиты реактора и аварийных ситуациях в системе циркуляции воды может произойти выход радиоактивного пара из первого контура через вентиляционную трубу высотой 80-150 м в окружающую среду. При гипотетической аварии на реакторе типа РБМК-1000 (эксплуатируется на Ленинградской АЭС) основной выход пара, содержащего радиоактивные вещества, происходит около 20 мин и практически завершается в течение 1 ч.
2. Проектные крупномасштабные аварии (максимально-проектные) происходят с разрушением ядерных реакторов.

В целом, безопасность на радиационно-опасных объектах можно оценить по следующим критериям:

1. Надежность технических систем, проектная вероятность аварии;
2. Запроектная вероятность аварии;

3. Факторы потенциальной опасности (террористические акты, природные факторы);
4. Уровень воздействия на население и окружающую среду при работе в штатном режиме.

История развития атомной энергетики, видевшая уже немало катастрофических событий разных масштабов на АЭС и других радиационно-опасных объектах, показывает, что небезопасность эксплуатации ядерных реакторов является важнейшим фактором потенциальной опасности. Ни для одной технической отрасли не создано столько усилий по обеспечению безопасности, как для атомной энергетики, но, тем не менее, даже сегодня нельзя говорить о том, что существуют абсолютно безопасные объекты атомной энергетики, функционирующих без риска для населения. Для этого есть три основные причины: техническое несовершенство ядерных реакторов, человеческий и природный факторы.

1.4 Проблемы образования отходов ядерного топливного цикла

Природная урановая руда – одна из наиболее часто встречающихся на Земле. Обычно, ее содержание в местах крупных месторождений – 1% и менее, однако есть несколько богатых месторождений в Канаде и Австралии с долей содержания природного урана от 10 до 20%. Ежегодно для одного легководного реактора электрической мощностью 1000 МВт необходимо около 200 метрических тонн природного урана или порядка 100000 метрических тонн руды с долей содержания природного урана 0,2% [94, с 113].

Как видно из таблицы 1 (см. п. 1.1.1.) абсолютно большую часть природной урановой руды составляют изотопы ^{235}U и ^{238}U . Но из-за разницы в значениях периода полураспада состав природного урана со временем сильно

«сместился» в сторону ^{238}U (99,28%). Это имеет ключевое значение для атомной энергетики и ядерного топливного цикла, так как среди указанных изотопов только ^{235}U способен поддерживать самоподдерживающуюся цепную ядерную реакцию, а значит, пригоден в качестве ядерного топлива [21, с. 8].

В связи с этим, природный уран невозможно подавать на атомную электростанцию. Прежде всего, руда должна быть очищена, сконцентрирована и помещена в специальные топливные стержни. На урановых рудниках ядерное топливо добывается в виде концентрата окиси урана U_3O_8 . Этот материал, порошок зеленого цвета, отправляется на дальнейшую переработку. Он имеет тот же самый изотопный состав, как и руда, в которой содержание ^{235}U не превышает 0,7%. Остальная часть – более тяжелый изотоп ^{238}U (с небольшим количеством ^{234}U). Большинство реакторов, включая самые распространенные легко-водные реакторы (LWR), не могут работать на таком топливе. Содержание изотопа ^{235}U должно быть увеличено до $\sim 3.5\%$. Этот процесс называется *обогащением*. На Ленинградской АЭС в качестве топлива используются диоксид урана и низкообогащенный ^{235}U (обогащение от 1,8% до 3,6%) [76].

Если добавить к вышеописанному процессу использование отработанного ядерного топлива (ОЯТ) в качестве вторичного сырья, дезактивацию и захоронение образующихся радиоактивных отходов, то все эти стадии можно назвать ядерным топливным циклом (ЯТЦ). Каждая стадия ЯТЦ потенциально чрезвычайно опасна для окружающей среды. Особенно актуальная проблема сегодня – это накопление радиоактивных отходов. На рисунке 2. представлена схема открытого ЯТЦ с вариантом рецикла (замкнутый ЯТЦ).

Нормальная работа реакторов всегда связана с образованием радиоактивных отходов (РАО). «Радиоактивными отходами называются вещества в любом агрегатном состоянии, не подлежащие дальнейшему использованию, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные федеральными нормами» [84]. «Радиоактивные отходы –

побочные продукты технической деятельности, образующиеся на всех этапах ЯТЦ, а также при производстве, использовании и уничтожении ядерного оружия, при производстве и применении радиоактивных изотопов» [90].

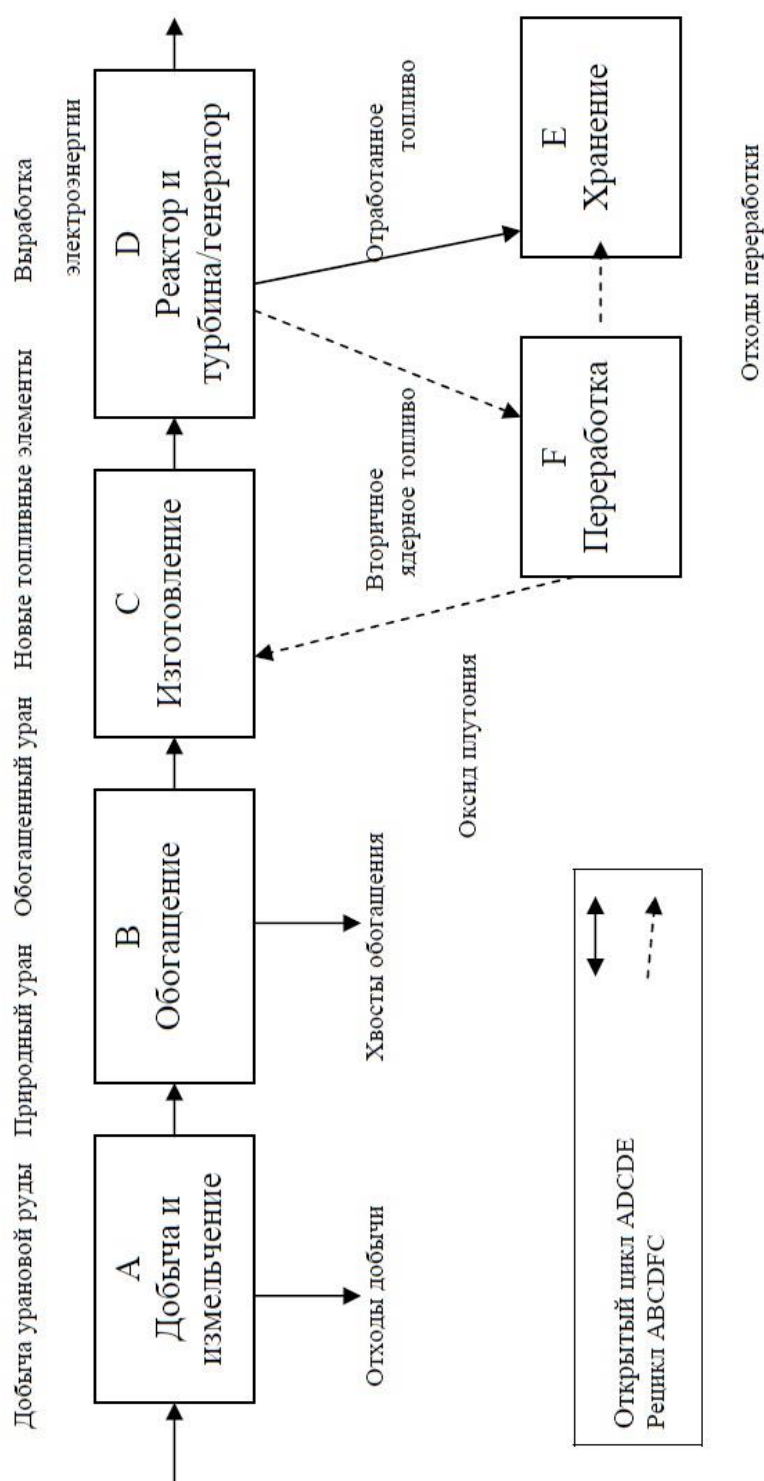


Рис.2. Схема ядерного топливного цикла [94]

К жидким РАО (ЖРО) относятся вода и растворы, используемые для охлаждения реактора, а также растворы, образующиеся при дезактивации оборудования и помещений. Из всех видов РАО наиболее распространены именно ЖРО, на АЭС их образуется около 4 тыс. м³ в год. Переработка отработанных тепловыделительных элементов (ТВЭЛов) начинается с их трехлетней выдержки в отстойниках для снижения активности примерно в 1000 раз, а затем на радиохимических заводах их измельчают и растворяют в горячей азотной кислоте, при этом образуется 10%-й раствор ЖРО [88, с. 6].

Помимо жидких отходов, эксплуатация АЭС ведет к образованию газообразных и твердых радиоактивных веществ. К газообразным РАО относят возникающие при производственных процессах и не подлежащие использованию радиоактивные газы и аэрозоли с объемной активностью, превышающей допустимую объемную активность. Это радон и пыль в горных выработках, радиоактивные газы, образованные при работе АЭС: ³Н, ⁸⁵Кг, ¹⁴С и др. [88, с. 6].

К твердым РАО (ТРО) относят не предназначенные для дальнейшего использования материалы, изделия, оборудование, биологические объекты, грунт, а также отвержденные ЖРО, удельная активность которых больше значений, приведенных в приложении П-4 НРБ-99/09 [84]. Основным источником ТРО – побочные продукты технической деятельности на всех этапах ЯТЦ – от производства топлива до работы ядерных установок [86, с. 6].

Все эти отходы требуют специфического обращения и сложной технологии утилизации. Но по большей части после концентрирования они подвергаются захоронению в специально оборудованных могильниках. Вода, содержащая ЖРО, подвергается предварительной очистке в специальных очистных сооружениях и отстойниках, прежде чем слить ее в канализацию [39, с. 110].

Стремительное накопление ОЯТ и РАО Россией является одной из наиболее актуальных проблем атомной энергетики. Эта проблема имеет свои корни в гонке ядерных вооружений, в форсированном развитии «мирной» атомной энергетики, в использовании радиационных технологий в медицине, науке и промышленности. Вовремя не было создано полноценной продуманной системы обращения с образующимися РАО, которая была бы направлена на их изоляцию от биосферы. Решение этих проблем было ориентированно и сейчас направленно только на длительное хранение РАО и ОЯТ во временных хранилищах [88].

Еще со времен отсутствия правовых требований по захоронению РАО, пункты хранения создавались с учетом специфики работы предприятий и используемых технологий, вследствие чего практически отсутствуют типовые решения по изоляции отходов [33].

К настоящему времени на объектах ЯТЦ в России накоплено жидких и твердых РАО общей активностью от 2 до 4 млрд. Ки (без учета активности ОЯТ). После 2011 года, когда в силу вступил Федеральный закон № 190-ФЗ «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» [90] среднегодовое образование РАО в России составляет около 1,2 млн. м³ твердых РАО и 1,7 млн. м³ жидких РАО, размещенных в 1284 пунктах хранения [88] (рис. 3). Эти объекты представляют большую опасность, а обращение с РАО на них связано со значительными проблемами обеспечения радиационной безопасности регионального и глобального масштаба.

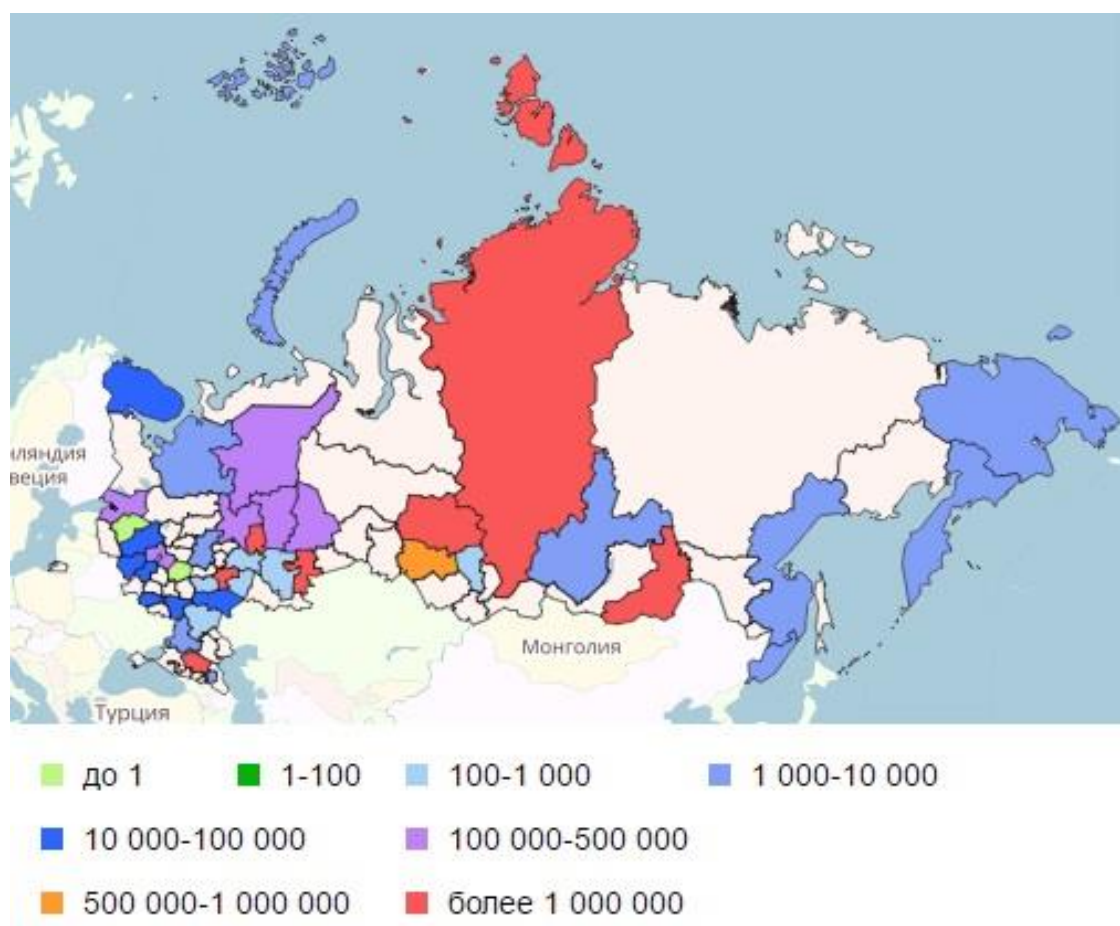


Рис. 3. Накопление радиоактивных отходов по регионам России, м³ [74]

Отдельная проблема существует с накоплением отработавшего ядерного топлива. На сегодняшний день в России накоплено около 23 тыс. т ОЯТ, и ежегодно это число увеличивается на 650 т [88, с. 16]. Проблема накопления ОЯТ (включая зарубежное топливо), происходящее уже десятки лет, не решена на приемлемом техническом и технологическом уровнях не только в России, но и во всем мире.

Как уже было отмечено выше, большая часть ОЯТ хранится в бассейнах выдержки на площадках АЭС. Остывшее отработавшее топливо затем отправляется на предприятия переработки и/или хранения в Челябинскую область и Красноярский край. Значительная часть поступлений принадлежит Северо-Западному региону России (в первую очередь Ленинградской АЭС) и зарубежным поставщикам. Фактически, большинство российских и зарубежных проблем обеспечения радиационной безопасности, социальные и

экологические риски, связанных с накоплением РАО и ОЯТ, только перемещаются и концентрируются в Урало-Сибирском регионе [34].

Одним из решений этой проблемы может стать частичное замыкание ЯТЦ для более полного использования ядерных материалов посредством переработки ОЯТ (рис. 4.). Для этого необходимо расширить номенклатуру перерабатываемого ОЯТ на действующих заводах РТ-1 в Челябинской области и построить новый завод РТ-2 большей мощности в ЗАТО Железногорск, Красноярского края [34].

Но, как показывает практика переработки ОЯТ, подобная переработка приводит к образованию большого количества РАО, обращение с которыми еще не соответствует основным природоохранным требованиям. Регулярное поступление РАО в озера Карачай, Старое Болото, Татыш, а также водоемы Теченского каскада и далее в р. Обь и Северным Ледовитый океан противоречит российским (ст. 51 ФЗ «Об охране окружающей среды», ст. 48 ФЗ «Об использовании атомной энергии», ст. 56 Водного кодекса РФ) и международным природоохранным нормам [88]. В связи с чем, вопрос об эффективной утилизации радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива остается открытым и служит источником многочисленных дебатов вокруг эффективности и безопасности атомной энергетики.

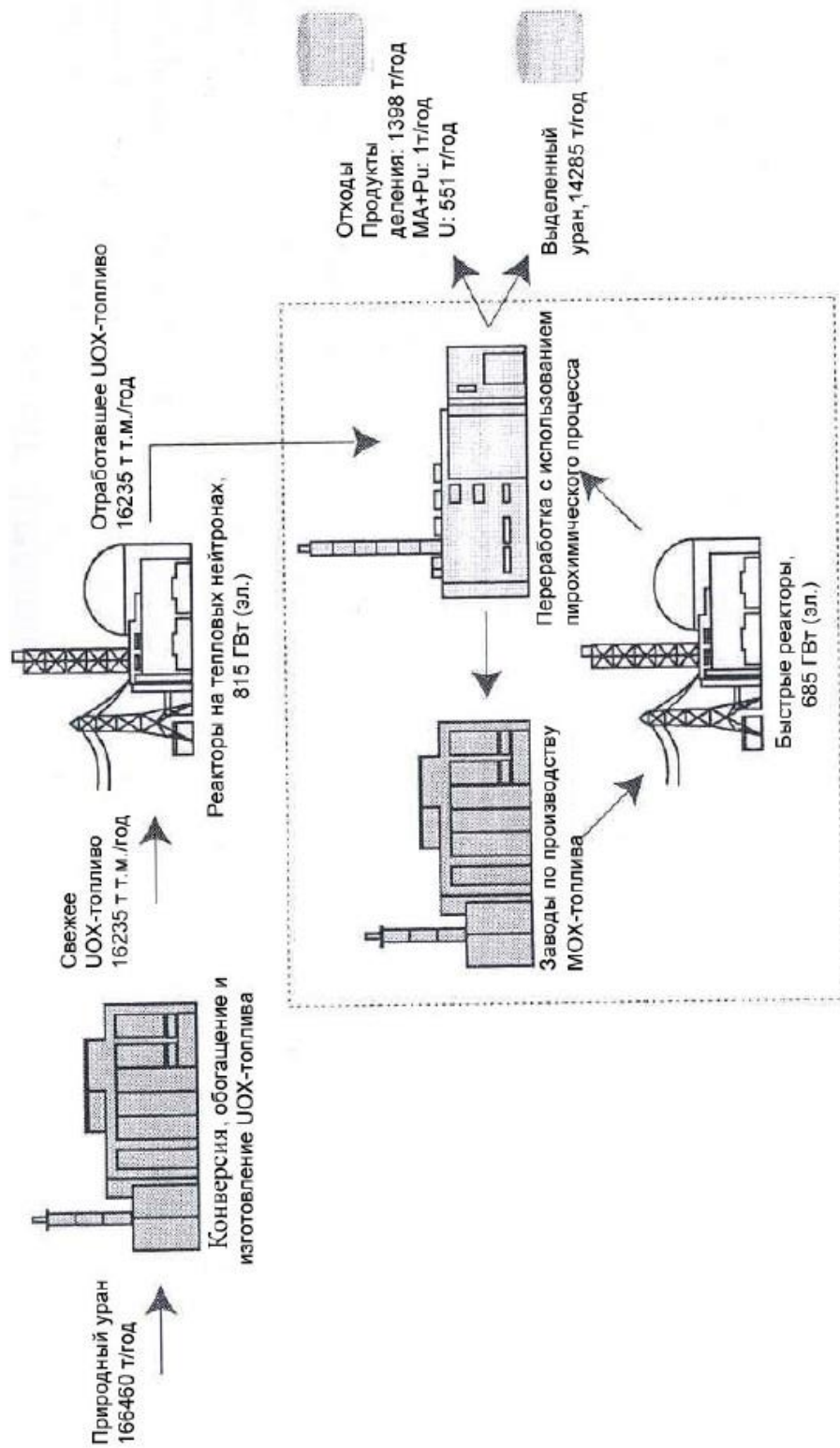


Рис. 4. Схема замкнутого ядерного топливного цикла [94]

ГЛАВА 2. ОБЪЕКТЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

2.1 Объекты исследования

Объектом исследования данной работы является импактная зона Ленинградской атомной электростанции (ЛАЭС). Как и все АЭС в России, она является филиалом акционерного общества «Российский концерн по производству электрической и тепловой энергии на атомных станциях» (АО «Концерн Росэнергоатом»). Станция расположена в Ленинградской области (рис. 5), в 42 км западнее административной границы Санкт-Петербурга и в 80 км от его исторического центра, на побережье Финского залива (Копорская губа) Балтийского моря в городе Сосновый Бор (рис. 6).



Рис. 5. Ленинградской АЭС на карте России [71]



Рис. 6. Ленинградская АЭС на карте Ленинградской области [72]

Строительство Ленинградской АЭС было начато в сентябре 1967 года. Первый энергоблок введен в эксплуатацию в 1973 году, последующие – в 1975, 1979 и 1981 годах. Впервые в СССР были введены в эксплуатацию ядерные реакторы нового типа – реакторы большой мощности канальные (РБМК). В составе ЛАЭС эксплуатируются четыре РБМК-1000 кипящего типа с графитовыми замедлителями и водяным теплоносителем. Установленная общая мощность всех энергоблоков – 4000 МВт (табл. 8). В качестве топлива, как и на большинстве атомных реакторов, используется диоксид урана и низкообогащенный ^{235}U (обогащение от 1,8% до 3,6%) [69].

Таблица 8. Действующие энергоблоки Ленинградской АЭС [69]

Номер энергоблока	Тип реактора	Установленная мощность, МВт	Дата пуска	Лицензия на эксплуатацию
1	РБМК-1000	1000	21.12.1973	до 21.12.2018
2	РБМК-1000	1000	11.07.1975	до 12.12.2020
3	РБМК-1000	1000	07.12.1979	до 31.01.2025
4	РБМК-1000	1000	09.12.1981	до 26.12.2025

Первоначальный проект ресурса эксплуатации каждого из данных реакторов и основного оборудования энергоблоков равнялся 30 годам. В случае, если бы не было предпринято никаких действий по модернизации и обновлению оборудования, то Ленинградская АЭС на сегодняшний день уже полностью выработала свой ресурс. Но в результате выполнения модернизаций на станции ресурс каждого из энергоблоков был продлен на 15 лет: энергоблока №1 – до 2018 г., №2 – до 2020 г., №3,4 – до 2025 г. Так как срок эксплуатации первого энергоблока окончательно подходит к концу, еще в 2012-2014 гг. на нем была реализована программа по восстановлению ресурсных характеристик. По утверждению «Росэнергоатома» подготовленная программа была тщательно научно обоснована, сконструированы специальные машины и системы изменения [69].

На сегодняшний день все энергоблоки Ленинградской АЭС обеспечивают примерно 56% энергопотребления Санкт-Петербурга и Ленинградской области. В энергетическом балансе всего Северо-Западного Федерального округа страны на долю станции приходится 28% [86].

С начала эксплуатации и на начало 2017 года Ленинградская АЭС выработала 971 млрд. 589 млн. кВт/часов электроэнергии [70]. Это значение показывает высокую эффективность станции в выработке электроэнергии: среди всех электростанций Восточной Европы на любых видах топлива за все время ни одна не выработала суммарно больше электроэнергии, чем ЛАЭС; также по этому показателю она занимает I место среди всех атомных и тепловых электростанций России, уступая только Братской гидроэлектростанции. В Европе существуют только три АЭС, которые выработали больше электроэнергии, чем ЛАЭС, но все они эксплуатируют шесть энергоблоков против четырех на ЛАЭС [86].

2.2 Методы исследования

Организация исследования потенциальной опасности Ленинградской АЭС включала аналитический, расчетный и практический этапы.

Аналитический этап включал подробное изучение теории радиационной безопасности на основе анализа массива научно-методических материалов, а также рассмотрение основных проблем обеспечения радиационной безопасности на объектах атомной энергетики и на всех этапах ядерного топливного цикла. Изучены основные технические характеристики энергоблоков Ленинградской АЭС, организация экологического менеджмента на станции, обращения с РАО и ОЯТ, важнейшие направления улучшения безопасности. Проанализированы официальные отчеты по исследованиям воздействия на окружающую среду и здоровье человека Ленинградской АЭС. Помимо радиационного фактора воздействия на экосистемы были изучены нерадиационные факторы, такие как: тепловое загрязнение (сброс подогретых

вод в Копорскую губу Финского залива), химическое загрязнение и биологическое загрязнение водоема-охладителя АЭС.

Практический этап. В июне 2016 года на территории Ленинградской АЭС были отобраны 5 индивидуальных почвенных проб. Пробы отбирались из прикопок из слоя 0-15 см (рис. 7).

Почва была просеяна через сито диаметром 1 мм. В подготовленных пробах определялось содержание основных долгоживущих техногенных радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr . Измерения проводились в радиобиологической лаборатории СПбГАУ на гамма-бета спектрометре «РАДЭК».

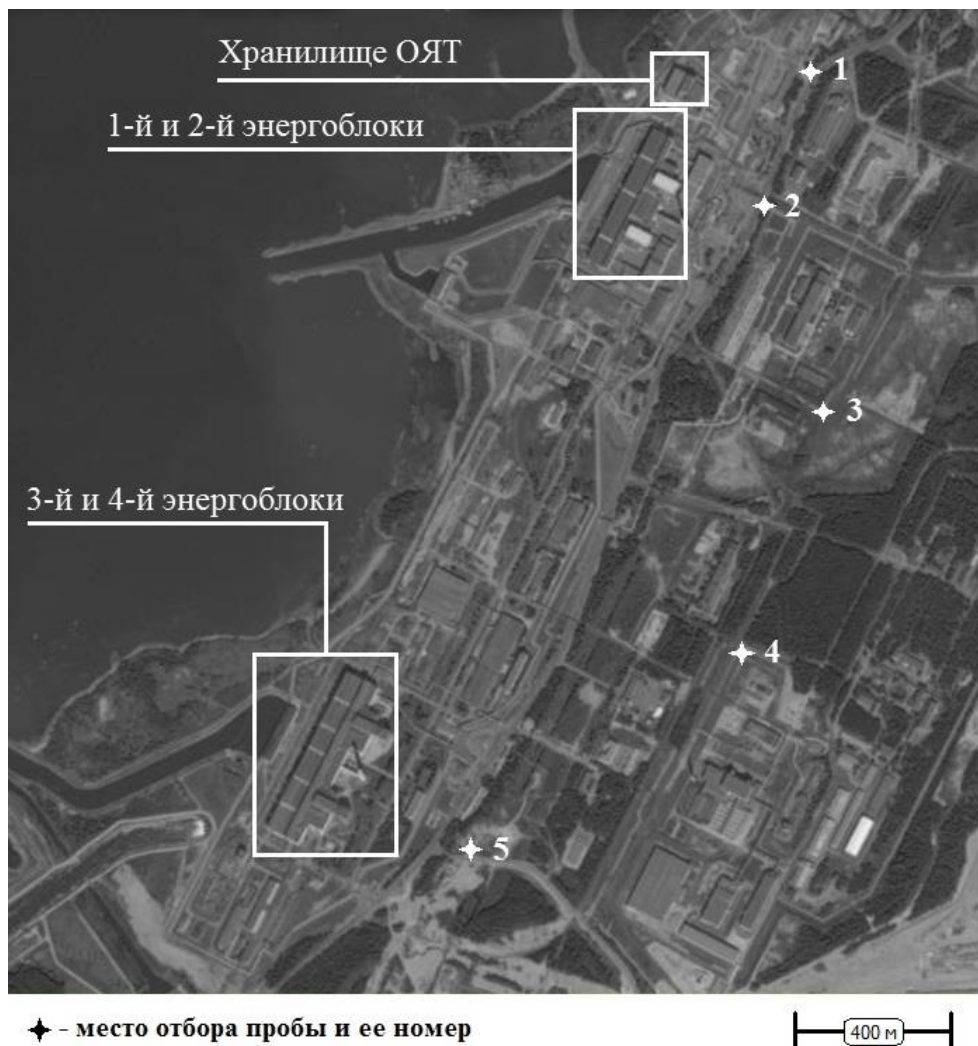


Рис. 7. Расположение точек отбора проб почв на спутниковом снимке [79]

Помимо отбора проб почв, на территории Ленинградской АЭС были сделаны 14 измерений радиационного фона. Измерения проводились с помощью прибора РАДЭКС РД-1503, который представляет собой низковольтный счетчик Гейгера-Мюллера. Прибор оценивает радиационную обстановку по величине мощности амбиентного эквивалента дозы гамма-излучений с учетом рентгеновского излучения. На рис. 8 представлены расположения точек измерения со значениями мощности дозы. В качестве конечного результата для каждого измерения было принято окончательное показание прибора, полученное после 40 секунд измерения.

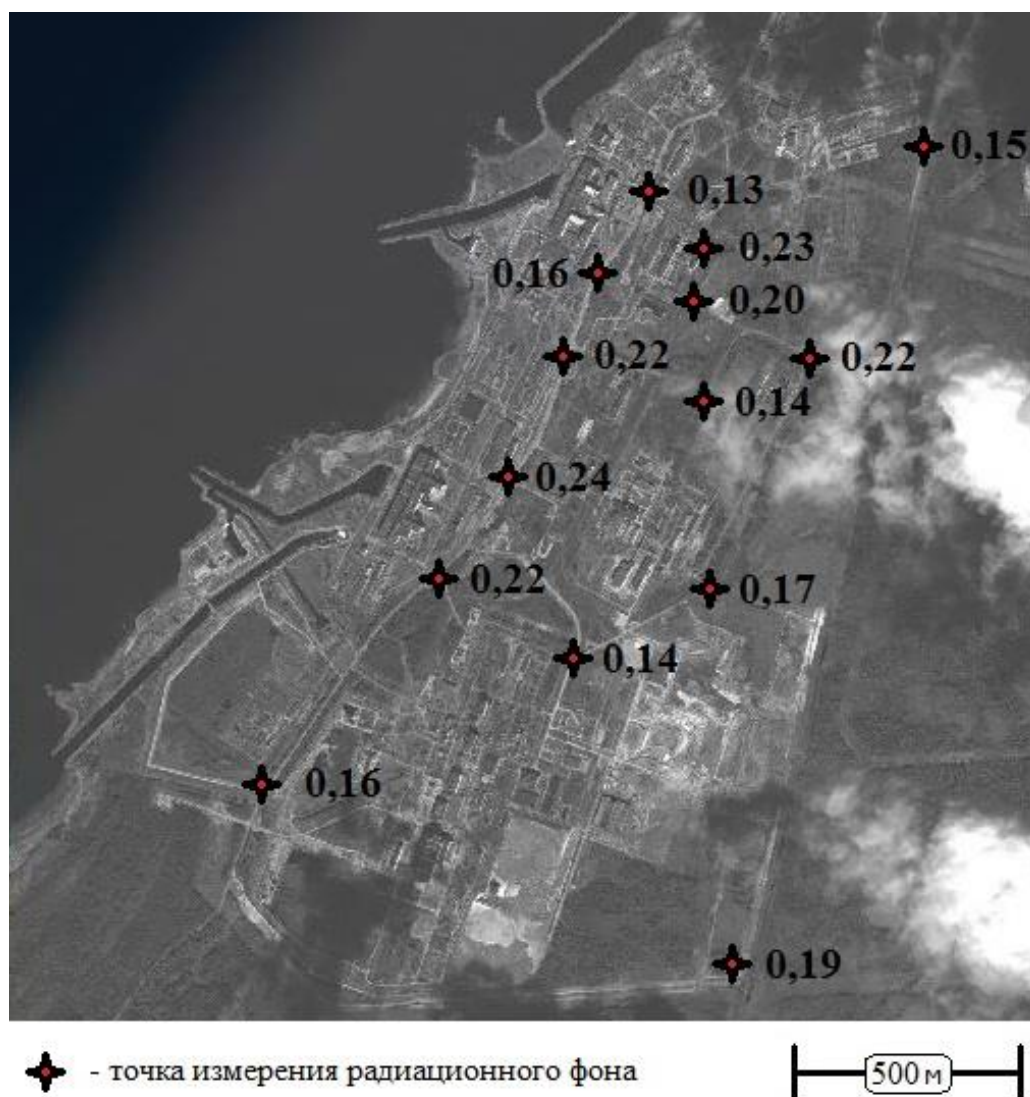


Рис. 8. Расположение точек измерения мощности дозы гамма-излучений с соответствующими показаниями, мкЗв/ч [79]

ГЛАВА 3. АНАЛИЗ ВОЗДЕЙСТВИЯ НА ОКРУЖАЮЩУЮ СРЕДУ И ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ОПАСНОСТИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ЛЕНИНГРАДСКОЙ АЭС

Безопасность такого вида предприятия, как атомная электростанция, работающая в штатном режиме, имеет стохастическую природу, которая обуславливается внутренними и внешними явлениями природного и техногенного характера. Предполагаемым критериям обеспечения безопасности на АЭС соответствуют риски, связанные с авариями и другими чрезвычайными ситуациями техногенного и природного характера с непосредственными и отдаленными последствиями для населения и сверхнормативным загрязнением окружающей среды [57]. При этом большое значение имеет, также, оценка опасности безаварийной эксплуатации, так как работа АЭС в штатном режиме не исключает специфических факторов воздействия на экосистемы.

Общую схему влияния атомной энергетики на окружающую среду, актуальную до сих пор для большинства АЭС, представил С.М. Говорушко (табл. 9) [14, с. 28].

Таблица 9. Схема потенциального влияния атомной энергетики на природную среду на всех этапах эксплуатации [14, с. 28]

Вид воздействия	Изменения в природной среде	Меры по снижению последствий
Строительство АЭС		
Изъятие земельных ресурсов	Уничтожение природно-территориальных комплексов, невозможность дальнейшего использования земли	Использование наименее ценных территорий, снятие плодородного слоя почвы
Расчистка участка, перемещение грунтов, взрывные работы	Уничтожение растительности, миграция животных, загрязнение атмосферы	Компенсационное создание аналогичных ландшафтов
Социально-экономический	Влияние временного контингента рабочих и их семей на социально-культурную среду, переселение местных жителей	Участие населения в обсуждении проекта, создание объектов социальной инфраструктуры, выбор другой площадки
Фактор беспокойства	Снижение численности животных	Регламентация работ, компенсационные меры
Эксплуатация АЭС		
Водозабор	Затягивание гидробионтов в водозаборные устройства	Установка предохранительных решеток, фильтров
Сброс теплых вод	Потеря воды при испарении, тепловое загрязнение водоема-охладителя	Утилизация избыточного тепла
Выбросы в атмосферу, воду и почвы	Загрязнение почв, атмосферы и водного бассейна	Совершенствование технологии очистки выбросов
Загрязнение природных сред радионуклидами всех форм	Облучение людей и животных, приводящее к нарушениям физиологических процессов в организмах и необратимым изменениям в них	Жесткое соблюдение технологии защиты объекта и окружающей среды, превентивные меры
Сброс радиоактивных сточных вод при перегрузке кассет ТВЭЛов	Нарушения физиологии гидробионтов, генетические отклонения	Сорбция с применением неорганических сорбентов
Промывка и консервация оборудования	Нарушение газообмена и теплового баланса водоема, гибель планктона, бентоса, ухудшение качества воды	Разрушение комплексов металлов с реагентами, выделение металлов в осадок и разрушение органических соединений
Демонтаж АЭС		

Ионизирующее излучение	Облучение людей и животных, вызывающее различные физиологические изменения	Разработка методов демонтажа, дезактивации оборудования и сооружений
------------------------	--	--

Резюмируя вышеизложенную таблицу, можно говорить о том, что техногенное воздействие на окружающую среду атомных электростанций различаются на разных этапах: строительства, эксплуатации и вывода из эксплуатации. Основная специфика воздействия АЭС на окружающую среду состоит в выбросе техногенных радионуклидов. Любая работающая АЭС оказывает воздействие на окружающую среду по следующим основным направлениям: газообразные (в том числе радиоактивные) выбросы в атмосферу, выбросы большого количества тепла и неизбежное распространение вокруг АЭС какого-то количества жидких радиоактивных отходов. Самым специфическим фактором воздействия является радиационный. С ним связана как нормальная работа АЭС, так и чрезвычайные ситуации. Особое значение имеет распространение радиоактивных веществ в окружающем пространстве. Выбросы и сбросы радиоактивных веществ из систем АЭС являются исходными событиями, которые развиваясь со временем, в конечном счете, могут привести к вредным воздействиям на здоровье человека и окружающую среду [16].

Выбросы радиоактивных аэрозолей могут быть постоянными, происходящие в процессе эксплуатации, и аварийными, которые происходят, соответственно, при аварийных нештатных ситуациях. При любом сценарии они включаются в многообразные движения атмосферы, поверхностных и подземных вод, в миграционные цепи питания и, в конечном счете, попадают в растения, в организмы животных и человека. В данной работе большее внимание уделяется постоянным выбросам и сбросам радиоактивных веществ при нормальной работе Ленинградской АЭС.

3.1 Воздействие Ленинградской АЭС на окружающую среду при работе в штатном режиме

На сегодняшний день в структуре тепловой электроэнергетики по количеству выбрасываемых в окружающую среду токсичных и нетоксичных веществ АЭС с колоссальным отрывом занимают последнее место. Но при этом работа АЭС в штатном режиме имеет свою специфику, заключающуюся в выбросе веществ, в составе которых присутствуют биологически значимые техногенные радионуклиды.

Несмотря на значительные усилия по технологическому совершенствованию работы АЭС для сокращения выбросов радиоактивных газоаэрозолей и сброса жидких радиоактивных веществ, нельзя полностью исключить их поступление в окружающую среду (см. п. 1.3.).

Для населения, проживающего вблизи АЭС, основным потенциальным источником загрязнения биосферы и облучения являются газоаэрозольные выбросы. Они поступают в атмосферу с технологическими и вентиляционными газами. В общей сложности в реакторе любой АЭС из уранового топлива образуется посредством деления атомов около 300 различных радионуклидов, из которых более 30 могут попасть в атмосферу [48, 63], среди них: ^{129}I ($T_{1/2} = 16$ млн. лет), ^{14}C (5730 лет), ^{137}Cs (30 лет), ^3H (12,3 года), ^{85}Kr (10,6 лет), ^{131}I (8 суток), ^{133}Xe (5,27 суток) и др. Возникшие газы через микротрещины ТВЭЛов попадают в теплоноситель. С точки зрения радиоактивного загрязнения среды работающими в штатном режиме АЭС, газоаэрозольные выбросы представляют первостепенный интерес, так являются наименее контролируемыми и при осаждении попадают во все среды обитания живых организмов.

Большое значение имеет тип реактора, который используется на АЭС, а также используемый вид ядерного топлива. Как уже отмечалось (см. п. 2.1.), на Ленинградской АЭС используются реакторы типа РБМК-1000, а в качестве топлива – диоксид урана и ^{235}U (степень обогащения 1,8-3,6 %). В каждом топливном канале такого реактора установлена кассета, составленная из двух тепловыделяющих сборок (ТВС). В каждую сборку входит 18 стержневых ТВЭЛов, оболочка которых заполнена таблетками из диоксида урана. В роли

замедлителя реакции выступает графитовый цилиндр, пронизанный большим количеством отверстий, через каждое из которых проходит труба давления. Центральная часть трубы давления изготовлена из сплава циркония с ниобием, обладающего высокими механическими и коррозионными свойствами. Продукты коррозии реактора и его контура, а также осколки деления ядер урана – еще одна группа радиоактивных веществ, помимо газообразных выбросов, которая прослеживается на несколько десятков километров вокруг любой АЭС. Реакторы типа РБМК дают на порядок больше газообразных выбросов, чем реакторы типа ВВЭР (водо-водяной энергетический реактор) [63].

В высоко урбанизированной и с развитой промышленностью Ленинградской области помимо Ленинградской АЭС находятся и другие источники повышенной радиационной опасности: ФГУП НИТИ им. А.П. Александрова с действующим ядерным реактором, Ленинградское отделение филиала СЗТО ФГУП «РосРАО», предприятие по переработке радиоактивных металлических отходов ЗАО «Экомет-С» (все в г. Сосновый Бор), ПИЯФ им. Б.П. Константинова (г. Гатчина), а также объекты министерства обороны. Но не смотря на это радиационная обстановка на территории области уже в течение многих лет остается стабильной. Вклад различных источников в дозу облучения населением не меняется. Подавляющая часть дозы (~ 93%) обусловлена природными источниками ионизирующего излучения (рис. 9), а радиационный фон, находящийся в пределах 0,05-0,29 мкЗв/ч, соответствует многолетним среднегодовым значениям [82].

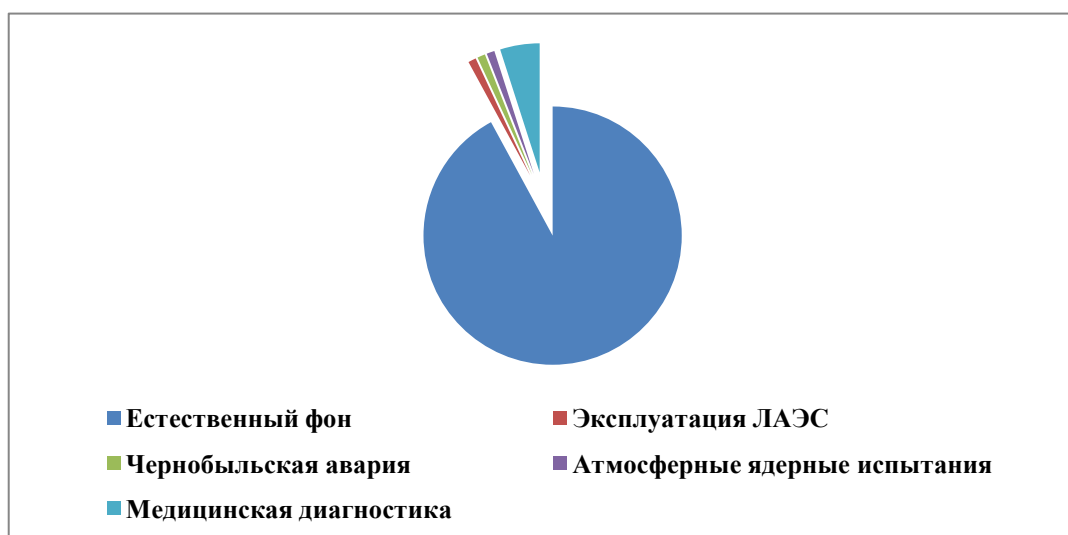


Рис. 9. Вклад различных источников в радиационную обстановку

Ленинградской области [82]

Официальные данные о радиационной обстановке предоставляются тремя независимыми системами: автоматизированной системой контроля радиационной обстановки (АСКРО) ГК «Росатом», Федеральной службой по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды и Центром гигиены и эпидемиологии Ленинградской области.

Наиболее обширный объем данных предоставляет сеть АСКРО, состоящая из 16-ти стационарных постов контроля мощности эквивалентной зоны, расположенных в 120-километровой зоне от Ленинградской АЭС [82]. По данным Радиационно-гигиенического паспорта за 2014 год «значимого воздействия на окружающую среду в результате производственной и хозяйственной деятельности ЛАЭС не выявлено» [81, с. 64].

Даже при полной загруженности реакторов РБМК-1000, в соответствии с отчетом по экологической безопасности Ленинградской АЭС за 2015 год [76, с. 19] и материалам по воздействию на окружающую среду Ленинградской АЭС [81, с. 65], выбросы радиоактивных аэрозолей оказались значительно ниже установленных норм (рис. 10, 11). Эффективность очистки удаляемого воздуха от радиоактивных аэрозолей в течение года была более 90% [76, с.19].

Выбросы некоторых радиоактивных веществ в соотношении с предельно допустимой нормой [76, с. 19]:

- по инертным радиоактивным газам – 13,1% от ДВ;
- по ^{131}I – 0,9 % от ДВ;
- по ^{60}Co – 5,8% от ДВ;
- по ^{134}Cs – 2,2% от ДВ;
- по ^{137}Cs – 1,4% от ДВ.

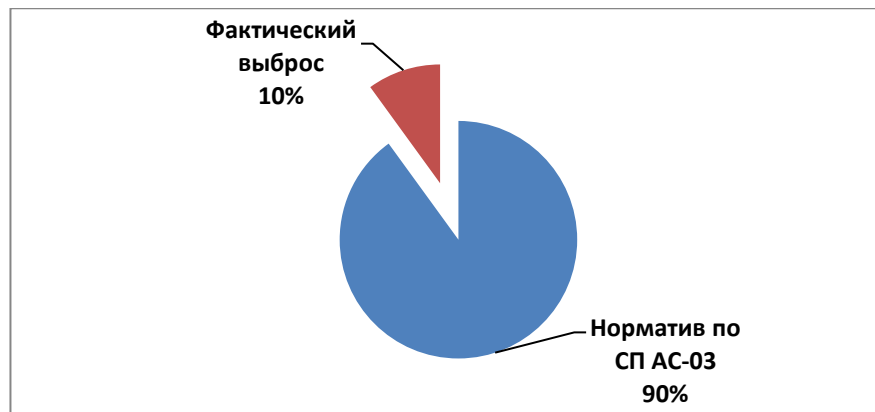


Рис. 10. Сравнение среднего годового газоаэрозольного выброса ЛАЭС с нормативом СП АС-03 [78, с. 6]

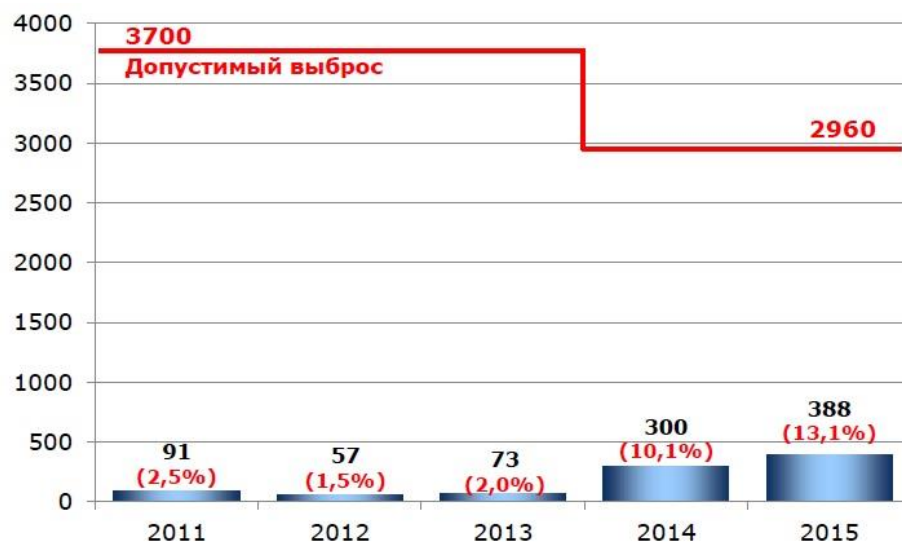


Рис. 11. Динамика выбросов инертных радиоактивных газов в атмосферу, ТБк [78, с. 20]

Северо-Западное управление Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды проводит измерения уровней радиоактивного загрязнения приземного воздуха, атмосферных выпадений и экспозиционной дозы на 26 метеостанциях и постах, расположенных во всех районах области. Плотность радиоактивных выпадений определялась на шести метеостанциях [75, с. 55].

Значение мощности экспозиционной дозы в 100-километровой зоне Ленинградской АЭС на разных пунктах наблюдения в 2015 году составила от

11 до 20 мкР/час. Значения концентраций радиоактивных аэрозолей в 100-километровой зоне Ленинградской АЭС за 2015 год составили: средняя концентрация – $5,8 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³, максимальная – $32,6 \cdot 10^{-5}$ Бк/м³ [82].

В радиометрической лаборатории Центра гигиены и эпидемиологии Ленинградской определяется удельная активность в водах открытых водоемов и источников питьевого водоснабжения, а также в пищевых продуктах и строительных материалах. Результаты исследований не выявили превышений контрольных уровней по суммарной удельной альфа- и бета-активности, установленных НРБ-99/2009. Средние уровни суммарной альфа активности в воде открытых водоемов составили 0,057 Бк/л, суммарной бета-активности 0,144 Бк/л [75, с. 56].

В 2016 г. автором данной работы с помощью прибора РАДЭКС РД-1503 было осуществлено 14 измерений радиационного фона на территории Ленинградской АЭС на разной удаленности от энергоблоков (рис. 8). По обобщенным показаниям прибора, полученных после 40 секунд измерения на каждой точке, диапазон значений радиационного фона составил от 0,13 до 0,24 мкЗв/ч (13-24 мкР/ч), что является нормой в соответствии с НРБ-99/2009 [84]. Показания прибора не коррелируют с отдаленностью от энергоблоков.

По данным многолетних наблюдения с начала эксплуатации Ленинградской АЭС можно уверенно говорить, что влияние деятельности всех радиационно-опасных объектов на территории г. Сосновый бор на радиоактивность окружающей среды, включая объекты пищевых цепочек (грибы, ягоды, сельхозпродукция), практически не значимо, а содержание радиоактивных веществ в продуктах питания и питьевой воде не превышает нормативов, установленных санитарным законодательством [33, 34, 75, 76, 78, 81, 82]. Радиационный фон на территории Ленинградской области находится в пределах 0,05-0,29 мкЗв/ч, что соответствует многолетним естественным среднегодовым значениям радиационного фона в Ленинградской области.

3.1.1 Оценка содержания техногенных радионуклидов в почве на территории Ленинградской АЭС

Измерение активности техногенных радионуклидов в почве является ключевой процедурой в системе радиоэкологического мониторинга, так как почва объединяет в себе важнейшие компоненты окружающей среды. Инертные радиоактивные газы и радиоактивные аэрозоли, в конечном счете, выпадают с атмосферными осадками на почву, откуда радионуклиды перемещаются по многочисленным миграционным путям и трофическим цепям.

Как уже говорилось, работа ядерного реактора сопровождается образованием большого количества наименований радионуклидов и не исключается их попадание в окружающую среду. Поэтому АЭС ответственны за регулярное поступление радионуклидов в почву [32]. Помимо естественных радионуклидов (в первую очередь ^{40}K , ^{226}Ra , ^{232}Th), в окружающую среду поступают долгоживущие биологически значимые техногенные радионуклиды, среди которых наиболее значимы ^{137}Cs и ^{90}Sr ($T_{1/2} = 30$ и $28,8$ лет соответственно). Последние не обладают высокой мобильностью в пищевых цепях, однако относятся к высокотоксичным веществам, включаясь в биологические миграционные цепочки, они попадают в организм животных и человека, что приводит к формированию дополнительного (к естественному фону) источника облучения [12]. Это определяет важность оценки содержания этих радионуклидов в почве на территориях АЭС.

Автором настоящего исследования был проведен анализ проб почв, отобранных на территории Ленинградской АЭС. Индивидуальные пробы, отобранные из прикопок из слоя 0-15 см, были взяты в непосредственной близости с энергоблоками и хранилищем ОЯТ (рис. 7). В подготовленных пробах определялась активность указанных радионуклидов. Измерения проводили в радиобиологической лаборатории СПбГАУ на гамма-бета

спектрометре «РАДЭК». Результаты анализа почвенных проб представлены в таблице 10.

Таблица 10. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в почве, Бк/кг

Радионуклид	Проба почвы				
	1	2	3	4	5
^{137}Cs	35±5	<11	<8,9	<11	<9,5
^{90}Sr	< 18	79 ±22	91±17	47±19	61±17

Анализ результатов показал достоверное наличие ^{137}Cs в 1-й пробе, отобранной у хранилища ОЯТ (35 Бк/кг). Наличие ^{90}Sr выявлено в 4-х пробах из 5-и (табл. 10). В соответствии с СанПиН 2.6.1.2523-09 [84] МЗУА радионуклидов ^{137}Cs и ^{90}Sr составляет 10 тыс. и 100 тыс. Бк/кг соответственно. В исследуемых пробах удельная активность ^{137}Cs не превысила 0,1% - 0,3% от МЗУА, ^{90}Sr – 0,02% -0,04%.

Полученные соотношения удельной активности ^{137}Cs к МЗУА (0,1% - 0,3%) в почве сопоставимы с данными с соотношениями выбросов данного радионуклида в составе радиоактивных аэрозолей в атмосферу к допустимым выбросам (рис. 12). Данные по выбросам радионуклидов Ленинградской АЭС в атмосферу приводятся в ежегодных отчетах экологической безопасности «Росэнергоатома» и в других открытых источниках (рис. 13, 14). По данным на 2015г., годовой выброс ^{137}Cs не превысил 1,4% от допустимого [76, с. 21].

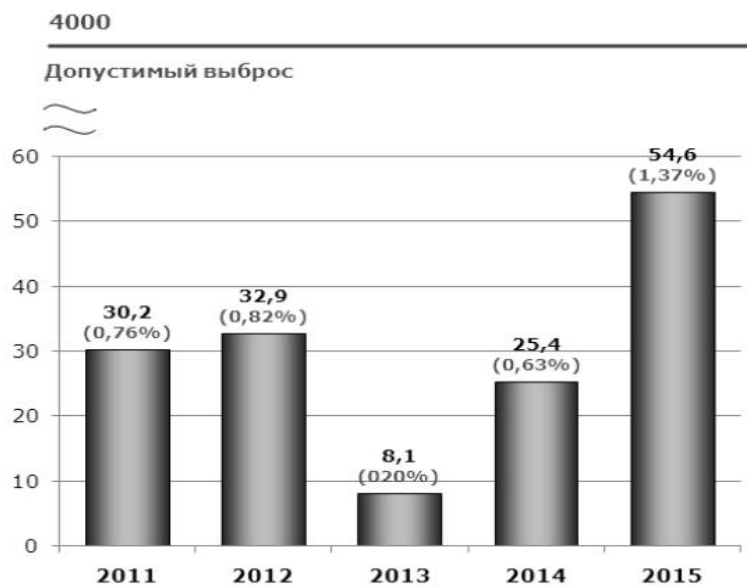


Рис. 12. Динамика выбросов ^{137}Cs в атмосферу, МБк [76, с. 21]

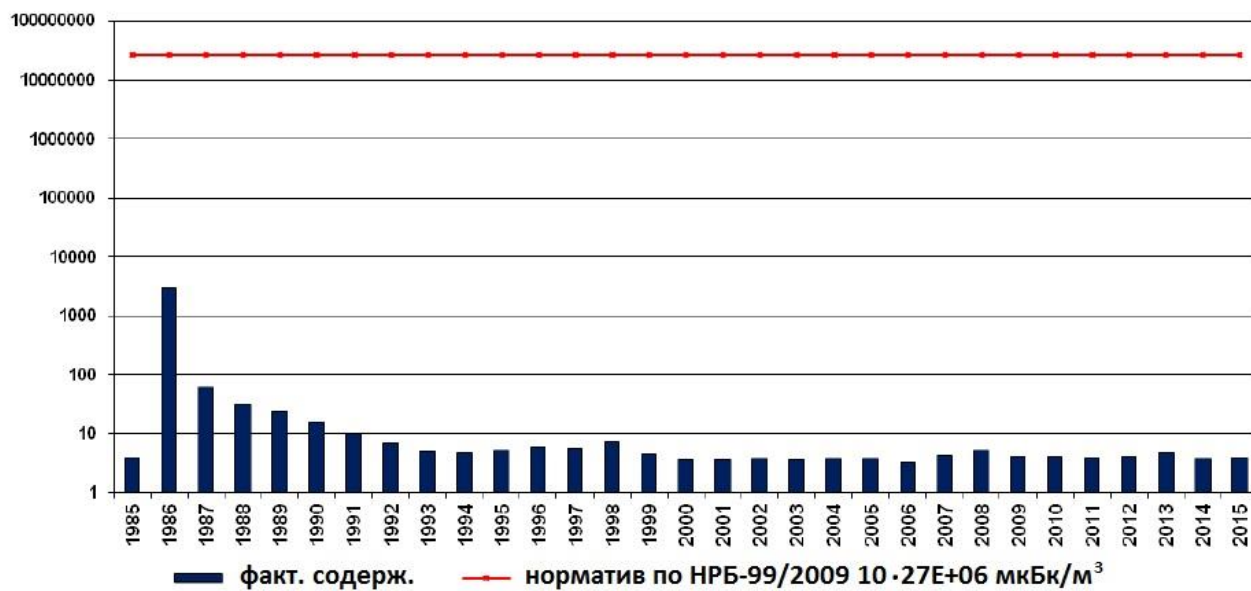


Рис. 13. Содержание ^{137}Cs в атмосферном воздухе, мкБк/м³ [78, с. 17]



Рис. 14. Содержание ^{137}Cs в почве, кБк/м² [78, с. 18]

Хотя радиоактивность почвы определяется по большей части содержанием в ней радионуклидов естественного происхождения, таких как ^{40}K , ^{232}Th , ^{238}U , все приведенные выше данные в очередной раз доказывают, что работа Ленинградской АЭС в штатном режиме постоянно сопровождается выбросами техногенных радионуклидов в атмосферный воздух и их последующим осаждением в почву, но они также показывают, что и выбросы радионуклидов в составе радиоактивных аэрозолей в атмосферный воздух и их содержание на почву в зонах радиационного контроля (рис. 15) существенно ниже установленных минимальных значений.

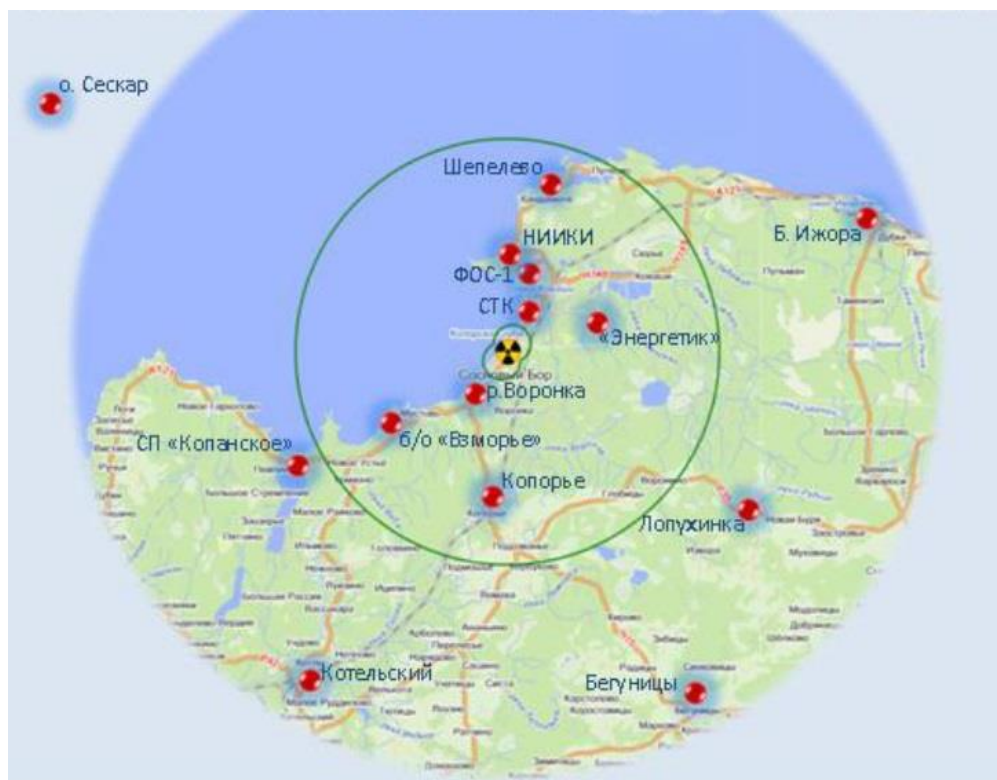


Рис. 15. Точки радиационного контроля в зоне радиоэкологического мониторинга Ленинградской АЭС [78]

Однако, даже не смотря на то, что содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr в исследуемых пробах было существенно ниже допустимых норм, полученный результат нельзя игнорировать, учитывая существенные периоды полураспада тестируемых радионуклидов. ^{137}Cs и ^{90}Sr длительное время удерживаются в живых организмах, интенсивно мигрируют по пищевым цепям. Известно [1], что накопление растениями радионуклидов из почвы зависит от свойств радионуклидов, физико-химических свойств почвы, биологических особенностей растений и агротехники культур. Аккумуляция растениями ^{137}Cs и ^{90}Sr при корневом пути перехода может различаться в зависимости от вида (в 10-30 раз) и от сорта (в 5-7 раз). По обобщенным данным, коэффициенты накопления растениями ^{137}Cs варьируются в пределах 0,02-1,1, для ^{90}Sr – 0,02-12 [43, с. 158]. Однако на данный момент не выявлено случаев концентрирования этих радионуклидов в растениях, грибах и сельскохозяйственной продукции.

Имеются данные по содержанию ^{137}Cs в растительности и грибах на территории Ленинградской АЭС, в соответствии с которыми «содержание ^{137}Cs в растительном покрове находится на уровне среднего многолетнего значения (фоновый уровень) и не превышает установленных СП 2.6.1.759-99 «Допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в продукции лесного хозяйства» минимальных значений» [87] (рис. 15), а «содержание ^{137}Cs в дикорастущих грибах не превышает установленных СанПиН 2.3.2.1078-01 «Гигиенические требования к безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов» допустимых значений» [83] (рис. 16) [78]. На приведенном ниже графике (рис. 16) видно, что максимальное содержание ^{137}Cs в растительности на территории Ленинградской АЭС было зафиксировано в 1986 году, когда случилась авария на Чернобыльской АЭС, но даже тогда оно не достигло установленных нормативов.



Рис. 16. Содержание ^{137}Cs в растительности, Бк/кг [78]

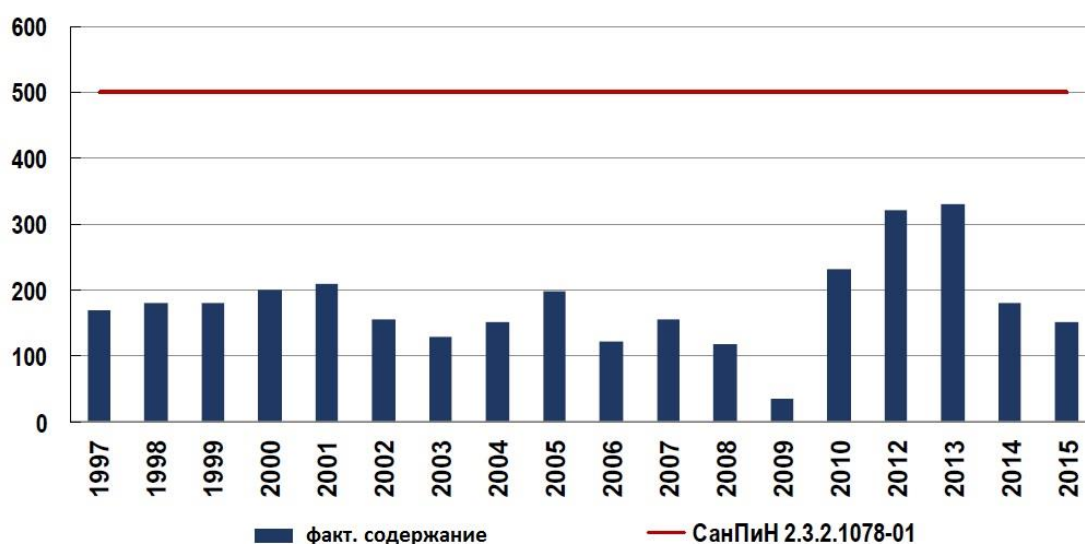


Рис. 17. Содержание ^{137}Cs в грибах, Бк/кг [78]

В таблице 11 представлены данные наблюдений за концентрацией ^{90}Sr и ^{137}Cs в компонентах наземной природной биоты в районе Ленинградской АЭС. Согласно этим данным, концентрации указанных радионуклидов в районе АЭС весьма малы по сравнению с природными (в 10 и более раз) и ниже установленных норм.

Таблица 11. Содержание радионуклидов в компонентах наземных экосистем в районе Ленинградской АЭС, Бк/кг сухой массы [26, 38]

Исследуемый компонент наземной природной биоты	^{90}Sr		^{137}Cs	
	Фактич. содержание	Допустимый уровень	Фактич. содержание	Допустимый уровень
Трава	$0,7 \pm 0,3$	37	27 ± 14	185
Хвоя	6 ± 2	-	80 ± 35	-
Грибы	$1,0 \pm 0,7$	-	380 ± 170	500 (свежие), 2500 (сушеные)
Ягоды	$2,0 \pm 0,6$	-	80 ± 40	100 (свежие), 800 (сушеные)

В таблице 12 приведены данные о содержании радионуклидов в компонентах сельскохозяйственной продукции в районе Ленинградской АЭС. «Результаты радиационного мониторинга позволяют сделать вывод об

отсутствии значимого влияния штатных выбросов АЭС на радиоактивность контролируемых компонентов агроэкосистем, связанных с пищевой цепочкой с человеком» [24].

Таблица 12. Содержание радионуклидов сельскохозяйственной продукции в районе Ленинградской АЭС [41]

Сельскохозяйственная продукция	⁹⁰ Sr		¹³⁷ Cs	
	Фактич. содержание	Допустимый уровень	Фактич. содержание	Допустимый уровень
Зерно, Бк/кг сухой массы	0,4±0,2	40	1±0,4	60
Картофель, Бк/кг сухой массы	0,2±0,1	40 (200 для сухого продукта)	0,6±0,2	80 (600 для сухого продукта)
Молоко, Бк/л	0,3±0,2	25	0,7±0,3	100

Влияние АЭС и других объектов ЯТЦ в штатных условиях эксплуатации на радиоактивность почвы весьма мало относительно естественного уровня радиоактивности. До Чернобыльской аварии содержание ¹³⁷Cs в почве в районах АЭС практически не отличалось от уровней загрязнения за счет глобальных выпадений [22, 23, 26]. Однако достоверное наличие биологически значимых долгоживущих техногенных радионуклидов лишний раз подтверждает, как минимум, обязательность постоянного агроэкологического мониторинга в 120-километровой зоне вокруг АЭС.

Не смотря на то, что уже в течение многих лет функционирования Ленинградской АЭС радиационный фон вокруг нее остается стабильным, а содержание техногенных радионуклидов в воздухе, в почве, в растительности и грибах существенно ниже установленных минимальных значений, не допустимо было бы потерять бдительность и адекватность оценки потенциальной опасности дополнительного (к естественному) источника облучения. Поэтому действующая в Ленинградской области система контроля радиационной обстановки, контролируемая Межрегиональным управлением №122 Федерального медико-биологического агентства России по Санкт-

Петербургу и Ленинградской области и Управлением Роспотребнадзора по Ленинградской области, обеспечивает многоуровневый контроль всех составляющих радиационного воздействия на человека и окружающую среду: природных источников, радиационно-опасных объектов, а также источников, используемых в медицинских целях.

3.1.2 Нерадиационные факторы воздействия Ленинградской АЭС на Копорскую губу Финского залива

В последние годы Финский залив является объектом с характерным возрастающим техногенным воздействием. Акватория залива служит конечным бассейном стока для большого количества крупных производств Санкт-Петербурга и Ленинградской области. Вследствие чего именно сюда в итоге попадает большинство физически, химических и биологических загрязнителей, что влечет за собой закономерное загрязнение природной среды Финского залива. Большие массы загрязняющих веществ вовлекаются в процессы миграции и осадконакопления и вследствие этого могут попадать в трофические цепи.

В Конвенции по защите морской среды района Балтийского моря 1992 года дается следующее определение такого понятия как «загрязнение»: «Загрязнение означает внесение человеком прямо или косвенно в морскую среду, включая эстуарии, веществ или энергии, которые могут создавать опасность для здоровья человека, наносить вред живым экосистемам, препятствовать законным видам использования моря, включая рыболовство, ухудшать качество морской воды или уменьшать возможности использования моря для отдыха» [42, с. 15].

Основными видами загрязнения морской воды являются [47]:

- механическое – повышение содержания механических примесей, свойственных, как правило, поверхностным видам загрязнения;

- химическое – наличие в воде, в донных осадках и почвах органических и неорганических веществ токсического или нетоксического действия;
- бактериальное и биологическое – наличие в воде, в донных осадках и почвах разнообразных патогенных микроорганизмов, грибов и мелких водорослей;
- радиоактивное – присутствие радиоактивных веществ в поверхностных или в подземных водах, в донных осадках и почвах;
- тепловое – выпуск в водоемы подогретых вод тепловых и атомных электростанций.

Ленинградская АЭС прямо или косвенно является источником как минимум для четырех видов загрязнения Финского залива: химического, биологического, радиоактивного и теплового. Станция имеет одиннадцать выпусков сточных вод в водные объекты, среди которых семь существует для водоотведение производственно-ливневых вод с основной производственной площадки. Помимо Копорской губы сброс сточных вод осуществляется в реки Систа, Коваш и Пейпия. Обобщенная характеристика влияние АЭС на водоем-охладитель представлена на схеме (рис. 18) [40].

По данным, приведенным в Отчете по экологической безопасности Ленинградской АЭС [76], в 2015 году объемы сброса сточных вод в природные водоемы не превышал установленных лимитов (табл. 13).

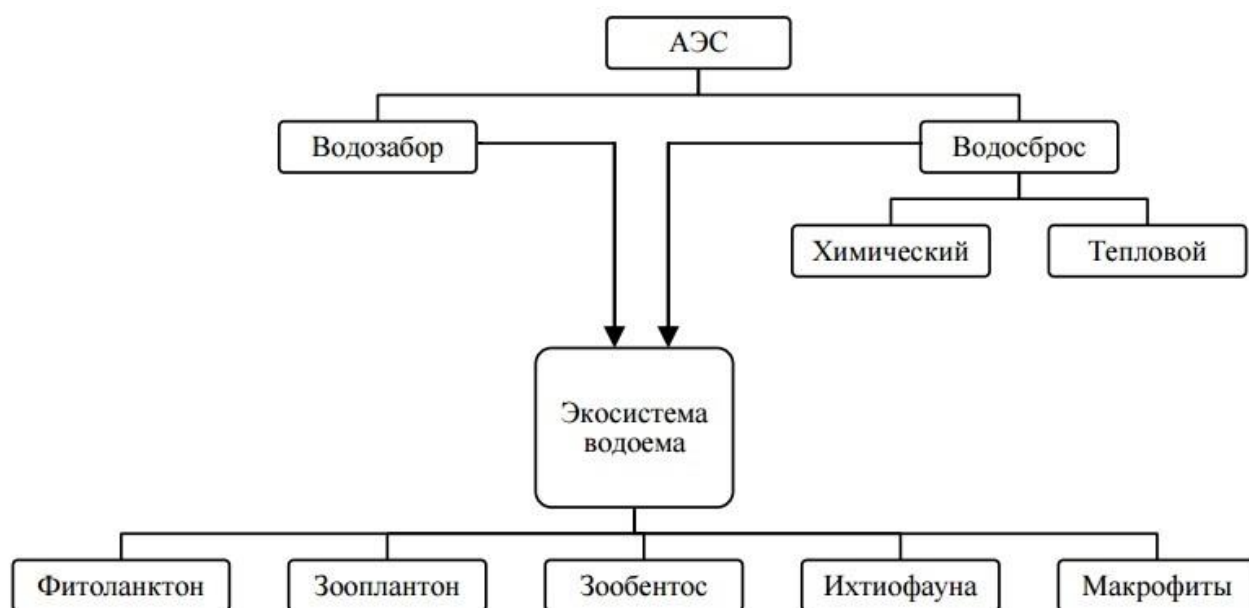


Рис. 18. Схема влияние АЭС на экосистему водоема-охладителя [29]

Таблица 13. Сброс сточных вод в поверхностные водоемы в 2015 году,
тыс. м³ [76]

Наименование водного объекта	Допустимый объем водоотведения	Фактический объем водоотведения	Отведено в водные объекты		
			нормативно- чистых (без очистки)	загрязненных	
				без очистки	недостаточно очищенных
Финский залив	6440601,18	5099462,51	5098374,08	1088,43	-
р. Систа	1356,01	93,67	-	-	93,67
р. Коваш	2117,47	82,56	-	82,56	-
р. Пейпия	473,98	130,24	-	-	130,24
Всего	6444548,64	5099768,98	5098374,98	1170,99	223,91

Исследование нерадиационных загрязнений Копорской губы (теплового, биологического и химического) в результате штатного функционирования Ленинградской АЭС, является важной частью в общей оценке ее потенциальной опасности для окружающей среды и здоровья человека.

В целом, ущерб экосистемам от теплового и химического загрязнений от эксплуатации АЭС можно условно подразделить на несколько категорий [29]:

- прямой экологический (перестройка сообществ гидробионтов, изменение видового состава);
- экономический (финансовые потери вследствие снижения продуктивности водоемов, затрат на ликвидацию последствий от загрязнений);
- социальный (эстетический ущерб, вызванный деградацией ландшафтов).

3.1.2.1 Тепловое воздействие на Копорскую губу в районе размещения Ленинградской АЭС

Известно, что электростанции, характеризующиеся использованием теплоносителей для вращения турбин электрогенераторов, редко имеют КПД больше 35%. Энергия, которая не была потрачена на выработку электричества, выбрасывается в окружающую среду в виде тепла (теплоотвод). Системы теплоотвода и охлаждения на ТЭС и АЭС являются основными источниками тепловых выбросов. Среди АЭС эти источники по виду можно разделить на два основных типа: высотные и наземные. К высотным источникам тепловых выбросов относятся башенные градирни (будут использоваться на строящейся ЛАЭС-2), а в качестве наземных рассматриваются пруды-охладители и брызгальные бассейны. Все эти источники тепловых выбросов по-разному воздействуют на окружающую среду [29].

На Ленинградской АЭС используется самый распространенный способ охлаждения – водоем-охладитель, его роль выполняет Копорская губа Финского залива. Он служит для понижения температуры воды, отводящей тепло от теплообменных аппаратов, компрессоров и другого оборудования в

системе оборотного водоснабжения АЭС. Охлаждение происходит главным образом вследствие испарения и конвективной теплоотдачи (вода-воздух).

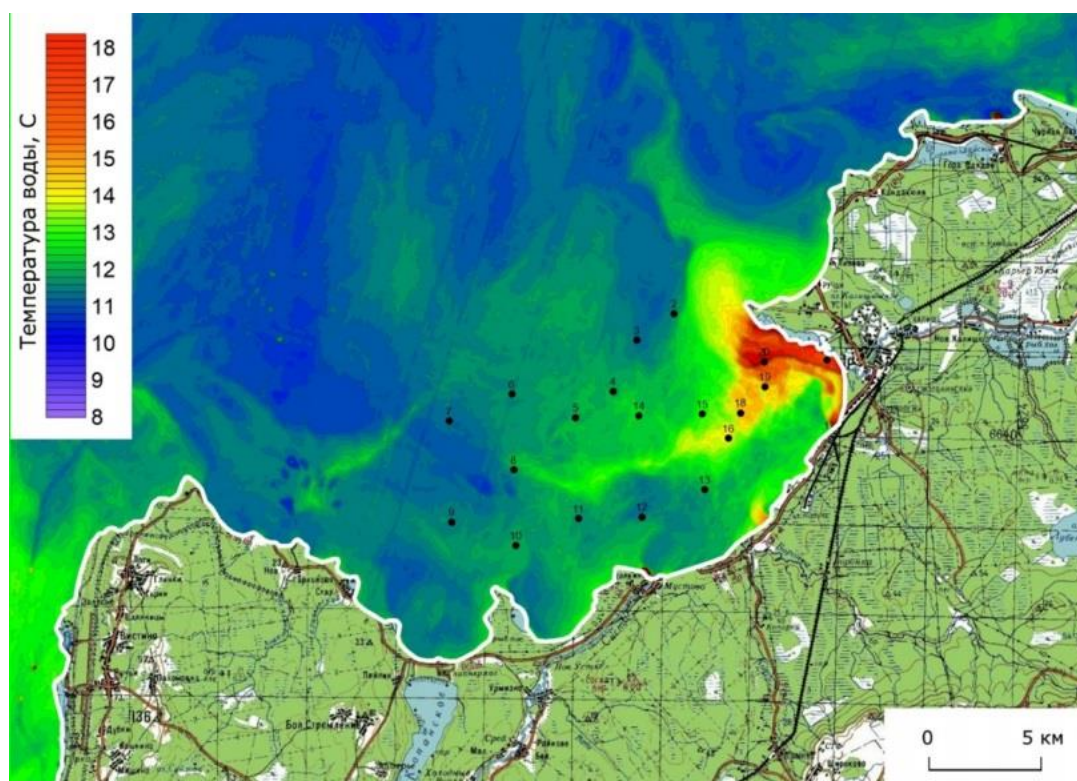
Забор морской воды является значительным по степени воздействия на водную биоту антропогенным фактором. Забираемая насосными станциями ЛАЭС морская вода, необходимая для охлаждения, характеризуется высокой плотностью гидробионтов, что приводит к потерям биологических ресурсов. Мощным фактором антропогенного воздействия на экосистему Копорской губы является поступление подогретых вод с ЛАЭС [40].

Охлаждение конденсаторов турбин Ленинградской АЭС расходуется примерно 0,10-0,12 км³ воды в месяц в расчете на один энергоблок. В том же расчете годовой расход охлаждающей воды соизмерим с условным объемом Копорской губы (0,30 км³). Теплые воды формально являются «нормативно чистыми», поэтому в неизменном виде сбрасываются в залив. В условиях мелководья сильный подогрев воды отмечается на большом удалении от станции: от 25 до 40 км² площади залива имеют повышенную относительно фона температуру в поверхностном слое. Это указывает на большую роль ЛАЭС в формировании гидродинамического, химического и биологического режима прибрежных вод [64, с. 8].

Температура воды является одним из важнейших абиотических факторов, влияющего на протекание в водоеме физических, химических, биохимических и биологических процессов. От температуры воды в значительной мере зависят кислородный режим и интенсивность процессов самоочищения. Сброс подогретых вод приводит к существенному изменению физико-химических свойств воды, что меняет экологические условия, таких как: плотность, вязкость, поверхностное натяжение, растворимость газов, давление водяного пара [31]. Вследствие сброса теплых вод и поступления биогенных элементов наблюдается эвтрофирование прибрежных вод. Повышение температуры воды ускоряет круговорот веществ в экосистеме, в частности, первичное продуцирование, что служит дополнительной предпосылкой эвтрофикации водоемов [40].

Формирование гидротермического режима в водоеме-охладителей во многом определяется процессами, возникающими в ближней зоне у водовыпуска. В зоне расположения ЛАЭС выпуск воды осуществляется с большими скоростями, вследствие чего происходит интенсивное перемешивание сбрасываемой воды с массами воды водоема [40].

Ниже представлены данные исследования СПбО ИГЭ РАН за период с 2011 по 2015 гг. [64, с. 45], основанные на съемках акватории Копорской губы с целью определения пространственного распределения температуры и кислорода в воде. Температурная съемка планировалась таким образом, чтобы дата проведения физических измерений температуры воды совпадала со временем пролета над акваторией спутника LANDSAT-8, который имеет на своем борту инфракрасные сенсоры с разрешением 100 МПикс. Итогом работы по калибровки фактических измерений и данных со спутника послужила схема распределения тепловых ареалов на поверхности Копорской губы (рис. 19).



Примечание: черными точками на рисунке отмечены пункты фактических измерений

Рис. 19. Распределение тепловых ареалов на поверхности Копорской губы
(13:00, 24.05.2014 г.) [64, с. 45]

Из рис. 18 видно, что на момент проведения съемки работает лишь одна очередь ЛАЭС. Площадь теплового воздействия составляет от 5 до 8 км².

В летний период, когда расходы рек относительно малы, а температура атмосферного воздуха высока, тепловое пятно от сбросных каналов ЛАЭС распространяются дальше. Следует учитывать, что под влиянием сезонного изменения динамики вод в акватории скорости течений в устьевых зонах сбросных каналов и, следовательно, в центральной части залива заметно выше в летний период, чем в весенний. Таким образом, радиус распространения теплового пятна может достигать 800 метров [64, с. 46].

По результатам исследования СПбО ИГЭ РАН термического режима акватории Копорской губы, для осеннего и летне-осеннего периодов можно выделить несколько характерных черт [64, с. 50]:

- большая часть акватории не подвержена влиянию сброса с ЛАЭС подогретых вод;
- наблюдается значительная разница (до 10 °С) между температурой заборных и сбросных вод;
- наибольшему влиянию подогретых вод подвержена прибрежная зона залива, в районе сбросных каналов;
- зона распространения тепла совпадает с направлением основного вдольберегового течения.

Одно из следствий теплового воздействия на акваторию водоема-охладителя является его биологическое загрязнение массовым заселением инвазивных видов. По обобщенным данным за 6 лет ведения мониторинга восточной части Финского Залива было зарегистрировано 45 водных видов-вселенцев [50]. На фортах Тотлебен, Обручев и Милютин обнаружено массовое поселение улиток, от которых в Ленинградской области страдают приусадебные участки. Для Российского сектора Балтийского моря впервые был зарегистрирован чужеродный инвазивный моллюск, происхождение которого идет из прибрежных вод Атлантического побережья Центральной

Америки. Распространение этого вида моллюска – *Mytilopsis leucophaeata* – приурочено к зоне комплексного воздействия системы технического водоснабжения Ленинградской АЭС [51].

Успешное вселение инвазивных видов организмов может повлечь часто непредсказуемые и необратимые последствия, связанные с их активным размножением, в случае если для них не будет существовать местных паразитов и хищников. Самые распространенные последствия таких процессов характеризуются подавлением или полным вытеснением местных видов в результате конкуренции или выедания. В конечном итоге это приводит к упрощению структуры сообщества и его биоразнообразия, что, в свою очередь, приводит сообщество к снижению его устойчивости к внешним воздействиям. Также, вселение чужеродных видов может способствовать ухудшению качества воды, распространению паразитов и болезней, в том числе опасных для человека [3, 35].

3.1.2.2 Химическое воздействие на Копорскую губу в районе размещения Ленинградской АЭС

При эксплуатации такого технически сложного и большого предприятия, как Ленинградская АЭС, возможно поступление химических загрязнителей в водоем-охладитель: смазочных материалов, тяжелых металлов, детергентов, кислот, щелочей, фосфатов и др., что, в свою очередь, приводит к необратимым процессам в экосистеме водоема-охладителя.

Однако, влияние ЛАЭС на общее химическое загрязнение Копорской губы и всей восточной части Финского залива не столь очевидно, как в вопросе теплового загрязнения. Вдоль всего восточного побережья расположено огромное количество промышленных объектов, регулярно сбрасывающих химически загрязненные сточные воды. На рис. 20 показан удельный вес сбросов вредных химических веществ, поступающих в Копорскую губу со сточными водами. По данным за 2015 год это значение для Ленинградской

АЭС составило 9,21% от общего числа сбрасываемых в Копорскую губу ВХВ [76, с. 26].

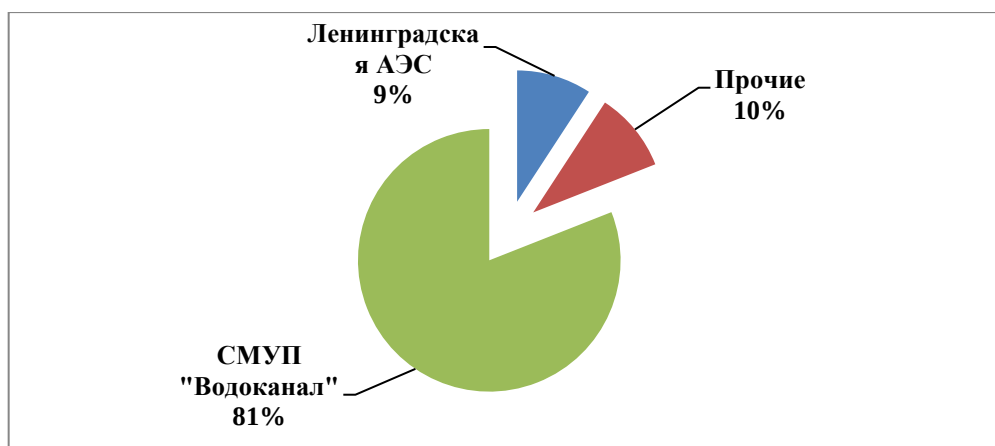


Рис. 20. Удельный вес основных источников сбросов ВХВ в Копорскую губу, % [76, с. 26]

В Отчете по экологической безопасности Ленинградской АЭС приводятся данные по сбросам вредных химических веществ (табл. 14). «Фактический суммарный сброс вредных химических веществ в водные объекты в 2015 году ни по одному показателю не превысил годового норматива допустимого сброса или установленного лимита» [76, с. 16].

Таблица 14. Сбросы основных вредных химических веществ в 2015 году [76]

Наименование приемника сточных вод	Наименование ВХВ	Установленный сброс, т	Фактический сброс	
			тонны	% от нормы
Финский залив	БПК полное	19966,058	2,975	0,015
	Нефтепродукты	333,765	0,026	0,008
	Взвешенные вещества	48513,434	6,750	0,014
	Сухой остаток	23766142,84	4623,880	0,019
	ХПК	182388,249	32,768	0,018
	Сульфаты	2019647,077	307,399	0,015
р. Пейпия	БПК полное	1,643	0,459	27,937
	Нефтепродукты	0,027	0,003	11,111
	Взвешенные вещества	5,614	0,914	16,281
	Сухой остаток	91,473	19,337	21,140
	ХПК	16,432	6,947	42,277

	Сульфаты	18,623	1,843	9,896
р. Коваши	БПК полное	5,597	0,010	0,179
	Нефтепродукты	0,093	0,0002	0,215
	Взвешенные вещества	5,504	0,040	0,727
	Сухой остаток	697,802	1,340	0,215
	ХПК	55,973	0,120	0,214
	Сульфаты	186,578	0,610	0,327
р. Систа	БПК полное	2,968	0,070	2,358
	Нефтепродукты	0,039	0,0015	3,846
	Взвешенные вещества	3,719	0,130	3,496
	Сухой остаток	377,867	14,860	3,933
	ХПК	29,675	0,469	1,580
	Сульфаты	71,518	1,980	2,769

В докладе Комитета по природным ресурсам Ленинградской области «Об экологической ситуации в Ленинградской области в 2015 году» говорится, что в «восточной части Финского залива случаев высокого и экстремально высокого загрязнения морских вод зафиксировано не было. Концентрации загрязняющих веществ, превышающие допустимые нормы, были зафиксированы для тяжелых металлов, единственный случай превышения норматива по содержанию азота нитритного был зафиксирован в Копорской губе». Весьма маловероятно, что превышение по азоту нитритному было вызвано работой Ленинградской АЭС, так как она не сбрасывает это вещество [75, с. 34].

По данным этого доклада в Копорской губе не было зафиксировано ни в одной пробе отклонений по водородному показателю, превышений по фосфатам, азоту нитратного, азоту аммонийному и азоту общему. Кислородный режим вод района в целом удовлетворительный [75, с. 35].

3.2 Обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом на Ленинградской АЭС

При оценке воздействия на окружающую среду любой АЭС одним из самых острых вопросов является проблема обращения с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом. Эксплуатация АЭС в штатном режиме сопровождается образованием большого количества РАО разного агрегатного состояния, а также ОЯТ.

Этот вопрос приобретает столь серьезную важность по причине специфического воздействия на окружающую среду радиоактивных отходов. На сегодняшний день среди всех видов отходов только РАО требуют столь тщательной регламентации по обращению с ними. При этом вопрос об их полном обезвреживании и изоляции от окружающей среды остается открытым.

Радиоактивными отходами называются вещества в любом агрегатном состоянии, не подлежащие дальнейшему использованию, в которых содержание радионуклидов превышает уровни, установленные федеральными нормами [84, 90, 91].

Отработавшее ядерное топливо (ОЯТ) – это извлеченные из активной зоны тепловыделяющие элементы (ТВЭЛы) или их группы, тепловыделяющие сборки ядерных реакторов АЭС. Ядерное топливо считается отработанным, если оно более не способно эффективно поддерживать цепную реакцию [93].

Как и на большинстве АЭС на Ленинградской АЭС подавляющее количество РАО составляют твердые радиоактивные отходы и жидкие радиоактивные отходы. Система обращения с ними является приоритетной задачей в области обеспечения экологической безопасности. Правильное обращение с РАО на Ленинградской АЭС исключает попадание радиоактивных веществ в окружающую среду и рабочие помещения как при нормальном режиме эксплуатации, так и при аварии.

Образующиеся на Ленинградской АЭС ТРО – это отработавшие свой ресурс радионуклидные источники, не предназначенные для дальнейшего использования материалы, оборудование, использованные средства индивидуальной защиты и др. [76, с. 24]. Они сортируются по видам и

активности, загружаются в контейнеры и транспортируются на специально оборудованном транспорте в места их переработки и хранения (рис. 21).

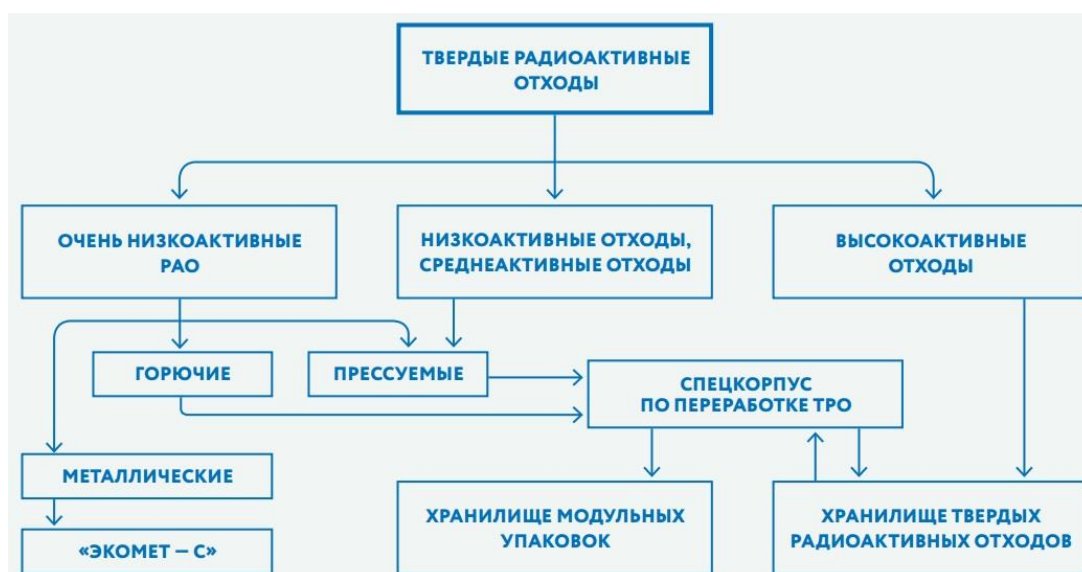


Рис. 21. Схема обращения с ТРО на Ленинградской АЭС [68]

Как видно из рис. 20, металлические отходы с низкой активностью передаются на переплавку в ЗАО «Экомет-С». Горючие и прессуемые радиоактивные отходы отправляются на переработку на Комплекс по переработке ТРО. Неперерабатываемые ТРО затариваются в соответствующие упаковки и отправляются на хранение в хранилище ТРО (ХТРО) Ленинградской АЭС. К ТРО также относятся отвержденные ЖРО. В виде битумного компаунда они хранятся в специализированном наземном сооружении [76, с. 24].

Объемы образования ТРО 2015 года составили 120% от объемов 2014 года, что связано с большим объемом работ по ремонту и модернизации энергоблоков №1-4, но при этом объем не превысил установленного норматива (рис. 22) [76, с. 24].

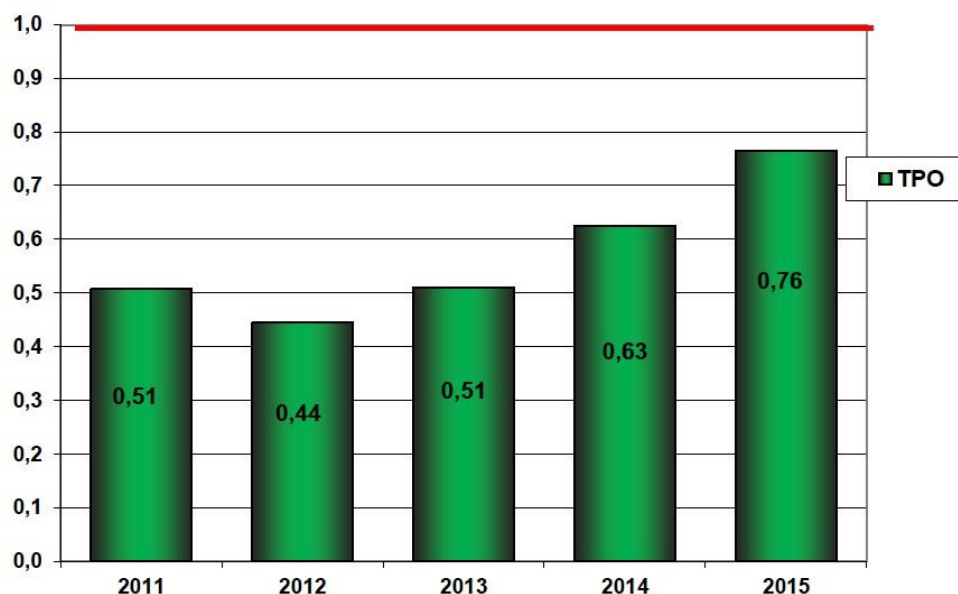


Рис. 22. Отношение объемов образовавшихся ТРО к установленному нормативу, % [76, с. 25]

Сбор и удаление жидких радиоактивных отходов осуществляется системой спецканализации, через которую они направляются на переработку на установках спецводоочистки. ЖРО в виде кубового остатка и пульпы (ионообменные смолы (ИОС) и фильтроперлит) поступают по трубопроводам на хранение в емкости комплекса переработки отходов. Объемы образовавшихся в 2015 году ЖРО не превысило установленных нормативов (рис. 23) [76, с. 25].

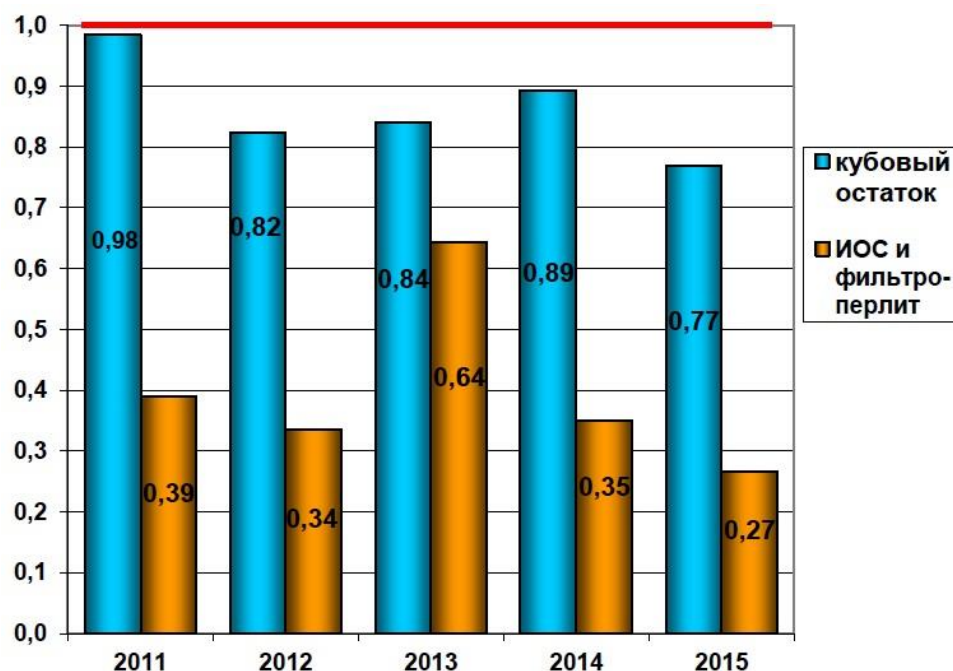


Рис. 23. Отношение объемов образовавшихся ЖРО к установленным нормативам, % [76, с. 25]

Еще одним следствием эксплуатации Ленинградской АЭС является образование ОЯТ. В более узком понимании, оно определяется как отработавшие тепловыделяющие сборки. Они содержат в себе «недовыгоревший» в процессе работы реактора ^{235}U , его изотопы и другие трансурановые элементы, а также активированные конструкционные материалы. Ядерное топливо причисляется к отработавшему, когда его способность поддерживать цепную реакцию радиоактивного распада снижается до неэффективных величин, однако в нем продолжают происходить ядерные превращения, которые сопровождаются повышенным радиоактивным излучением, а также постоянным (медленно снижающимся в течение времени) выделением тепла. Это обуславливает особое внимание к методам и технологиям обращения с ОТВС. На Ленинградской АЭС обращение с ОТВС проходит в несколько этапов [73]:

- Первоначальным этапом обращения с ОТВС является их хранение в бассейнах выдержки в хранилищах отработанного ядерного топлива (БВ ХОЯТ). ОТВС хранятся в БВ ХОЯТ в пеналах, заполненных водой и погруженных в воду бассейна выдержки. Внутренняя среда пенала с

ОТВС изолирована от воды БВ. Система охлаждения БВ мощностью 3,5 МВт обеспечивает отвод остаточных тепловыделений от ОТВС с поддержанием температуры воды в БВ $< 50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Отвод тепла от теплообменников системы охлаждения БВ осуществляется морской водой. Характерной особенностью реакторов типа РБМК является то, что их ТВС перегружаются из реактора прямо в процессе работы, для всех остальных типов подобная перегрузка топлива может быть выполнена только при полностью заглушенном реакторе. Длительность хранения ОТВС в БВ может длиться от 2 до 3 лет. Емкость БВ обеспечивает возможность одновременного хранения полной топливной загрузки реактора [89].

- Далее ОТВС перевозится на временное хранение в стационарные ХОЯТ. На Ленинградской АЭС осуществляется программа по реализации способа «сухого» хранения ОТВС. Для загрузки и хранения ОТВС разработаны специальные металло-бетонные контейнеры (МБК), пригодные для промежуточного длительного (до 50 лет) хранения ОЯТ на площадке АЭС. ХОЯТ – это комплекс зданий и сооружений с бассейнами, имеющими автономные системы спецвентиляции, водоочистки и охлаждения.
- После контроля герметичности и излучения, МБК проходят вакуумную осушку и заполняются инертным газом. Затем в составе транспортных упаковочных комплектов они отправляются на железнодорожных транспортерах в централизованное хранилище на ФГУП «Горно-химический комбинат» (г. Железногорск).

3.2.1 Важнейшие направления решения проблем накопления радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива на Ленинградской АЭС

Накопление радиоактивных отходов и отработавшего ядерного топлива является одной из наиболее актуальных проблем всей мировой атомной энергетики (см. п. 1.4.). Проблема долгосрочного обращения с радиоактивными отходами, безусловно, является одним из тех факторов, которые серьезно замедляют развитие атомной энергетики, и является одним из ее недостатков.

По результатам прогноза количества накопленных и образующихся кондиционированных отходов к 2030 году суммарный объем кондиционированных РАО в Ленинградской области может составить 236 тыс. м³ с учетом вывода энергоблоков РБМК-1000 из эксплуатации и ввода новых мощностей ЛАЭС-2 [15].

В качестве одного из решения проблем опасного накопления РАО на действующих радиационно-опасных объектах Ленинградской области эксплуатируются и строятся новые установки по утилизации с РАО. Производительность таких установок переработки РАО позволит кондиционировать РАО в упаковки, отвечающие критериям приемлемости для их окончательной изоляции [77, с. 4].

В настоящее время ведется строительство комплекса по переработке ЖРО гетерогенного и гомогенного составов, включая создание установки цементирования отработавших пульп фильтроперлита и ионообменных смол и создание установки переработки гомогенных ЖРО по малоотходной технологии [76, с. 25]. Важность создания этого комплекса обосновывается тем, что при переработке ЖРО возможно добиться выделения радиоактивных изотопов ^{137,134}Cs и ⁶⁰Co в минимальный объем твердой фазы (~ 1,5% от весового содержания кубового остатка) и только после этого осуществить выпаривание кубового остатка с получением нерадиоактивных или низкоактивных солей, относящихся к категории очень низкоактивных отходов. Такие соли не нуждаются в специальных глубоких захоронениях, их можно хранить в простых ангарах или захоранивать на полигонах промышленных отходов [81, с. 12].

Важным технологическим решением по переработке ТРО на Ленинградской АЭС для их дальнейшего захоронения стало постройка Комплекса по переработке ТРО в 2014 году в рамках выполнения федеральных норм и правил и законодательства РФ. В состав комплекса входят установки сортирования, прессования, сжигания, системы транспортно-технологических операций, дезактивация оборудования, топливopодачи, воздухоcнабжения и др. Производительность комплекса: переработка 5 м³/год ЖРО (горючее активное масло), переработка 1770 м³/год ТРО (сжигаемое и прессуемое РАО) [68].

Дальнейшим этапом является создание пунктов захоронения радиоактивных отходов. В международной практике наиболее безопасным способом обращения с радиоактивными отходами признано их захоронение в пунктах захоронения РАО. Финальная изоляция РАО является заключительным, очень важным и экологически ответственным этапом обращения с РАО. Только финальная изоляция обеспечивает надежную долговременную безопасность на весь период потенциальной опасности РАО [77, с. 5]. Общая схема обращения с РАО представлена на рис. 24.



Рис. 24. Общая схема обращения с радиоактивными отходами [77, с. 5]

На данный момент РАО, находящиеся на территории ЛАЭС, хранятся в наземных сооружениях, которые невозможно перевести в статус ПЗРО (пункт захоронения радиоактивных отходов). Вследствие чего существует необходимость поиска решения проблемы удаления этих РАО из сферы человеческой жизнедеятельности. Как уже отмечалось, современным и технически осуществимым способом решения этой проблемы является захоронение накопленных, а также вновь образующихся, твердых и

отвержденных радиоактивных отходов в приповерхностном ПЗРО заглубленного типа [80, с. 13]. Создание сети пунктов финальной изоляции РАО предусмотрено пунктом 4 постановления Правительства Российской Федерации от 19.11.2012 №1185 «Об определении порядка и сроков создания единой государственной системы обращения с РАО». На рис. 25. изображена принципиальная схема предпроектного этапа поиска и выбора перспективных площадок, пригодных для создания ПЗРО.



Рис. 25. Основные принципы размещения пунктов финальной изоляции РАО [77, с. 11]

По результатам проведенной оценки воздействия на окружающую среду ПЗРО в Ленинградской области было обосновано строительство и получено разрешение региона на строительство ПЗРО в районе расположения Ленинградского отделения филиала ФГУП «РосРАО» [77, с. 14; 80, с. 14-15]. Целесообразность создания ПЗРО в Сосновоборском районе Ленинградской области обусловлена:

- наличием законодательной и нормативной базы в области захоронения РАО в целом;
- сосредоточение основных поставщиков РАО в Сосновоборской промышленной зоне, что исключает необходимость транспортирования РАО по дорогам общего пользования;
- наличием большого количества накопленных РАО (и непрерывным образованием их в будущем), достаточном для создания ПЗРО с оптимальными технико-экономическими показателями;
- предстоящим выводом из эксплуатации объектов использования атомной энергии (в первую очередь, это касается энергоблока №1 Ленинградской АЭС, срок эксплуатации которого заканчивается в 2018 г.);
- наличием в регионе благоприятных геолого-гидрогеологических условий для подземного захоронения РАО;
- наличием концептуальных проектов, разработанных с участием зарубежных специалистов;
- наличием в Санкт-Петербурге и Ленинградской области научно-исследовательских, конструкторских и проектных организаций, имеющих лицензии на необходимые виды работ и высококвалифицированный персонал для их выполнения;
- наличием уникальных технологий строительства наземных и подземных сооружений, в том числе общегражданского назначения, многолетнего опыта проектирования, инфраструктуры, базы стройиндустрии и других факторов.

Решением проблемы накопления ОЯТ на территории ЛАЭС стало внедрение комплекса систем «сухого» хранения ОЯТ в 2012 году с использованием МБК, что предусматривает захоронение в глубоких геологических формациях и перевод ОЯТ в наиболее безопасные условия хранения [65, 67]. Концепций обращения с ОЯТ [20] предусмотрен вывоз ОТВС реакторов РБМК-1000 с площадки ЛАЭС в централизованное сухое хранилище ХОТ-2 на ФГУП «Горно-химический комбинат».

Уже в последующие 2013 и 2014 гг. количество переведенного на «сухое» долговременное хранение ранее накопленного ОЯТ превысило в 2 раза количество ОЯТ, выгруженного из реакторов всех энергоблоков ЛАЭС [73].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлена комплексная оценка потенциальной опасности воздействия на окружающую среду Ленинградской АЭС. В ходе работы были выполнены основные поставленные задачи.

Рассмотрены теоретические основы обеспечения радиационной безопасности. Раскрыты основные понятия радиационной безопасности, ее принципы, задачи и нормирование. Отдельным пунктом выделено нормирование малых доз радиации, так как эта проблема является актуальной для оценки радиационного воздействия атомной энергетики при нормальной эксплуатации. Были изучены основные фазы механизма биологического воздействия ионизирующих излучений. Рассмотрены особенности обеспечения радиационной безопасности на объектах атомной энергетики и проблемы образования отходов ядерного топливного цикла.

На основании теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы:

1. Работа Ленинградской АЭС в штатном режиме сопровождается регулярными выбросами инертных радиоактивных газов и радиоактивных аэрозолей, которые в своем составе содержат как естественные, так и искусственные радионуклиды, среди которых присутствуют долгоживущие биологически значимые радионуклиды ^{137}Cs и ^{90}Sr ;
2. Выбросы радиоактивных аэрозолей и радиоактивных инертных газов редко превышает 1-5% от допустимого выброса. Содержание техногенных радионуклидов в атмосферном воздухе и почве значительно

ниже норм, установленных НРБ-99/2009. Содержание ^{137}Cs и ^{90}Sr даже с учетом их миграции по трофическим цепям и постепенным увеличением концентрации в растительности, грибах, ягодах и сельскохозяйственной продукции существенно ниже установленных норм (до 10 раз ниже естественного фона);

3. Создаваемое выбрасываемыми техногенными радионуклидами дополнительное (к естественному) облучение является объектом нормирования малых доз радиации. С учетом рекомендованной МКРЗ концепции беспорогового действия радиации, это облучение является вредным и может быть причиной возникновения стохастических эффектов, в том числе злокачественных опухолей. Однако по современным данным, малые дозы радиации не являются причиной каких либо вредных мутационных изменений, а сама концепция беспорогового действия радиации подвергается критике. Тем не менее, этот вопрос остается открытым, так как на данный момент невозможно точно экстраполировать на человека результат экспериментальных данных, а эпидемиологические данные по численности наблюдаемых популяций человека и срокам наблюдения недостаточно репрезентативные;
4. В соответствии с принципами радиационной безопасности при оценке воздействия радиационных факторов важно учитывать хозяйственные и социально-экономические аспекты, так как необоснованное вмешательство в виде мероприятий по защите населения от ионизирующего излучения может повлечь за собой только нарушение нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории. Подобное вмешательство может повлечь за собой не только экономический ущерб, но и неблагоприятное воздействие на здоровье и психическое состояние населения. Это особенно актуально для Ленинградской АЭС, которая обеспечивает 50% энергопотребления третьего по величине города

Европы – Санкт-Петербурга, а также является градообразующим предприятием для г. Сосновый Бор.

5. Проводимая на данный момент политика по соблюдению экологической и радиационной безопасности на Ленинградской АЭС соответствует установленным нормам, что подтверждается, также, мероприятиями по модернизации энергоблоков, комплексов по переработки РАО и методов обращения с ОЯТ. Тем не менее, проблема безопасного и эффективного обращения с РАО и ОЯТ на данный момент не решена окончательно. На сегодняшний день самым эффективным методом окончательной утилизации РАО и ОЯТ является их полная изоляция от окружающей среды в специальных могильниках, оборудованных в глубоких геологических формациях. Среди методов обращения с ОЯТ возможно широкое внедрение замкнутого ядерного топливного цикла, предполагающего повторное использование ядерного топлива. Все эти методы сопровождаются дополнительными рисками утечки опасных радиоактивных и химических веществ в окружающую среду и на сегодняшний день являются чрезвычайно дорогостоящими;
6. На основании данных по выбросам основных загрязняющих химических веществ в составе сточных вод Ленинградской АЭС можно сделать вывод, что химическое воздействие на водоем-охладитель – Копорскую губу – находится в пределах нормы, превышений ПДК не выявлено.
7. Среди реально существующих сильных антропогенных воздействий в результате функционирования ЛАЭС на окружающую среду наиболее масштабным является тепловое загрязнение Копорской губы Финского залива. Достигаемая разница в 10 °С между температурой заборных и сбросных вод приводит к серьезным изменениям физических, химических, биохимических и биологических процессов в водоеме. Как следствие измененных экологических условий, для Копорской губы стало характерным эвтрофирование прибрежных вод и появление до 45 водных видов-вселенцев. Последнее причисляется уже к биологическому

загрязнению и может повлечь за собой вытеснение местных видов в результате конкуренции, что приведет к упрощению биологического разнообразия местных экосистем и, как следствие, к снижению их способности противостоять внешним воздействиям.

Несмотря на серьезные проблемы атомной энергетики, среди которых чрезвычайная дороговизна эксплуатации, небезопасность и накопление радиоактивных отходов, имеющиеся у нее конкурентные преимущества в виде стабильных запасов ядерного топлива, его колоссальной энергоемкости и практически полного отсутствия вредных выбросов в окружающую среду пророчат большое будущее для технологий мирного атома. На сегодняшний день обеспечение безопасности не исключает полностью риск возникновения чрезвычайной ситуации на АЭС, что подтверждается статистикой возникновения радиационных аварий, свидетельствующих о потенциальном риске глобального радиационного заражения. Тем не менее, достигнутый на сегодняшний день уровень безопасности позволяет причислить АЭС к одним из самых безопасных объектов мировой энергетики. Также ведется постоянная работа по совершенствованию технологий утилизации РАО и ОЯТ.

В современном постиндустриальном обществе, где с каждым годом на порядок увеличивается потребность в электроэнергии, но при этом идет речь о глобальном внедрении концепции устойчивого развития, минимизации воздействия на окружающую среду, а экологическая безопасность является одной из ключевых частей национальной безопасности, противоречиво говорить о развитии традиционных энергоресурсов, таких как каменный уголь, мазут, природный газ и энергию ГЭС. При этом известные альтернативные источники энергии не отличаются стабильностью и, тем более, они явно не соответствуют потребностям человечества. В таких обстоятельствах атомная энергетика может выступить компромиссом, который гарантирует и

хозяйственные потребности человека, и минимальное воздействие на окружающую среду.

Ленинградская АЭС, не смотря на подходящие сроки эксплуатации, сегодня является одним из примеров не только эффективной выработки электроэнергии, но и примером удачного экологического менеджмента и достойного уровня обеспечения радиационной безопасности.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Агроэкология / под ред. В.А. Черникова, А.И. Чекереса. – М.: Колос, 2000.
2. Александров Ю.А. Основы радиационной экологии: Учебное пособие / Мар. гос. ун-т; Ю.А. Александров. – Йошкар-Ола: 2007.
3. Алимов А. Ф., Панов В. Е., Крылов П. И., Телеш В. И., Быченков Д. Е., Зимин В. Л., Максимов Е. В., Филатова Л. А. Проблема антропогенного вселения чужеродных организмов в водоемы бассейна Финского залива // Экологическая обстановка в Санкт-Петербурге и Ленинградской области в 1997 году. Справочно-аналитический обзор - Спб., 1998. – С. 243-249.
4. Асаенок И.С. Радиационная безопасность: Учеб. пособие / И.С. Асаенок, А.И. Навоша. – Мн.: Бестпринт, 2004.
5. Асмолов В.Г., Гагаринский А.Ю., Сидоренко В.А., Чернилин Ю.Ф. Общая редакция Сидоренко В.А.: Атомная энергетика. Оценка прошлого, реалии настоящего, ожидания будущего. – М.: ИздАТ, 2004.
6. Богданов И.М., Сорокина М.А., Маслюк А.И. Проблема оценки эффектов воздействия «малых» доз ионизирующего излучения // Бюллетень сибирской медицины. – 2005. – 2. – с. 145-151

7. Бударков В.А., Калмыков М.В. Радиационная безопасность персонала и населения // Ветеринарная патология. – 2002. – 3. – с. 152-164
8. Булдаков Л.А., Калистратова В.С. Радиоактивное излучение и здоровье. М.: Информ-Атом, 2003.
9. Бурлакова Е.Б., Голощапов А.Н., Горбунова Н.В. и др. Особенности биологического действия «малых» доз облучения // Рад. биология. Радиозкол. – 1996. – Т. 36. – № 4. – С. 610–631.
10. Василенко И. Я., Василенко О. И.. Радиационный риск при облучении в малых дозах ничтожно мал. // Бюллетень по атомной энергии. – 2001. – № 12. – С. 34-37.
11. Василенко И. Я., Василенко О. И. Радиация и человек. // Проблемы глобальной безопасности. – 2002. - № 6. - С. 13-16.
12. Воскресенский В.С. Изучение содержания радионуклидов в почвах городских и природных территорий // Вестник РУДН, серия Экология и безопасность жизнедеятельности. – 2009. - №1
13. Гусаров И.И. О защитных эффектах действия «малых» доз ионизирующего излучения. Обзор литературы // Аппаратура и новости радиац. измерений. 2001. № 4. С. 8–16.
14. Говорушко С.М.. Влияние Хозяйственной Деятельности на окружающую среду: Монография. – М.: 1999.
15. Интегральные оценки накопления РАО, подготовленных для захоронения в Федеральном и региональных ПЗРО, по предприятиям Госкорпорации «Росатом». Обоснование единой схемы размещения структурных элементов ЕГС РАО до 2030 года с использованием методов моделирования движения материальных потоков РАО. Отчёт. ОАО «ВНИПИ протехнологии», Арх. № А- 13930дсп. М.: 2013.
16. Карасев А.А., Силкин В.И. АЭС и радиационная безопасность // Наука и общество. – 2011 г. – №1. – С. 59-64

17. Кеирим-Маркус И.Б. Ещё о регламентации облучения человека // Мед. радиология и радиац. безопасность. - 2000. Т. 45, - № 3. - С. 41-44.
18. Корнеев А.В. Энергетическая стратегия США // США, Канада. – 2010. - № 10 (442). - С. 21-35.
19. Корогодин В.И., Корогодина В.Л. Онкогенные последствия облучения человека // Мед. радиология и радиац. безопасность. 1997. Т. 42, № 2. С. 26-30.
20. Концепция по обращению с отработавшим ядерным топливом Госкорпорации «Росатом». Утв. Приказом Госкорпорации «Росатом» от 29 декабря 2008 г. № 721.
21. Кинетика и регулирование ядерных реакторов: Учеб. пособие для вузов. – 2-е изд. перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1986.
22. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Атомная энергетика и биосфера // Вестник АН СССР. – 1991. – № 2. – С. 39-52.
23. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Оценка риска радиоактивного загрязнения окружающей среды при эксплуатации АЭС // Атомная энергия. – 1998. – Т. 85. – Вып. 2. – С. 158-164.
24. Крышев И.И., Сазыкина Т.Г. Радиоэкологическая обстановка в биосфере и реальность ее оптимизации // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». – 2009. - №8. – С. 203-212.
25. Крышев И.И., Алексахин Р.М., Сазыкина Т.Г., Блинова Л.Д., Зверева Г.Н., Краснов И.М., Санжарова Н.И., Фесенко С.В. Радиоактивность районов АЭС / Под. ред. д. ф.-м. н. И.И. Крышева. – М.: ИАЭ им. И.В. Курчатова, 1991.
26. Крышев И.И., Рязанцев Е.П. Экологическая безопасность ядерно-энергетического комплекса России. М.: ИздАТ, 2000.
27. Кузин А.М. Природный радиоактивный фон и его значение для биосферы Земли. М.: Наука, 1991.

28. Кузин А.М. Идеи радиационного гормезиса в атомном веке. М.: Наука, 1995.
29. Лунева Е.В. Оценка влияния атомных электростанций России на экосистемы водоемов-охладителей // Научный журнал «Известия КГТУ». – 2014 г. - №34. – С. 20-33.
30. Маркитанова Л.И. Защита от радиации: Учеб-метод. пособие. СПб.: Университет ИТМО; ИХиБТ, 2015.
31. Макаров, И.И. Моделирование гидротермических процессов водоемов-охладителей ТЭС и АЭС / И.И. Макаров, А.С. Соколов, С.Г. Шульман. – Москва: Энергоатомиздат, 1986.
32. Методы организации и ведения агроэкологического мониторинга сельскохозяйственных угодий в зонах техногенного загрязнения и оценка экологической обстановки в сельском хозяйстве в регионах размещения атомных электростанций и аварии на ЧАЭС. Под ред. Н.И. Санжаровой. - Обнинск: ВНИИСХРАЭ, 2010.
33. Муратов О.Э. Обеспечение ядерной и радиационной безопасности в Северо-Западном регионе России // Сборник материалов II Регионального форума-диалога «Атомная энергия, общество, безопасность», 2008 г.
34. Муратов О.Э. Ядерная и радиационная безопасность в Северо-Западном регионе России // Энергия: экономика, техника, экология. – 2011, – № 6, – С. 30-39
35. Орлова М. И., Панов В. Е., Крылов П. И., Телеш И. В., Хлебович В. В. Изменения в планктонных и донных сообществах восточной части Финского залива Балтийского моря в связи с биологическими инвазиями. // Труды Зоологического института РАН, Т. 279. Л., 1999. С. 305-325.
36. Перспективы развития атомной энергетики // Институт комплексных стратегических исследований. – 2011. - №4. – С. 1-2

- 37.Пестовский Ю.С. Биологическое действие ионизирующих излучений // Всероссийский журнал научных публикаций. – 2013. – №5(20). – С. 8-11
- 38.Росгидромет. ГУ «НПО Тайфун». Радиационная обстановка на территории России и сопредельных государств в 2007 году. – Обнинск, ГУ ВНИИГМИ-МЦД, 2008.
- 39.Радиационная медицина: учеб. пособие / А.Н. Гребенюк, В.И. Легеза, В.И. Евдокимов, Д.А. Сидоров; под. ред. С.С. Алексанина, А.Н. Гребенюка ; Всерос. центр. экстрен. и радиац. медицины им. А.М. Никифорова МЧС России. – СПб. : Политехника-сервис, 2013. – Ч. I : Основы биологического действия радиации.
- 40.Румынин В.Г., Макушенко М.Е. Прогноз последствий для экосистемы Копорской губы сбросов химических веществ и тепла в прибрежные воды при одновременной (нормальной) эксплуатации ЛАЭС-2 (с градирнями) и ЛАЭС. СПб.: СПбО ИГЭ РАН, 2010 г.
- 41.Санжарова Н.И. Радиоэкологический мониторинг агроэкосистем и ведение сельского хозяйства в зоне воздействия атомных электростанций. Автореф. дис... докт. биол. наук. – Обнинск, 1997.
- 42.Сборник рекомендаций Хельсинкской комиссии: Справочно-методическое пособие. СПб.: Диалог, 2008.
- 43.Сельскохозяйственная радиоэкология / под ред. Р.М. Алексахина, Н.А. Корнева. – М.: Экология, 1992.
- 44.Устинов О.А., Рахманов Б.Н., Пономарев В.М., Грибков О.И. Радиационная безопасность: Учебное пособие. - М.: МИИТ, 2010.
- 45.Филюшкин И.В., Петоян И.М. Обьективизация оценок канцерогенного риска у человека при низких уровнях облучения: новый взгляд на старую проблему //Мед. радиология и радиац. безопасность. – 2000. – Т. 45, - № 3. – С. 33-40.

- 46.Хвостова М.С. Радиационная и экологическая безопасность предприятий атомной отрасли // Безопасность в техносфере. – 2012 г. - №3. – С. 23-29
- 47.Шахвердов В.А., Шахвердова М.В. Типы и факторы загрязнения восточной части Финского залива и его береговой линии // Радиозэкологическая обстановка в биосфере и реальность ее оптимизации // Междисциплинарный научный и прикладной журнал «Биосфера». – 2015. - №5. – С. 101-113
- 48.Яблоков А. В. Миф об экологической чистоте атомной энергетики. Учебно-методический корректор «Психология». - М.: 2001.
- 49.Ярмоненко С.П. Низкие уровни излучения и здоровье: радиобиологические аспекты //Мед. радиология и радиац. безопасность. – 2000. – Т. 45. – № 3. – С. 5-32.
- 50.Ann-Britt Florin¹, Kerstin Mo, Filip Svensson, Ellen Schagerström, Lena Kautsky, Lena Bergström. First records of Conrad's false mussel, *Mytilopsis leucophaeata* (Conrad, 1831) in the southern Bothnian Sea, Sweden, near a nuclear power plant // BioInvasions Records (2013) Volume 2, Issue 4: 303–309
- 51.Ari O. Laine¹, Jukka Mattila, Annukka Lehtikoinen. First record of the brackish water dreissenid bivalve *Mytilopsis leucophaeata* in the northern Baltic Sea // Aquatic Invasions (2006) Volume 1, Issue 1: 38-41
- 52.Booz J., Feinendegen L.E. A microdosimetric understanding of low-dose radiation effects // Internat. J. Radiat. Biol. 1988. V. 53. № 1. P. 13–21.
- 53.Pierce D.A., Shimizu Yu., Preston D.L. Studies of the Mortality of Atomic Bomb Survivors. Report 12. Part I. Cancer: 1950–1990 // Radiation Research. - 1996. № 146. - p. 1–27.
- 54.Luan Y.C., Shieh M.C., Chen S.T. et al. Re-examining the health effects of radiation and its protection //Int. J. Low Radiation. 2006. V. 3, N 1. P. 27-44.
- 55.Luckey T.D. Hormesis with Ionizing Radiation. Tokyo: Boca Raton Publisher, CRC Press, 1980.

56. Luckey T.D. Radiation hormesis. Tokyo: Boca Raton Publisher, CRC Press, 1991.
57. NUREG/CR-2300, «PRA Procedures Guide: A Guide To The Performance Of Probabilistic Risk Assessment For Nuclear Power Plants», January 1983.
58. Rozhdestvensky L.M. Alternatives of non-threshold and threshold concepts of carcinogenic and mutagenic effects of low LET radiation: the analysis of postulates and arguments // Int. J. Low Radiation. 2006. V. 2, N 3/4. P. 154-171.
59. Fleck C.M. Erklärung der Strahlen-Hormesis // Atomwirtsch. Atomtechn. 1992. № 11. S. 523–529.
60. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Report: "Summary of low-dose radiation effects on health". New York: United Nations, 2010.
61. UNSCEAR (United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation). Sources and effects of ionizing radiation / Document A/AC 82/R 542. New York: United Nations, 1994.

Электронные ресурсы

62. Атомные электростанции России [Электронный ресурс] // Росэнергоатом [Офиц. сайт]. URL: www.rosenergoatom.ru/stations_projects/russian_nuclear (Дата обращения 22.01.2017)
63. Бекман И. Н. Ядерная индустрия [Электронный ресурс]: курс лекций. URL: <http://profbeckman.narod.ru/NIL17.pdf> (Дата обращения: 16.05.2017)
64. Васильев Д.К. Анализ изменения мезоклиматических условий районов расположения АЭС при нормальной эксплуатации (Ленинградская и Белоярская АЭС). 2016 г. [Электронный ресурс] // Архив открытого доступа Санкт-Петербургского государственного университета [Интернет-портал]. URL: https://dspace.spbu.ru/bitstream/11701/5224/1/Vasilev_NPP_meso_climatic_conditions_analysis.pdf (Дата обращения: 20.05.2017)

65. Генеральная уборка. На Ленинградской АЭС готовятся к вывозу ОЯТ [Электронный ресурс] // Ленинградская АЭС [Официальный сайт]. URL: <http://www.lennpp.rosenergoatom.ru> (Дата обращения: 21.05.2017)
66. Глоссарий на базе МКРЗ-99 [Электронный ресурс] // Электронный архив Уральского федерального университета [Интернет-портал]. URL: http://elar.urfu.ru/bitstream/10995/1394/5/1331362_glossary.pdf (Дата обращения: 25.05.2017)
67. Дорофеев А.Н., Канашов Б.А., Перепелкин С.О., Смирнов В.П. Предложения по обращению с некондиционными ОТВС РБМК-1000. Сборник докладов VII Международного ядерного форума «Безопасность ядерных технологий: транспортирование радиоактивных материалов – «АТОМТРАНС-2012», СПб, 17-21 сентября 2012 г. [Электронный ресурс] // ООО Научно-производственная фирма «Сосны». URL: http://sosny.ru/files/publications/AT_RBMK_ru.pdf (Дата обращения: 21.05.2017)
68. Концептуальный подход. Особое внимание к безопасности обращения с РАО [Электронный ресурс] // Газета Ленинградской атомной станции «Вестник ЛАЭС». – 2015 г. – №14. URL: http://www.laes.ru/content/prensa/vestnik/2015/VL_14_2015s.pdf (Дата обращения: 21.05.2017)
69. Ленинградская АЭС [Электронный ресурс] / Ленинградская АЭС [Официальный сайт]. URL: <http://www.lennpp.rosenergoatom.ru> (Дата обращения: 15.05.2017)
70. Ленинградская АЭС: рост выработки электроэнергии в декабре 2016 г. составил 18% [Электронный ресурс] / Российское атомное сообщество [Официальный сайт]. URL: <http://www.atomic-energy.ru/news/2017/01/10/71528> (Дата обращения: 16.05.2017)
71. Ленинградская АЭС [Электронный ресурс] / Свободная энциклопедия Википедия [Интернет-портал]. URL:

- https://ru.wikipedia.org/wiki/Ленинградская_АЭС (Дата обращения: 15.05.2017)
72. Ленинградская область [Электронный ресурс] / Свободная энциклопедия Википедия [Интернет-портал]. URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Ленинградская_область (Дата обращения: 15.05.2017)
73. Обращение с отработавшим ядерным топливом. О результатах внедрения технологии контейнерного хранения и вывоза отработавшего ядерного топлива Ленинградской АЭС [Электронный ресурс] // Общественный совет госкорпорации «Росатом». URL: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/zasedania_2015/Zasedanie_13.04.2015/Lozhnikov_I.N._O_rezultatax_vnedreniya_tekhnologii_kontejnernogo_xraneniya_i_vyvoda_OYAT_LAES.pdf (Дата обращения: 21.05.2017)
74. Объемы и места расположения накопленных РАО [Электронный ресурс] // ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами [Официальный сайт]. URL: <http://www.norao.ru/waste/where-is/> (Дата обращения: 17.05.2017)
75. Об экологической ситуации в Ленинградской области в 2015 году [Электронный ресурс] // Комитет по природным ресурсам Ленинградской области [Официальный сайт]. URL: http://www.nature.lenobl.ru/Files/file/doklad_ob_ekologicheskoi_situatsii_v_Lenooblasti_v_2015_.pdf (Дата обращения: 20.05.2017)
76. Отчет по экологической безопасности за 2015 год [Электронный ресурс] // Росэнергоатом. Ленинградская АЭС [Официальный сайт]. URL: www.lennpp.rosenergoatom.ru/resources/14de29804d51d34988b489b77ae2e909/EkoReportLenNPP_2015.pdf (Дата обращения: 19.01.2017)
77. Отчет по экологической безопасности за 2015 год [Электронный ресурс] // ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» [Официальный сайт]. URL:

- [http://www.norao.ru/upload/catalog_NORAO_200x200%20\(2\).pdf](http://www.norao.ru/upload/catalog_NORAO_200x200%20(2).pdf) (Дата обращения: 21.05.2017)
78. Оценка влияния Ленинградской АЭС и прогноз возможного воздействия строящейся Ленинградской АЭС-2 на объекты окружающей среды и здоровье населения г. Сосновый Бор Ленинградской области [Электронный ресурс] // Общественный совет Госкорпорации «Росатом» [Официальный сайт]. URL: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/News/Atomexpo%202016/2016.05.31_03_Xutoryanskij.pdf (Дата обращения: 16.05.2017)
79. Поисково-информационная служба Яндекс.Карты [Электронный ресурс]. URL: maps.yandex.ru (Дата обращения: 16.05.2017)
80. Пункт захоронения радиоактивных отходов низкого и среднего уровня активности в районе расположения Ленинградского филиала Северо-Западного территориального округа ФГУП «РосРАО». Предварительные материалы по оценке воздействия на окружающую среду [Электронный ресурс] // ФГУП «Национальный оператор по обращению с радиоактивными отходами» [Официальный сайт]. URL: http://www.norao.ru/upload/OVOS_SosnoviyBor.pdf (Дата обращения: 21.05.2017)
81. Разработка проектной документации комплекса по хранению и переработки РАО. Материалы по оценке воздействия на окружающую среду (2014) [Электронный ресурс] // Международное экологическое объединение «Беллона» [Официальный сайт]. URL: http://bellona.org/content/uploads/sites/4/2015/12/fil_OVOS_KP_RAO_LAES_sm.pdf (Дата обращения: 16.05.2017)
82. Рылов. М.И., Муратов О.Э., Тихонов М.Н. Системный анализ и оценка радиационной обстановки в Ленинградской области (08.06.2016) [Электронный ресурс] // Агентство ПРоАтом [Официальный сайт] URL:

<http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=article&sid=6796>

(Дата обращения: 16.05.2017)

83. СанПиН 2.3.2.1078-01 Гигиенические требования безопасности и пищевой ценности пищевых продуктов [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Интернет-портал]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/901806306> (Дата обращения: 25.05.2017)

84. СанПиН 2.6.1.2523-09. Нормы радиационной безопасности. («Санитарные правила и нормативы») (Зарегистрировано в Минюсте РФ 14.08.2009 N 14534) [Электронный ресурс] // Правовой портал «КонсультантПлюс» [Интернет-портал]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_90936/ (Дата обращения: 01.04.2017)

85. С какими результатами ЛАЭС подошла к началу 2017 г. [Электронный ресурс] / Агентство ПРоАтом [Офиц. сайт]. URL: <http://www.proatom.ru/modules.php?name=News&file=print&sid=7247> (Дата обращения: 16.05.2017)

86. СП АС 03 Санитарные правила проектирования и эксплуатации атомных станций [Электронный ресурс] // Российский архив государственных стандартов [Интернет-портал]. URL: <http://www.rags.ru/stroyka/text/42050/> (Дата обращения: 25.05.2017)

87. СП 2.6.1.759-99 Допустимые уровни содержания цезия-137 и стронция-90 в продукции лесного хозяйства [Электронный ресурс] // Электронный фонд правовой и нормативно-технической документации [Интернет-портал]. URL: <http://docs.cntd.ru/document/1200030083> (Дата обращения: 25.05.2017)

88. Талевлин А.В., Бодров О.В., Серветник В.В., Лорентзен И. Обращение с радиоактивными отходами и отработавшим ядерным топливом в России. Взгляд неправительственных организаций [Электронный ресурс] /

- Общественный совет Госкорпорации «Росатом» [Офиц. сайт]. URL: http://www.osatom.ru/mediafiles/u/files/News/Atomexpo%202016/2016.06.01_Doklad_RAO_i_OYAT_Talevlin.pdf (Дата обращения: 14.05.2017)
- 89.Топливный цикл Ленинградской АЭС [Электронный ресурс] // Ленинградская АЭС [Офиц. сайт]. URL: http://www.laes.ru/new_inpp/mindex.shtml?../content/actual/2011/22_11_11_2.htm (Дата обращения: 21.05.2017)
- 90.Федеральный закон «Об обращении с радиоактивными отходами и о внесении изменений в отдельные законодательные акты Российской Федерации» 11.07.2011. N 190-ФЗ [Электронный ресурс] // Правовой портал «КонсультантПлюс» [Интернет-портал]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_116552/ (Дата обращения: 25.05.2017)
- 91.Федеральный закон «О радиационной безопасности населения» от 09.01.1996 N 3-ФЗ (последняя редакция) [Электронный ресурс] // Правовой портал «КонсультантПлюс» [Интернет-портал]. URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_8797/ (Дата обращения: 04.04.2017)
- 92.Key World Energy Statistics 2015 [Электронный ресурс] // International Energy Agency [Офиц. сайт]. URL: http://www.iea.org/publications/freepublications/publication/KeyWorld_Statistics_2015.pdf (Дата обращения 15.05.2017)
- 93.Spent nuclear fuel [Электронный ресурс] // United States Nuclear Regulatory Commission [Офиц. сайт]. URL: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/spent-nuclear-fuel.html> (Дата обращения: 21.05.2017)
- 94.The Future of Nuclear Power [Электронный ресурс] // Massachusetts Institute of Technology [Офиц. сайт]. URL: http://mitei.mit.edu/system/files/nuclearpower-full_0.pdf (Дата обращения: 31.03.2017)

95. World Nuclear Power Reactors & Uranium Requirements [Электронный ресурс] // World Nuclear Association [Официальный сайт]. URL: <http://www.world-nuclear.org/information-library/facts-and-figures/world-nuclear-power-reactors-and-uranium-requirements.aspx> (Дата обращения: 21.05.2017)