



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

Кафедра прикладной и системной экологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(Бакалаврская работа)

На тему Метеорологические факторы рассеивания радионуклидов в районе ЛАЭС

Исполнитель _____ Мельникова Арина Игоревна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель _____ кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

_____ Алексеев Денис Константинович
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой _____ (подпись)

_____ кандидат географических наук, доцент
(ученая степень, ученое звание)

_____ Алексеев Денис Константинович
(фамилия, имя, отчество)

«18» 06 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Оглавление

Введение.....	4
1. Общее описание Ленинградской АЭС.....	7
1.1. Общие сведения о ЛАЭС.....	7
1.2. Техническая структура.....	8
1.3. Физико-географическая характеристика района размещения ЛАЭС	10
1.3.1 Гидрологические условия.....	11
1.3.2 Климатическая характеристика.....	12
1.3.3 Геологические и инженерно-геологические условия.....	13
1.3.4 Почвенные условия.....	14
1.3.5 Растительный покров.....	15
1.3.6 Животный мир.....	16
1.3.7 Особо охраняемые природные территории.....	17
2. Теоретические основы распространения радионуклидов в атмосфере.....	18
2.1. Основные понятия и виды радионуклидов.....	18
2.2. Агрегатное состояние.....	20
2.3. Миграция радионуклидов.....	20
3. Влияние метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов. ...	23
3.1. Скорость и направление ветра.....	23
3.2. Температурная стратификация атмосферы.....	25
3.3. Устойчивость атмосферы и классы устойчивости по Пасквиллу.....	27
3.4. Осадки.....	29
3.5. Шероховатость подстилающей поверхности.....	30
4. Оценка влияния метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов в районе ЛАЭС.....	32
4.1. Материалы и методы.....	32
4.2. Расчет кратковременного фактора разбавления.....	37

4.3 Расчет долговременного фактора разбавления	39
4.4. Выводы по результатам расчетов	40
Заключение	43
Список литературы	46
Приложения	50

Введение

В условиях растущего спроса на энергию, увеличивающихся масштабах использования ископаемого топлива, приводящих к истощению энергетических ресурсов, и возрастающих объемов выбросов, которые провоцируют изменение климата, все чаще встает вопрос перехода к энергетике устойчивого развития. Решением данного вопроса становится развитие атомной энергетики. Атомные электростанции практически не выбрасывают парниковых газов, работают в круглосуточном режиме в независимости от погодных условий, отличаясь высокой эффективностью, сочетают в себе экологичность и надежность.

Несмотря на все положительные стороны атомной энергетики, эксплуатация АЭС сопряжена с определенными рисками, особенно в случае аварийных ситуаций. Одним из наиболее серьезных последствий таких инцидентов является выброс радионуклидов в атмосферу, что влечет за собой значительное радиационное загрязнение окружающей среды. Метеорологические факторы, такие как скорость и направление ветра, температурная стратификация и устойчивость атмосферы, осадки и шероховатость подстилающей поверхности, играют решающую роль в процессах рассеивания радионуклидов. Важным является использование этих параметров для расчетов кратковременного и долговременного факторов разбавления, которые позволяют прогнозировать потенциальные радиационные риски для окружающей среды и населения, а также оптимизировать системы мониторинга и системы реагирования в случае аварийных ситуаций.

Ленинградская АЭС (ЛАЭС) является важным объектом для изучения влияния метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов в

атмосфере. Климатическими особенностями района размещения данной станции являются: значительное количество осадков, высокая относительная влажность воздуха (72-86%), увеличенная изменчивость ветрового режима, преобладание циклонической активности, а также ведущим климатообразующим фактором является циркуляция воздушных масс. Все эти особенности климатического режима формируют особые условия переноса и разбавления радиоактивных веществ. Поэтому оценка влияния метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов ввиду климатических особенностей района расположения ЛАЭС является актуальной темой.

Цель данной работы — оценить влияние метеорологических факторов на процессы рассеивания радионуклидов в районе ЛАЭС.

Указанная цель обусловила необходимость постановки и решения следующих основных задач:

1. Дать общее описание ЛАЭС и проанализировать физико-географические особенности её района расположения;
2. Рассмотреть теоретические основы распространения радионуклидов в атмосфере;
3. Исследовать влияние метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов;
4. Выполнить количественную оценку кратковременного и долговременного факторов разбавления для ЛАЭС на основе методики и сделать выводы по полученным результатам;

Объектом исследования является процесс рассеивания радионуклидов в атмосфере в районе АЭС (ЛАЭС).

Предметом исследования выступают метеорологические факторы, определяющие процессы рассеивания радионуклидов в приземном слое атмосферы в районе АЭС (ЛАЭС).

Теоретической основой для написания данной работы послужили учебные и научные пособия по радиационной безопасности, нормативно-техническая документация, методика стратификации атмосферы по Пасквиллу, данные инженерно-экологических изысканий, НТД 38.220.56-84 для расчета факторов разбавления. Также работа содержит выдержки из нормативных документов, таких как НРБ-99/2009, ОНД-86, Приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 ноября 2012 года №639, методические указания МПА-98 и МУ 2.6.1.042-2001, рекомендации по безопасности МАГАТЭ.

Практическая значимость исследования заключается в прогнозировании зон потенциального загрязнения при радиационных авариях и долговременном воздействии при стационарных условиях, с учетом регулярного изменения метеоусловий и эффективности рассеивания, основанное на расчетах, позволяющих анализировать влияние метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов.

Научная новизна работы заключается в комплексном подходе, который объединяет метеорологию, радиационную и экологическую безопасность, а также инженерные расчеты. Результаты вносят вклад в развитие методов прогнозирования атмосферного переноса и рассеивания радионуклидов для различных АЭС с схожими климатическими характеристиками.

1. Общее описание Ленинградской АЭС

1.1. Общие сведения о ЛАЭС

Ленинградская атомная станция (ЛАЭС) занимает ключевую позицию среди энергетических комплексов Российской Федерации и находится в Сосновом Бору Ленинградской области. Уникальность станции заключается в использовании различных типов реакторов: каналные РБМК, работающие на уране и графите, соседствуют с реакторами ВВЭР. В настоящее время на ЛАЭС шесть энергоблоков, из которых блоки №3,4 РБМК-1000 и блоки № 5,6 ВВЭР-1200 находятся в работе [2].

Строительство Ленинградской атомной электростанции стартовало в июле 1967 года, а уже 23 декабря 1973 года был введен в эксплуатацию первый реактор. Следует подчеркнуть, что ЛАЭС стала первой атомной электрической станцией в Советском Союзе с реактором РБМК-1000: энергоблоки 2, 3 и 4 были запущены в 1975, 1979 и 1981 годах соответственно [2].

Блоки №1 и №2 Ленинградской АЭС были выведены из эксплуатации: 21 декабря 2018 года — первый, 10 ноября 2020 года — второй. Данные реакторы РБМК-1000 стали первыми в российской практике, завершившими эксплуатацию. Вместо этих реакторов 29 октября 2018 года был запущен энергоблок №5, а 22 марта 2021 года энергоблок №6. Данные энергоблоки имеют новые реакторы ВВЭР-1200. В 2022 году стартовало строительство двух новых реакторов ВВЭР-1200, которые должны заменить блоки РБМК-1000 №3 и №4. Запуск новых энергоблоков ожидается в 2030 и 2032 годах. ЛАЭС играет центральную роль в энергетической инфраструктуре Северо-

Запада России, обеспечивая более 50% электрических нужд Санкт-Петербурга и Ленинградской области. [2].

1.2. Техническая структура

На ЛАЭС функционируют два типа реакторов: графитовые РБМК-1000, использующие тепловые нейтроны, и водо-водяные ВВЭР-1200.

Реактор РБМК-1000 (реактор большой мощности канальный) представляет собой установку с одноконтурной схемой, использующую графит для замедления нейтронов и воду в качестве теплоносителя. Теплопроводная жидкость передает тепло, полученное в результате ядерных реакций, генераторам, где осуществляется преобразование тепла в пар, который используется для дальнейшей выработки электроэнергии. На рисунке 1 представлена наглядная схема реактора РБМК-1000.

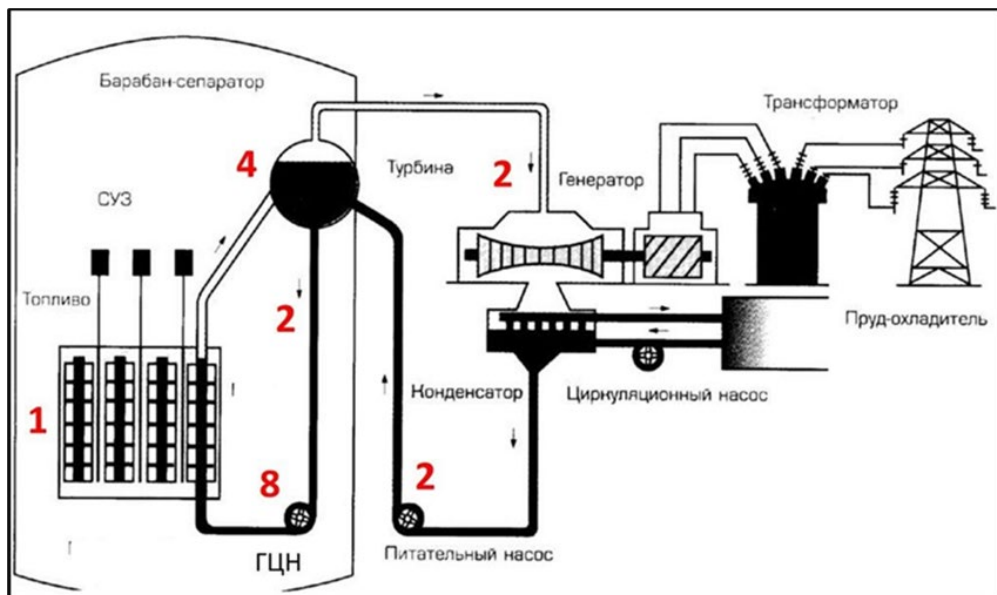


Рисунок 1 — Схема реактора РБМК-1000

Установка включает две независимые циркуляционные петли, что значительно повышает её надежность. Каждый реакторный блок оборудован четырьмя насосами, гарантируя необходимую циркуляцию и эффективное охлаждение ядерного реактора [27].

Реакторы ВВЭР-1200 (энергетический водо-водяной реактор) значительно отличаются от РБМК, так как относятся к категории ядерных установок с водой под давлением. Обладая высокой мощностью и повышенной устойчивостью к аварийным ситуациям, они находят широкое применение на ЛАЭС [6]. На рисунке 2 представлена схема реактора ВВЭР-1200.

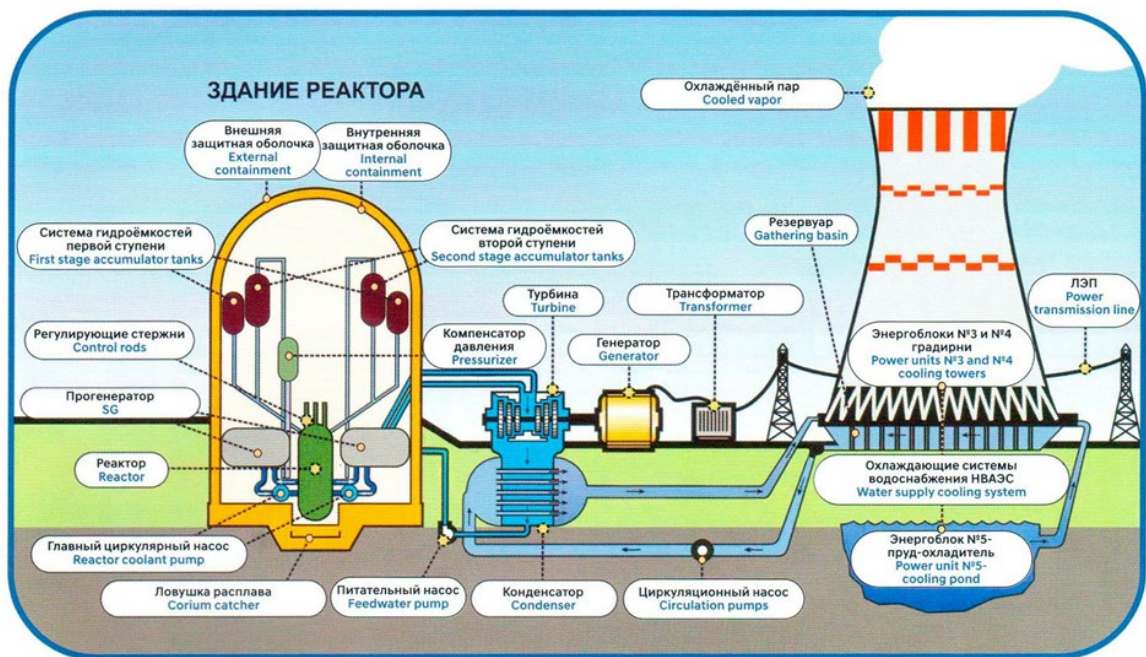


Рисунок 2 — Схема реактора ВВЭР-1200

При разработке реакторов ВВЭР-1200 используется двухконтурная корпусная ядерная установка, производящая пар. Её конструкция имеет систему из четырех петель охлаждения, включающая горизонтально расположенные парогенераторы и основной циркуляционный насос. Были

внедрены усовершенствования, затрагивающие все элементы внутренней конструкции: защитные оболочки, шахты, экраны и разнообразные датчики. Основной целью данных преобразований выступает повышение надежности работы оборудования и расширение срока службы в условиях высоких эксплуатационных нагрузок [6].

Таким образом, на данный момент Ленинградская атомная электростанция (ЛАЭС) оснащена энергоблоками, работающими на реакторах типа РБМК и ВВЭР, что способствует снижению эксплуатационных расходов. Многообразие реакторных установок даёт возможность оперативно реагировать на колебания спроса на электроэнергию в региональной сети.

1.3. Физико-географическая характеристика района размещения ЛАЭС

В географическом отношении исследуемый объект локализуется в Северо-Западной части европейской территории Российской Федерации. Его географические рамки охватывают восточную часть Копорской губы, простирающейся от мыса Долгого и устья р. Систа, до мыса Устинский с полуостровом, расположенный севернее Соснового Бора. Восточная граница объекта проходит вдоль системы рек и заболоченных территорий, обрамляющих озеро Лубенское.

В административно-территориальном разрезе данный район входит в состав Ленинградской области и располагается в 35 км западнее от Санкт-Петербурга. Его непосредственным центром выступает город Сосновый Бор, граничащий с побережьем Финского залива.

Городской округ Сосновый Бор целиком окружён Ломоносовским районом. Обладая площадью, равной 88,41 км², этот округ отличается развитой транспортной инфраструктурой. Здесь функционируют

автомобильные и железнодорожные маршруты, а также морские причалы для маломерных судов, обеспечивая высокий уровень эффективности грузоперевозок. По территории округа протекает река Коваши. Расположение Ленинградской АЭС представлено на рисунке 3.

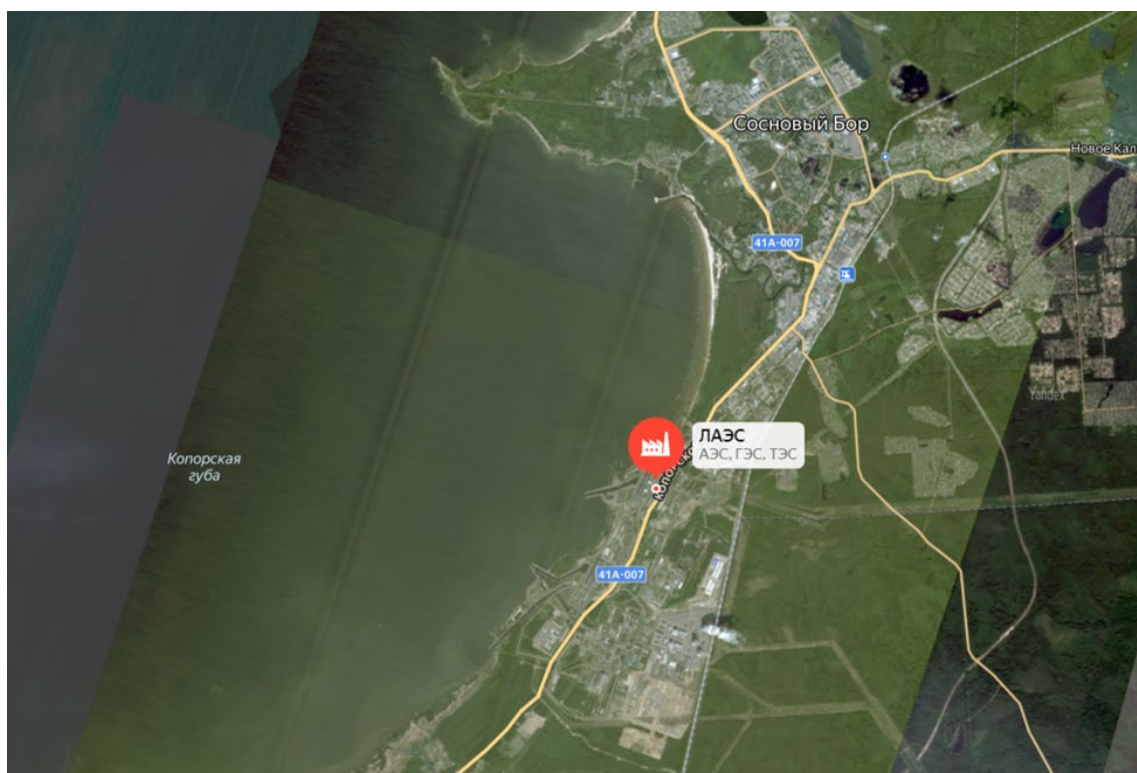


Рисунок 3 — Расположение ЛАЭС

1.3.1 Гидрологические условия

В гидрологическом плане Ленинградская атомная электростанция располагается в области Копорской губы, находящейся в Финском заливе Балтийского моря. В пределах 30 км от станции расположены водные объекты: реки Систа, Воронка, Коваши и озера Копанское, Глубокое, Лубенское и Шепелевское.

Водный режим данной области характеризуется существенным весенним половодьем, летне-осенними паводками, иногда превышающими показатели весеннего половодья и зимней межени. Ледяной покров на реках образуется в конце декабря или начале января, средняя толщина льда на местных реках (Систа, Коваши) составляет от 40 до 50 см, в особенно суровые зимние месяцы достигая 60-70 см. Первоначальное вскрытие водоемов наблюдается в начале апреля, ледовые явления имеют продолжительность 90-110 дней.

В соответствии с приказом Министерства Сельского хозяйства РФ от 21.10.2020 №620 (ред. от 21.09.2023) «Об утверждении правил рыболовства для Западного рыбохозяйственного бассейна», в акватории Копорской губы Финского залива установлен запрет на добычу водных биоресурсов в радиусе 1 км и менее по обе стороны и 0,2 км и менее одного километра от действующих гидротехнических сооружений ЛАЭС [21]. В данном регионе объектами рыболовства признаны: реки Систа, Воронка, Коваши.

1.3.2 Климатическая характеристика

Согласно СП 131.13330.2020 «Строительная климатология», территория Сосновоборского городского округа относится к климатическому району II В [26, Приложение Б; Приложение А].

Климат в данном регионе умеренно-континентальный с переходом к морскому, характеризующийся длительными относительно холодными зимами и мягкими, влажными летами с значительными осадками на протяжении года. Важнейшим климатообразующим фактором выступает циркуляция воздушных масс. В зимний период преобладают юго-западные ветры, способствующие поступлению как атлантического, так и континентального воздуха. Летний период отмечен доминированием

западных и северо-западных ветров. Атлантические воздушные массы способствуют более мягкой зиме и прохладному лету, а также часто обуславливают облачность и осадки.

В Сосновом Бору наблюдается достаточно стабильные показатели относительной влажности воздуха. Обычно показатели колеблются в диапазоне от 72% (май) до 86% (январь).

В январе средняя температура воздуха составляет $-7,6$ °С, а в июле $+17,1$ °С. Годовой климатический профиль региона демонстрирует среднегодовую температуру в $+17,1$ °С, что является показателем умеренно теплого климата. Среднегодовая скорость ветра $2,9$ м/с. Годовые осадки составляют 570 мм, что указывает на достаточное увлажнение территории.

Снежный покров формируется во второй половине ноября и сохраняется до середины апреля, обеспечивая устойчивое покрытие на протяжении значительной части холодного периода.

На западе Ленинградской области период с температурой выше 5°C составляет около 170 дней в году. Однако количество безоблачных дней редко превышает 30 , что указывает на значительную роль облачности в формировании микроклиматических условий региона.

Зимой наблюдается высокая облачность, что существенно замедляет процесс охлаждения воздуха. Облачный покров в данном случае препятствует отходу тепла из приземного слоя атмосферы, смягчая зимние температуры. В весенний и летний периоды количество облачных дней минимально, что способствует более интенсивному прогреву атмосферы и поверхности земли. Осенью же облачность значительно возрастает, что приводит к снижению температуры и увеличению влажности.

1.3.3 Геологические и инженерно-геологические условия

Балтийско-ладожский глинт (уступ) выступает границей, разделяющей Ломоносовский район на две геоморфологические части: Ижорскую возвышенность на юге и предглинтовую низменность на севере.

Город Сосновый Бор и прилегающие прибрежные территории Ломоносовского района располагаются на первых двух морских террасах. Эти территории представляют собой низменные участки предглинтовой равнины, где абсолютные высоты не превышают 0-15 м над уровнем моря и формировались на основе вендских глин.

Прибрежная зона Ломоносовского района и г. Сосновый Бор расположена на равнинных участках, относящихся к 1-й и 2-й морским террасам, высота которых не превышает 15 метров над уровнем моря.

Геолого-литологические характеристики территории ЛАЭС на глубину до 15 метров представлены четвертичными отложениями (включающими пески, супеси, суглинки) и кембрийскими отложениями (состоящими из глины с примесями мелкозернистых песков и слабосцементированных песчаников).

1.3.4 Почвенные условия

Согласно почвенно-географическому районированию территории Российской Федерации, Ломоносовский район Ленинградской области, входящий в состав центральной тайги лесной биоклиматической зоны, выделяется в Прибалтийской провинции южно-таежной подзоны. Данный район характеризуется наличием подзолистых, подзолисто-глеевых и торфяных типов почв, формирующихся под еловыми, сосновыми и смешанными лесами.

Лесная подстилка в основном является грубогумусной или торфянистой. Под ней располагается оподзоленный гумусовый горизонт.

Почвы подзолистого типа формируются в еловых и сосновых лесах. Они сохраняют характерные черты для данного типа в таежной зоне, однако отличаются специфическими признаками из-за более теплого климата и недостатка питательных веществ. Такими признаками могут являться: ускоренное разложение органики и деградация подстилки, повышение рН, ослабление элювиального процесса (вымывания), ухудшение физических свойств и другие [4].

1.3.5 Растительный покров

По классификации геоботанического районирования, исследуемая область считается частью южной тайги. Растительный покров данного участка в основном представлен типичными таежными видами травянистого, кустарникового и древесного ярусов.

В кустарниковом ярусе произрастают ягодные культуры, среди которых черника, брусника и толокнянка. Клюква и иные виды ягод распространены на болотных территориях. В травяном ярусе преобладают мхи, лишайники, осока и папоротники, среди них особую ценность имеет лечебный сфагнум.

Заболоченные участки присутствуют в лесах повсеместно, сохраняя редкие охраняемые виды растений, такие как ландыш и росянка.

На нарушенных участках основное место занимают осина и береза, дополняемые хвойными деревьями — сосной и елью. В естественных лесах преобладают хвойные и смешанные типы, среди которых выделяются европейская ель и сосна.

Состояние наземных экосистем региона ЛАЭС находится в пределах изменчивости, присущей этой природной зоне, под воздействием естественных факторов, и характеризуется высокой степенью сбалансированности и устойчивости.

1.3.6 Животный мир

На территории, рассматриваемой в данном исследовании, зафиксированы 43 вида млекопитающих. Сосновые и еловые леса создают оптимальные условия для обитания белок. Среди других местных млекопитающих, характерных для данного региона, выделяются такие виды, как европейский бобр, лось, ондатра, лисица обыкновенная и различные представители отряда грызунов, включая лесных и полевых мышей. Волчья популяция представлена в меньшем количестве.

Енотовидная собака является одним из наиболее распространенных хищников данного региона. Редкие виды хищников, такие как выдры, европейские норки, кабаны, медведи и рыси, встречаются значительно реже и имеют более локальное распространение.

На исследуемой территории зарегистрировано гнездование 62 видов птиц, что свидетельствует о высоком уровне биоразнообразия орнитофауны данного региона. Среди них выделяются представители хищных птиц, включая ястребов (перепелятник и тетеревятник), канюка и болотного луня. Кроме того, в орнитокомплексе представлены тетеревообразные птицы (рябчик, тетерев, глухарь), представители семейства дятловых (пестрый дятел, желна), вьюрковые (зяблик, клестовые, чиж, снегирь, щегол, зеленушка), врановые (сойка, грач, галка, серая ворона, ворон).

Из земноводных наиболее часто встречается травяная лягушка, реже остромордая лягушка, серая жаба, обыкновенный и гребенчатый тритоны, совсем редко — лягушка прудовая.

Рассматривая фауну Копорской губы, наиболее часто встречаются такие виды рыб, как балтийская сельдь (салака), корюшка, балтийская треска (из морских), а также лещ, плотва, окунь, щука, судак (из пресноводных).

Для рек Систа, Воронка и Коваши характерными являются пресноводные виды: щука, окунь, плотва, ёрш и другие.

1.3.7 Особо охраняемые природные территории

На рассматриваемой территории, располагается десять особо охраняемых природных объектов Ленинградской области. Среди них выделяются пять действующих ООПТ: заказники «Лебяжье» (или «Лебяжий»), «Котельский», «Гостилицкий», в том числе памятник природы «Радоновые источники и озера у деревни Лопуховка».

В соответствии с Письмом Минприроды РФ от 30 апреля 2020 г. №15-47/10213, на исследуемом участке особо охраняемые природные территории федерального значения — отсутствуют [16].

Исходя из Перечня особо охраняемых территорий (ООПТ) регионального и местного значения по состоянию на 01.01.2025, опубликованного Комитетом по природным ресурсам Ленинградской области, на рассматриваемой территории ООПТ местного значения — отсутствуют [11].

2. Теоретические основы распространения радионуклидов в атмосфере

2.1. Основные понятия и виды радионуклидов

Радиоактивность — это самопроизвольное превращение (распад) атомных ядер некоторых химических элементов, приводящее к изменению их атомного номера и массового числа. Распад радиоактивных ядер сопровождается ионизирующим излучением и высокой энергией [12].

Радионуклиды — это радиоактивные атомы с данным массовым числом (суммарным числом протонов и нейтронов) и атомным [12].

Радионуклиды по своему происхождению делятся на естественные и искусственные.

Естественные радионуклиды возникают естественным образом и присутствуют в окружающей среде, включая воздух. Данные радионуклиды делятся на три категории: первичные, радиогенные и космогенные. Первичные радионуклиды образуются одновременно со всем стабильным веществом Земли и составляют основу естественного фона радиации, к ним относятся, например, уран-238, торий-232, калий-40. Радиогенные радионуклиды являются результатом распада первичных долгоживущих радионуклидов (радон-222 и другие радионуклиды из рядов радия, тория и актиния). Космические лучи, состоящие из высокоэнергетических частиц, при столкновении с атомами газов в верхних слоях атмосферы вызывают ядерные реакции, приводящие к образованию космогенных радионуклидов (третий, углерод-14, бериллий-7 и другие) [1].

Искусственные радионуклиды в атмосфере образуются в результате ядерной деятельности, например, после ядерных испытаний или аварий на атомных станциях, которые значительно загрязняют атмосферу [1].

Атомные электростанции (АЭС) являются потенциальными источниками выбросов радионуклидов в окружающую среду, которые можно разделить на две основные категории — нормальные эксплуатационные выбросы и аварийные выбросы.

Нормальные эксплуатационные выбросы — выбросы радионуклидов, которые происходят в процессе штатной работы АЭС в соответствии с установленными нормативами и правилами безопасности. Источниками данных выбросов являются вентиляционные системы, системы очистки и переработки радиоактивных отходов [8].

Аварийные выбросы — это неконтролируемые выбросы радионуклидов в атмосферу, которые происходят в результате аварийных ситуаций на АЭС, таких как повреждение активной зоны реактора, нарушение герметичности контура теплоносителя, отказы систем безопасности, воздействие пожаров, терактов, землетрясений, наводнений, цунами [8].

Нормирование поступления радионуклидов в окружающую среду осуществляется в соответствии с санитарными правилами СанПиН 2.6.1.2523-09 "Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)". Согласно данному документу, расчёт допустимых годовых выбросов и сбросов радиационных объектов в условиях нормальной эксплуатации проводится в соответствии с показателем годовой дозы облучения населения, входящая в установленные пределы доз. Данные пределы относятся к средней дозе критической группы населения и ожидаемой дозе до 70 лет вследствие поступления радионуклидов в организм за текущий год. Согласно требованиям, годовая эффективная доза облучения для рабочего персонала (группа А) 20 мЗв/год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 50 мЗв/год. Для критического населения в целом установлен предел доз 1 мЗв/год в среднем за любые последовательные 5 лет, но не более 5 мЗв/год [24].

Добыча и переработка урана также могут приводить к выбросам радионуклидов в атмосферу. Процессы добычи урановой руды приводят к выбросам радиоактивной пыли и радона в атмосферу, загрязняя окружающую среду.

Сжигание угля также может быть источником техногенных радионуклидов. Уголь содержит небольшое количество природных радиоактивных элементов, которые высвобождаются при сжигании угля и попадают в атмосферу с дымом и золой.

2.2 Агрегатное состояние

В атмосфере радионуклиды могут находиться в газообразном, жидком или твёрдом состоянии, каждое из этих состояний характеризуется определенными особенностями распространения радиоактивных веществ.

В газообразном состоянии радионуклиды распространяются наиболее эффективно, так как гравитационное осаждение отсутствует, что положительно влияет на процессы рассеивания и турбулентного перемешивания радионуклидов [25].

В жидком и твердом состоянии радионуклиды имеют ограниченную мобильность, распространяются менее эффективно из-за гравитационного осаждения [25].

2.3 Миграция радионуклидов

Процессы миграции радионуклидов в атмосфере определяют, как эти вещества перемещаются и распределяются после попадания в воздушную среду. Характер перемещения данных веществ определяется их физическими

свойствами, которые в большинстве случаев отличаются от характеристик окружающей среды [17]. Выбросы характеризуются вертикальным подъемом, который называют подъемом шлейфа (Δh), он может способствовать изменению эффективной высоты (H) точки выброса. Дальнейшее распространение выброса происходит за счет основных процессов миграции радионуклидов: конвективного переноса, турбулентной диффузии, сухого и влажного осаждения. Влияние данных процессов на поведение радиоактивных веществ, выброшенных в атмосферу, представлено на рисунке 4.

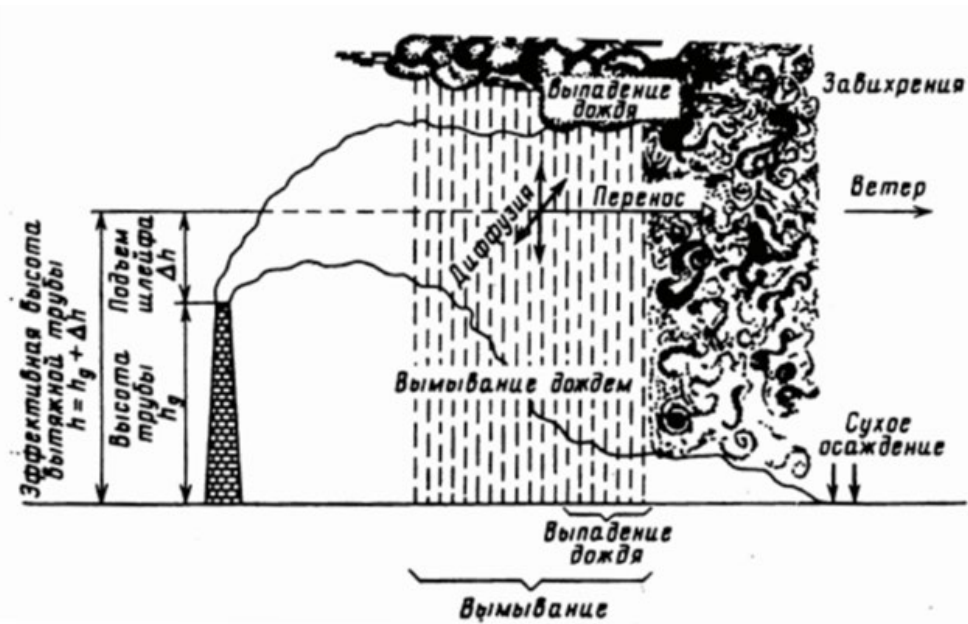


Рисунок 4 — Процессы миграции радионуклидов в атмосфере

Конвективный перенос представляет собой вертикальное перемещение радионуклидов под действием движения ветрового потока, которое характеризуется восходящими и нисходящими потоками воздуха. Соответственно после выброса радиоактивных веществ, они опускаются под действием нисходящих потоков и поднимаются под действием восходящих [7].

Турбулентная диффузия — это процесс вертикального перемешивания и горизонтального рассеивания радионуклидов в атмосфере под действием турбулентных воздушных потоков. В отличие от конвективного переноса, который определяет основное направление перемещения, турбулентная диффузия приводит к расширению и разбавлению радиоактивного облака или шлейфа. Турбулентность обусловлена существованием в атмосфере беспорядочных завихрений, которые состоят из определенных масс воздуха различных форм. Турбулентность в атмосфере возникает из-за различных факторов, таких как термическая конвекция (подъём нагретого воздуха), механическая турбулентность (хаотичное движение воздушных масс из-за препятствий на пути) и сдвиг ветра (изменение скорости и направления ветра с высотой) [7].

Сухое осаждение — это процесс удаления радионуклидов из атмосферы на поверхность земли под действием гравитации, диффузии и инерции без участия осадков. При гравитационном осаждении крупные частицы радионуклидов оседают на землю под действием силы тяжести. При диффузионном осаждении мелкие частицы и газообразные радионуклиды самопроизвольно распространяются во все стороны к поверхности земли под действием градиента концентрации. При инерционном осаждении частицы радионуклидов, переносимые воздушным потоком, сталкиваются с препятствиями и оседают на них [7].

Влажное осаждение — это процесс удаления радионуклидов из атмосферы на поверхность земли с помощью осадков (дождя, снега, града, тумана). Радионуклиды могут поглощаться каплями воды или кристаллами льда внутри облака (внутриоблачное вымывание) или вымываться из воздуха дождевыми каплями или снежинками, падающими на землю, при их движении к поверхности земли (подоблачное вымывание) [7].

3. Влияние метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов.

Для расчета рассеивания радионуклидов в 1986 году Госкомгидрометом СССР была утверждена «Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий» ОНД-86. С 1 января 2018 года методика ОНД-86 была отменена на территории РФ, её заменил приказ Минприроды России от 06.06.2017 г. № 273 «Об утверждении методов расчётов рассеивания выбросов вредных (загрязняющих) веществ в атмосферном воздухе». Важно учитывать, что приказ № 273 не применяется к радиоактивным веществам, для них действует приказ Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 ноября 2012 года №639 «Об утверждении Методики разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» (с изменениями на 28 июня 2017 года). Согласно данному документу метеорологическими факторами, влияющими на рассеивание загрязняющих веществ, являются: скорость и направление ветра, температурная стратификация и устойчивость атмосферы, осадки, а также шероховатость подстилающей поверхности. В данной части более подробно рассматриваются приведенные выше параметры.

3.1. Скорость и направление ветра

Скорость и направление ветра — основополагающие факторы, определяющие распространение радионуклидов в атмосфере после выброса с атомной электростанции (АЭС). Эти два фактора оказывают прямое влияние на формирование зоны рассеивания радионуклидов.

Низкая скорость ветра (1-2 м/с) приводит к медленному перемещению радионуклидов и уменьшает турбулентное перемешивание, в следствие чего повышается концентрация радионуклидов вблизи источника выброса. Также низкая скорость ветра ограничивает горизонтальный перенос, что приводит к повышению концентрации радионуклидов в приземном слое и формированию долговременных «горячих точек» загрязнения [19].

Умеренная скорость (2-4 м/с), также называемая «опасная», провоцирует увеличение приземных концентраций до максимальных значений. При данной скорости ветра горизонтальный перенос способствует тому, что шлейф отдаляется от источника выброса и опускается к поверхности земли, но недостаточное вертикальное рассеивание в данном случае препятствует разбавлению [19]. Таким образом, при умеренной скорости шлейф движется горизонтально близко к земле, не успевая рассеяться вверх.

Высокая скорость ветра (>4 м/с) способствует более быстрому переносу радионуклидов на большие расстояния. Она характеризуется усиленным турбулентным перемешиванием, что способствует более эффективному рассеиванию радиоактивного облака или шлейфа, а также уменьшению сухого осаждения, так как частицы радионуклидов могут дольше оставаться в воздухе и переноситься на большие расстояния за счет увеличения горизонтального переноса [19]. Повышенные ветровые условия способствуют снижению накопления радионуклидов в приземном слое, но в то же время могут приводить к вторичному загрязнению нижних слоев атмосферы за счет повторного вихревого поднятия радионуклидов с поверхности земли.

Направление ветра определяет направление распространения радионуклидов от АЭС. Зона рассеивания будет вытянута в сторону преобладающего ветра, соответственно изменение направления ветра может приводить к изменению формы и размера зоны рассеивания.

Роза ветров — это графический метод изображения режима ветров в данном месте, выполненный по многолетним наблюдениям для месяца, сезона или года. Изображается в виде многоугольника, в центре которого расположен кружок с указанием числа повторяемости штилей, от него отходят лучи по основным румбам горизонта (8 или 16). Длины лучей пропорциональны повторяемости или значениям средних и максимальных скоростей ветра этих направлений [23].

Роза ветров в районе АЭС является инструментом для оценки распространения радионуклидов в случае аварийного выброса. Она позволяет определить наиболее вероятные направления распространения радиоактивного облака или шлейфа в зависимости от преобладания определенного направления ветра в районе АЭС. Также в течение года направление ветра может меняться под влиянием сезонности, что может привести к изменениям формы и размера зоны рассеивания радионуклидов.

3.2. Температурная стратификация атмосферы

Температурная стратификация атмосферы — это распределение температуры воздуха по высоте. Она оказывает влияние на вертикальное движение воздуха, турбулентность и, следовательно, на рассеивание примесей, в том числе радионуклидов. Различают три основных типа температурной стратификации: устойчивую, неустойчивую и нейтральную [5].

Неустойчивая стратификация характеризуется быстрым понижением температуры с высотой. Она обычно возникает в солнечные дни, когда земная поверхность интенсивно нагревается. Нагретая поверхность отдает тепло прилегающему слою воздуха, делая его менее плотным, чем окружающий

воздух. Этот процесс приводит к возникновению восходящих потоков тёплого воздуха. Также неустойчивая стратификация способствует активному вертикальному перемешиванию воздуха — тёплый воздух поднимается вверх, унося с собой радионуклиды, а холодный воздух опускается вниз [5].

Устойчивая стратификация характеризуется повышением температуры с высотой или, в менее выраженных случаях, очень медленным понижением температуры с высотой. Инверсии часто образуются ночью при ясном небе, когда земная поверхность быстро охлаждается. Холодная поверхность охлаждает прилегающий слой воздуха, создавая слой холодного воздуха внизу и более тёплого воздуха сверху. Устойчивая стратификация препятствует вертикальному движению воздуха, поскольку холодный плотный воздух внизу задерживается внизу, а тёплый воздух наверху [5].

Нейтральная стратификация характеризуется постоянным значением температуры с высотой. Обычно она возникает в условиях сильного ветра или облачности, когда турбулентное перемешивание преобладает над тепловыми эффектами. Нейтральная стратификация способствует умеренному вертикальному перемешиванию воздуха [5].

Также на данном этапе важно рассмотреть такие понятия как: вертикальный градиент температуры, инверсионные слои и конвекция.

Вертикальный температурный градиент, представляет собой изменение температуры воздуха с изменением высоты. Может быть положительным (температура увеличивается с высотой), отрицательным (температура уменьшается с высотой) или нулевым (температура не меняется с высотой) [3].

Если температура воздуха быстро снижается с высотой, т. е. имеет большой отрицательный градиент, то атмосфера является неустойчивой. В случае, когда температура воздуха увеличивается с высотой, т. е. имеет положительный градиент, атмосфера является устойчивой. И если

температура воздуха не меняется с высотой, т. е. градиент равен нулю, то атмосфера является нейтральной [3].

Инверсионные слои — слои в атмосфере, для которых характерно повышение температуры с высотой, что противоположно нормальному состоянию тропосферы, где температура обычно уменьшается с высотой. Инверсии препятствуют вертикальному перемешиванию воздуха, что приводит к накоплению загрязняющих веществ, а также радионуклидов в нижних слоях атмосферы [3].

Конвекция представляет собой процесс переноса тепла, который осуществляется путём неупорядоченного восходящего движения воздушных масс, нагретых у поверхности земли. В ходе конвекции воздух у поверхности нагревается, его плотность уменьшается, и он поднимается вверх. Поднимающийся тёплый поток воздуха называется восходящим потоком или конвективным потоком. Конвекция оказывает влияние на вертикальный подъем выбросов в атмосфере, определяя высоту, на которую поднимаются загрязняющие вещества, в том числе радионуклиды [3].

3.3 Устойчивость атмосферы и классы устойчивости по Пасквиллу

Устойчивость атмосферы — способность атмосферы сопротивляться вертикальному перемещению воздуха. Атмосфера может быть устойчивой, неустойчивой или нейтральной, в зависимости от температурного градиента и других факторов.

Для описания устойчивости атмосферы используется система, разработанная в 1961 году Фрэнком Пасквиллом для оценки турбулентности и распространения загрязняющих веществ, включая радионуклидов. Она включает 6 классов устойчивости: А, В, С, D, Е и F (по Пасквиллу).

В данном случае «класс устойчивости атмосферы — это совокупность метеорологических факторов (скорость ветра, облачность, вертикальный тепловой поток), создающих определенные условия рассеяния в атмосфере» [22, с. 4].

Классы А, В, С соответствуют неустойчивой стратификации атмосферы, Е и F — устойчивой. Класс D относится к нейтральной стратификации атмосферы [13].

Для класса А характерна сильная неустойчивость и конвекция, сопровождаемая сильной турбулентностью и, соответственно, быстрым рассеиванием загрязняющих веществ [28]. Данный класс возникает в условиях слабого ветра и усиленной солнечной радиации.

Классу В соответствует умеренно-неустойчивой атмосферой, для него характерна умеренная турбулентность и рассеивание, конвекция в данном случае менее интенсивна, по сравнению с классом А [28]. Возникает в солнечные дни с умеренным ветром.

При классе С атмосфера является слабо-неустойчивой, турбулентность, конвекция и рассеивание уменьшены [28]. При данном классе вероятна облачная, пасмурная погода с умеренным ветром.

Класс D соответствует нейтральной устойчивости, характеризуется постоянностью температуры с высотой (отсутствие выраженного вертикального температурного градиента), что вызывает незначительное уменьшение турбулентности, снижение вертикального движения воздушных масс и рассеивания загрязняющих веществ [28]. Данный класс возникает при сильном ветре или в пасмурную погоду. Сильный ветровой поток увеличивает перемешивание в атмосфере, что может влиять на изменение условий, и переход от класса D к Е или С.

При классе E атмосфера является слабоустойчивой, характеризуется подавлением вертикального перемешивания за счет наличия отрицательного вертикального температурного градиента (повышение температуры с высотой), а также за счет низкой скорости ветра, которая увеличивает задержку загрязняющих веществ в нижних слоях атмосферы [28]. Данный класс соответствует малооблачной ночи со слабым ветром.

Для класса F характерна устойчивая атмосфера, в данном случае также происходит сильное уменьшение вертикального перемешивания из-за инверсионного слоя (охлаждение прилегающего к поверхности земли слоя воздуха) и практически нулевой скорости ветра, что способствует отсутствию перемешивания. Класс F возникает ночью при ясном небе и очень слабом ветре [28]. В таких условиях рассеивание загрязняющих веществ критически низкое, они концентрируются в нижних слоях атмосферы, формируя очаги загрязнения («горячие точки»).

Классы устойчивости по Пасквиллу применяются в области экологического мониторинга в виде прогнозирования рассеивания загрязняющих веществ в атмосфере и построения моделей распространения загрязнений, что положительно влияет на охрану окружающей среды.

3.4 Осадки

Осадки играют важную роль в определении механизмов переноса загрязняющих веществ, влияют на их рассеивание в атмосфере, что, как следствие, оказывает влияние на уровень загрязнения окружающей среды.

Осадки являются наиболее эффективным механизмом удаления радионуклидов из атмосферы, который может быть представлен влажным осаждением или вымыванием [10].

Понятие влажного осаждения было ранее рассмотрено в пункте 2.4. Согласно ему, данный процесс осуществляет удаление радионуклидов из атмосферы на поверхность земли с помощью осадков (дождя, снега, града). Влажное осаждение может быть в виде внутриоблачного или подоблачного вымывания.

Внутриоблачное вымывание характеризует поглощение частиц радионуклидов каплями воды или кристаллами льда внутри облака, а затем выпадают на землю с осадками. При подоблачном вымывании падающие капли дождя или снежинки захватывают радионуклиды из атмосферы, после чего оседают на поверхность [20].

3.5 Шероховатость подстилающей поверхности

Шероховатость подстилающей поверхности — различного размера неровности на всей подстилающей поверхности естественного (растительный и снежный покров, вода и т.д.) и антропогенного (городские застройки: здания, мосты, улицы и т.д.) происхождения, которые оказывают существенное влияние на характер распространения воздушного потока [20].

Шероховатость определяет, насколько сильно воздух взаимодействует с земной поверхностью, что напрямую влияет на скорость ветра и уровень турбулентности в приземном слое [9].

На более шероховатой поверхности усиливаются турбулентные процессы, в результате чего загрязняющие вещества, включая радионуклиды, быстрее перемешиваются и рассеиваются по вертикали и по горизонтали, что способствует снижению их концентрации у поверхности и уменьшению вероятности локального накопления.

На более гладких поверхностях (водоёмы или открытые равнины) с низкой шероховатостью, турбулентность, наоборот, ослабляется. В таких случаях рассеивание загрязнений происходит медленнее, что провоцирует активное накопление радионуклидов в приземном слое.

4. Оценка влияния метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов в районе ЛАЭС

В данном разделе проводится оценка рассеивания радионуклидов в районе Ленинградской атомной станции. Рассеивание радионуклидов в данном случае оценивается на основе расчета кратковременного и долговременного факторов разбавления. При расчете использовалась первая часть первого тома нормативно-технического документа 38.220.56-84 «Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения».

4.1 Материалы и методы

Кратковременный фактор разбавления представляет собой величину, характеризующую снижение в атмосфере концентрации радионуклидов после краткосрочного или мгновенного выброса (часы, дни, месяцы). Применяется для оперативного реагирования в условиях аварийных выбросов с расчетом зон эвакуации, для оценивания максимальных концентраций радионуклидов рядом с источником и скорости рассеивания радиоактивных веществ в приземном слое атмосферы [14].

Соответственно, долговременный фактор разбавления также представляет собой величину, характеризующую рассеивание радионуклидов в атмосфере, но уже при длительном поступлении радиоактивных веществ в окружающую среду (годы, десятилетия и более). Применяется для оценки среднегодовых концентраций для нормирования постоянных выбросов с АЭС при нормальной эксплуатации, является основой для прогнозирования радиационной обстановки при длительном воздействии [15].

Долговременный фактор разбавления является необходимым показателем для расчетов эквивалентных доз облучения на население при нормальной эксплуатации АЭС. Дозы облучения вызваны внешним (от радиоактивного облака и от радионуклидов, осевших на почву) или внутренним (от радионуклидов, поступившим в организм за счет вдыхания воздуха) облучением.

Внешнее облучение — вычисляемая доза $H_p^{r,j}$ обозначает эффективную дозу или эквивалентную дозу на различные органы или ткани j , вызванную радионуклидами r , путем экспозиции p . В облучении играет роль лишь бета- и гамма-излучение [18, с. 13].

Внешнее облучение от облака определяется по формуле [18]:

$$H_{A1}^{r,i} = Q^r \cdot \bar{x}_i^r(x) \cdot R_A^{r,j} \quad (4.1)$$

где, $H_{A1}^{r,j}$ — годовая доза от радионуклида r на различные органы и ткани j за счет излучения от облака в рассматриваемой точке x сектора направления ветра i , Зв;

Q^r — годовой выброс радионуклидов r , Бк;

$\bar{x}_i^r(x)$ — долговременный среднегодовой метеорологический фактор разбавления радионуклида r в рассматриваемой точке x сектора направления ветра i , с/м³;

$R_A^{r,j}$ — дозовый коэффициент облучения от облака для радионуклида r и различных органов и тканей j , Зв·м³/(Бк·с).

Внутреннее облучение — вычисляемая доза $H_p^{a,r,j}$ обозначает эффективную дозу или эквивалентную дозу на различные органы или ткани j лица возрастной группы a , вызванную радионуклидами r путем экспозиции p . В облучении играет роль альфа-, бета- и гамма-излучение [18, с. 13].

Внутреннее облучение за счет ингаляции вычисляется по формуле [18]:

$$H_{A3}^{a,r,j} = A_{A3}^{a,r} \cdot R_{IN}^{a,r,j} \quad (4.2)$$

где, $H_{A3}^{a,r,j}$ — годовая доза облучения от радионуклида r за счет ингаляции на различные органы и ткани j лица возрастной группы a , Зв;

$R_{IN}^{a,r,j}$ — дозовый коэффициент радионуклида r при ингаляции на различные органы и ткани j лица возрастной группы a , Зв/Бк.

Так как данная работа посвящена оценке влияния метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов, был проведен расчет кратковременного и долговременного факторов разбавления на основе данных устойчивости атмосферы в районе ЛАЭС.

Исходными данными являются для Ленинградской атомной станции являются: высота трубы ($H = 100$ м), средняя скорость ветра ($u_0 = 2,9$ м/с), данные об устойчивости атмосферы в районе размещения ЛАЭС (Таблицы 1 и 2), а также нормированная приземная осевая концентрация $\psi(x)$ (Таблица 4) и стандартное отклонение распределения примесей в струе в поперечном направлении $\sigma_y(x)$ (Таблица 5).

Таблица 1 — Совместная повторяемость (%) классов устойчивости атмосферы, скоростей и направлений ветра в районе размещения Ленинградской АЭС

Скор. ветра, м/с	Направление ветра								
	Класс С								
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	год
0-2.0	1.1	0.6	0.5	0.4	0.9	1.6	1.3	3.4	9.7
2.1-4.0	0.7	0.4	0.3	0.2	0.1	0.3	1.9	2.7	6.6
4.1-6.0	0.5	0.2	0.1	0.2	0.5	0.7	0.6	0.6	3.4
>6.1	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.2	1.6

Продолжение таблицы 1

Класс D									
0-2.0	1.1	0.8	0.6	0.8	1.5	3.2	3.2	3.0	4.2
2.1-4.0	0.7	0.7	0.6	0.8	2.3	3.1	2.6	2.1	2.9
4.1-6.0	0.4	0.2	0.4	1.1	1.3	2.1	1.9	1.4	5.8
>6.1	0.1	0.1	0.2	0.4	0.7	0.7	0.4	0.3	2.9
Класс E									
0-2.0	0.6	0.5	0.2	0.8	1.5	1.2	1.1	0.4	6.3
2.1-4.0	0.3	0.1	0.3	0.7	1.2	0.7	0.7	0.4	4.4
4.1-6.0	0.1	0.1	0.3	0.4	0.8	0.6	0.4	0.1	2.8
>6.1	0.1	0.1	0.2	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1	1.2
Класс F									
0-2.0	0.9	0.6	0.5	1.1	1.9	2.2	1.7	1.2	10.1
2.1-4.0	0.5	0.5	0.4	0.8	1.6	1.7	1.1	0.7	7.3
4.1-6.0	0.2	0.1	0.1	0.2	0.7	0.5	0.3	0.1	2.2
>6.1	0.1	0.0	0.0	0.1	0.4	0.2	0.1	0.0	0.9

Таблица 2 — Повторяемость различных классов устойчивости атмосферы для района размещения Ленинградской АЭС

Повт, %	Класс устойчивости						
	A	B	C	D	E	F	Σ
	0.1	1.5	22.6	35.7	18.6	21.5	100

Таблица 3 — Нормированная приземная осевая концентрация $\psi(x)$, м⁻²
(H=100 м. для ЛАЭС, Z₀=1.0 м)

x, м	Класс устойчивости			
	C	D	E	F
100	$0.623 \cdot 10^{-18}$	$0.144 \cdot 10^{-29}$	0.0	0.0
300	$0.104 \cdot 10^{-5}$	$0.105 \cdot 10^{-7}$	$0.872 \cdot 10^{-15}$	0.0
500	$0.108 \cdot 10^{-4}$	$0.175 \cdot 10^{-5}$	$0.138 \cdot 10^{-8}$	$0.236 \cdot 10^{-21}$
1000	$0.170 \cdot 10^{-4}$	$0.134 \cdot 10^{-4}$	$0.156 \cdot 10^{-5}$	$0.116 \cdot 10^{-10}$
2000	$0.907 \cdot 10^{-5}$	$0.129 \cdot 10^{-4}$	$0.893 \cdot 10^{-5}$	$0.957 \cdot 10^{-7}$
3000	$0.537 \cdot 10^{-5}$	$0.903 \cdot 10^{-5}$	$0.999 \cdot 10^{-5}$	$0.872 \cdot 10^{-6}$
4000	$0.362 \cdot 10^{-5}$	$0.657 \cdot 10^{-5}$	$0.900 \cdot 10^{-5}$	$0.207 \cdot 10^{-6}$
5000	$0.266 \cdot 10^{-5}$	$0.506 \cdot 10^{-5}$	$0.781 \cdot 10^{-5}$	$0.313 \cdot 10^{-5}$
7000	$0.168 \cdot 10^{-5}$	$0.337 \cdot 10^{-5}$	$0.595 \cdot 10^{-5}$	$0.435 \cdot 10^{-5}$
10000	$0.105 \cdot 10^{-5}$	$0.219 \cdot 10^{-5}$	$0.427 \cdot 10^{-5}$	$0.481 \cdot 10^{-5}$

Таблица 4 — Стандартное отклонение распределения примесей в струе
в поперечном направлении $\sigma_y(x)$, м.

x, м	Класс устойчивости			
	C	D	E	F
100	$0.109 \cdot 10^2$	$0.786 \cdot 10^1$	$0.597 \cdot 10^1$	$0.398 \cdot 10^1$
300	$0.325 \cdot 10^2$	$0.236 \cdot 10^2$	$0.177 \cdot 10^2$	$0.118 \cdot 10^2$
500	$0.537 \cdot 10^2$	$0.390 \cdot 10^2$	$0.293 \cdot 10^2$	$0.195 \cdot 10^2$
1000	$0.105 \cdot 10^3$	$0.762 \cdot 10^2$	$0.572 \cdot 10^2$	$0.381 \cdot 10^2$
2000	$0.201 \cdot 10^3$	$0.146 \cdot 10^3$	$0.110 \cdot 10^3$	$0.730 \cdot 10^2$
3000	$0.289 \cdot 10^3$	$0.211 \cdot 10^3$	$0.158 \cdot 10^3$	$0.105 \cdot 10^3$

Продолжение таблицы 4

4000	0.372·103	0.270·103	0.203·103	0.135·103
5000	0.449·103	0.327·103	0.245·103	0.163·103
7000	0.591·103	0.430·103	0.322·103	0.215·103
10000	0.778·103	0.566·103	0.424·103	0.283·103

4.2. Расчет кратковременного фактора разбавления

1) Данные таблицы 1 и 2 были разделены на 100, была получена повторяемость в долях единицы.

2) Полученные данные перемножены по классам устойчивости. Результаты представлены в таблице в Приложении А. Эта таблица представляет собой совместную повторяемость скоростей, направлений ветра и классов устойчивости атмосферы.

3) Данные нормированной приземной осевой концентрации $\psi(x)$ (Таблица 3) были разделены на величину средней скорости (2,9 м/с) по формуле:

$$\chi^r(x, 0, 0) = \frac{\psi(x)}{\bar{u}} \quad (4.3)$$

где, $\chi^r(x, 0, 0)$ — кратковременный метеорологический фактор разбавления, с/м³;

$\psi(x)$ — нормированная приземная осевая концентрация на расстоянии x от источника, м-2;

\bar{u} — средняя скорость ветра, м/с.

Таким образом был получен кратковременный фактор разбавления $\chi^r(x, 0, 0)$ (с/м³), данные представлены в таблице 5:

Таблица 5 — Кратковременный фактор разбавления $\chi^r(x, 0, 0)$ (с/м³)

x, м	Класс			
	C	D	E	F
100	2,15E-19	4,97E-31	0,00E+00	0,00E+00
300	3,59E-07	3,62E-09	3,01E-16	0,00E+00
500	3,72E-06	6,03E-07	4,76E-10	8,14E-23
1000	5,86E-06	4,62E-06	5,38E-05	4,00E-12
2000	3,13E-06	4,45E-06	3,08E-04	3,30E-08
3000	1,85E-06	3,11E-06	3,44E-04	3,01E-07
4000	1,25E-06	2,27E-06	3,10E-04	7,14E-08
5000	9,17E-07	1,74E-06	2,69E-04	1,08E-06
7000	5,79E-07	1,16E-06	2,05E-04	1,50E-06
10000	3,62E-07	7,55E-07	1,47E-04	1,66E-06

4) Результаты таблицы 5 были представлены в виде графика зависимости χ^r от расстояния x для разных классов устойчивости (C, D, E, F) (рис. 7), т.е. четыре графика на одних осях в зависимости от расстояния.

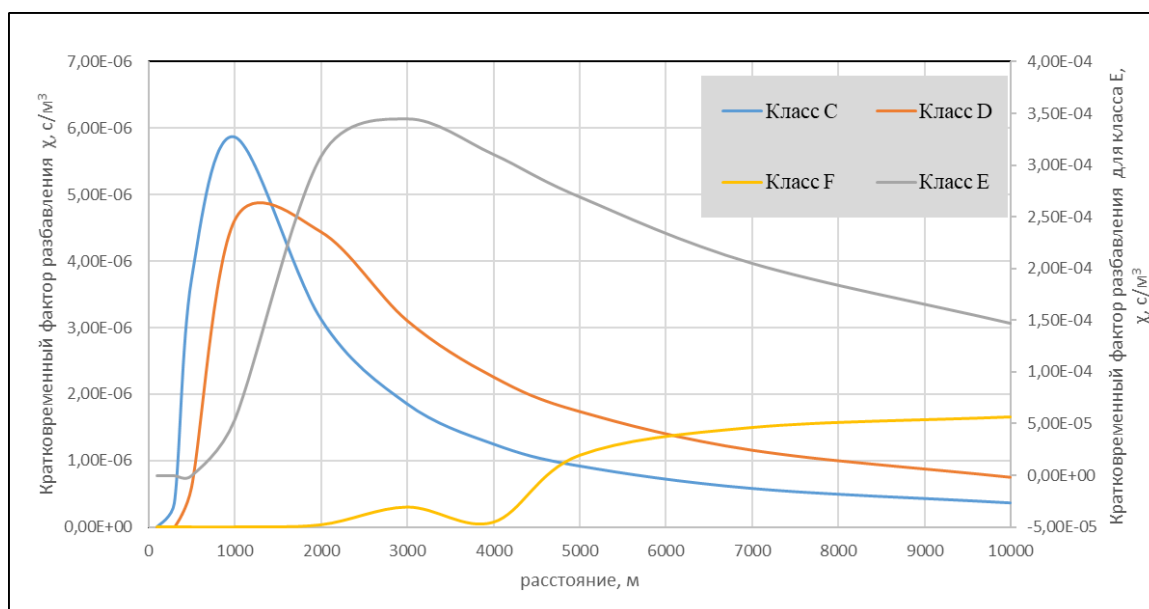


Рис. 5 — Зависимость χ^r от расстояния для разных классов устойчивости

5) Данные таблицы из Приложения А были умножены на данные таблицы 5 для каждого расстояния и сложены по скоростям ветра. Таким образом получилось 10 таблиц по числу расстояний от 100 до 10000 м. Данные таблицы были представлены по классам устойчивости (С, D, E, F) в виде четырех таблиц (Приложение Б). Каждая таблица представляет собой зависимость кратковременного фактора разбавления от класса устойчивости и направления ветра.

4.3 Расчет долговременного фактора разбавления

1) Полученные таблицы (Приложение Б) были умножены на соответствующие данные таблицы 4. Результаты сложены по классам устойчивости (С, D, E, F). Получилась таблица с зависимостью класс устойчивости — направление ветра (Приложение В).

2) Данные таблицы из Приложения В были умножены по формуле:

$$\bar{\chi}_i^r(x) = \frac{N}{(\sqrt{2\pi}) \cdot x} \sum_{j=1}^6 \sigma_{yj} \sum_{m=1}^M \sum_{s=1}^S \frac{\psi_{ijm}(x)}{\bar{u}_{ijm}} P_{ijm} \quad (4.3)$$

где, $\bar{\chi}_i^r(x)$ — долговременный метеорологический фактор разбавления радионуклида в рассматриваемой точке сектора направления ветра шириной $2\pi \cdot x/N$, с/м³;

x — расстояние от источника (в данном случае 100, 300, 500, 1000, 2000, 5000, 7000, 10000), м;

N — число секторов (в данном случае 8);

M — число интервалов разбиения скорости ветра.

3) Таким образом, был получен долговременный метеорологический фактор разбавления. Полученные данные представлены в таблице в Приложении Г.

4.4. Выводы по результатам расчетов

Кратковременный фактор разбавления χ^r

Рассматривая полученные данные кратковременного фактора разбавления в районе ЛАЭС из таблицы 5, и анализируя рисунок 5, можно сделать следующие выводы:

Величина χ^r сильно зависит от класса устойчивости атмосферы. В данном случае, наибольшие значения относятся к классу Е. При данном классе атмосфера является слабоустойчивой (малооблачная ночь со слабым ветром), происходит подавление вертикального перемешивания, которое препятствует рассеиванию радионуклидов и, соответственно, увеличивает их задержку в нижних слоях атмосферы, создавая максимальные концентрации в нижних слоях атмосферы.

Наибольшее значения χ^r для класса Е относится к расстоянию 3000 м ($3,44E-04$ с/м³), входящее в интервал с увеличенными значениями от 2000 м до 4000 м.

Более низкие значения кратковременного фактора разбавления относятся к классам С и D. При классе С атмосфера является слабо-неустойчивой, турбулентность, конвекция и рассеивание уменьшены. Класс D относится к нейтрально устойчивости атмосферы, которая характеризуется незначительным уменьшением турбулентности, и, как следствие, уменьшенным рассеиванием радионуклидов. Значения для класса F очень малы или близки к нулю.

Также, рассматривая таблицу 5 и ее графическое представление на рисунке 5, можно сказать, что с увеличением расстояния от источника выброса (от 100 до 10000 м) кратковременный фактор разбавления сначала возрастает,

а после снижается. Данный процесс связан с особенностями формирования облака выброса и с его дальнейшим рассеиванием. После выброса (на небольшом расстоянии от источника) облако не успевает перемешаться и рассеяться, а с течением времени (на больших расстояниях от источника) происходит разбавление облака и оседание загрязненных частиц.

Таким образом, анализ таблицы 5 и рисунка 5 показал, что для района размещения ЛАЭС наиболее опасными в условиях кратковременного загрязнения (аварийные выбросы, повышение концентраций) являются периоды с слабоустойчивой атмосферой (класс Е), когда концентрация радионуклидов в приземном слое повышена, а рассеивание уменьшено, в особенности на расстоянии 2000-4000 м от источника выброса (наибольшие концентрации). Именно для таких условий в первую очередь должен быть разработан план реагирования в случае аварийной ситуации, а также усилены системы мониторинга и прогнозирования.

Долговременный фактор разбавления $\bar{\chi}_i^r(x)$

Рассматривая данные $\bar{\chi}_i^r(x)$ в районе ЛАЭС таблицы из Приложения Г, можно сделать следующие выводы:

Величина $\bar{\chi}_i^r(x)$ существенно зависит от направления ветра. По таблице (Приложение Г) видно, что наибольшие значения долговременного фактора разбавления наблюдаются в ЮВ, ЮЗ и СВ направлениях, что характеризует преобладающее и основное влияние данных румбов на перенос радионуклидов в районе размещения ЛАЭС.

Для некоторых направлений (С, В, Ю) на небольших расстояниях (100-500 м) значение $\bar{\chi}_i^r(x)$ практически равно нулю, что связано с редкостью данных направлений в районе размещения.

Также при анализе таблицы (Приложение Г) заметна зависимость увеличения $\bar{\chi}_i^r(x)$ с расстоянием от источника выброса (от 100 до 10000 м). В данном случае для одних направлений ветра (СВ, ЮВ, ЮЗ, СЗ) максимальные значения достигаются на расстоянии 10000 м ($1,51E+04$ с/м³), это связано с переносом на большие расстояния загрязняющих веществ и радионуклидов при сильном ветре с устойчивым направлением с минимальным осаждением на средних расстояниях. Для других направлений (С, В, Ю, З) максимум достигается на расстоянии 3000 м, а после убывает до 10000 м, это связано со сниженной устойчивостью ветров данных направлений и их частыми изменениями. В результате на расстоянии 3000 м образуется максимальная концентрация, а дальнейшее удаление от источника способствует снижению концентрации за счет осаждения и увеличения разбавления.

Также, исходя из таблицы (Приложение Г), среднегодовые значения долговременного фактора разбавления увеличиваются до расстояния 3000 м ($2,95E-06$ м/с³), а после снижаются с дальнейшим увеличением расстояния до 10000 м, что также указывает на максимум концентрации на средних дистанциях и дальнейшее разбавление и осаждение на больших расстояниях.

Таким образом, анализ таблицы (Приложение Г) показал, что для района размещения ЛАЭС важным является учет среднегодовых концентраций при долговременном воздействии на расстоянии 3000 м, обусловленное сохранением максимальных значений для средних дистанций. Также важным является учет эффективности долговременного рассеивания радионуклидов по основным направлениям ветра для данной местности (ЮВ, ЮЗ и СВ). Все это является важными компонентами в обеспечении радиационной безопасности, составлении СЗЗ и разработке защитных мероприятий с учетом зон наибольшего радиационного воздействия от АЭС.

Заключение

В результате выполненной работы:

1. Было подробно рассмотрено общее описание Ленинградской АЭС, её история и техническая структура, включающая схемы реакторов РБМК-1000 и ВВЭР-1200. Также была приведена полноценная физико-географическая характеристика, в которую вошло описание гидрологических, геологических, климатических, почвенных особенностей района размещения станции. В дополнение были рассмотрены особенности животного и растительного мира, а также приведены сведения об особо охраняемых территориях. Таким образом была составлена комплексная характеристика территории нахождения ЛАЭС.

2. Были изучены и описаны теоретические основы распространения радионуклидов в атмосфере, включая основные понятия, а также важнейшие характеристики радионуклидов: агрегатное состояние, межфазная динамика и миграция радионуклидов. Понимание данных понятий и свойств радионуклидов является важной теоретической основой, необходимой для анализа процессов распространения радионуклидов в атмосфере и прогнозирования возможных зон радиационного загрязнения.

3. Также было проанализировано влияние метеорологических факторов на рассеивание радионуклидов. Согласно Приказу Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 7 ноября 2012 года №639 «Об утверждении Методики разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух» (с изменениями на 28 июня 2017 года) метеорологическими факторами, влияющими на рассеивание загрязняющих веществ, являются: скорость и направление ветра, температурная

стратификация и устойчивость атмосферы, осадки, а также шероховатость подстилающей поверхности. Данные факторы оказывают влияние на направление атмосферного переноса и интенсивность рассеивания радионуклидов.

4. Была выполнена практическая оценка влияния метеорологических условий на рассеивание радионуклидов в районе ЛАЭС с помощью кратковременного и долговременного факторов разбавления на основе методики НТД 38.220.56-84 «Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения», а также на основе исходных данных.

5. Расчет кратковременного фактора разбавления для ЛАЭС показал, что, при нормировании и прогнозировании аварийных выбросов в ОС, особое внимание следует уделять неблагоприятным метеорологическим условиям (класс Е — слабоустойчивая), когда концентрация радионуклидов в приземном слое повышена, а рассеивание уменьшено, в особенности на расстоянии 2000-4000 м от источника выброса. Здесь также следует предусматривать меры по снижению выбросов, так как, в данном случае, значительно повышается концентрация радионуклидов в приземном слое атмосферы вблизи ЛАЭС.

6. Расчет долговременного фактора разбавления показал, что особое внимание для ЛАЭС следует уделять преобладающим направлениям ветров (ЮВ, ЮЗ и СВ) на расстоянии 3000 м, так как исходя из них формируются зоны максимальных среднегодовых концентраций радионуклидов. Это является важным условием обоснования размеров СЗЗ и зон наблюдения.

7. Вычисление долговременного фактора разбавления имеет важное практическое применение для расчета индивидуальных эквивалентных доз облучения, вызванных внешним или внутренним облучением (формулы 4.1-

4.2). Так как долговременный фактор основан на сохранении радионуклидов в окружающей среде на протяжении длительного времени, что необходимо для оценки суммарного воздействия на организм человека при постоянном или продолжительном облучении.

Таким образом, метеорологические факторы оказывают наибольшее влияние на процессы атмосферного переноса и рассеивания радионуклидов в районе ЛАЭС, для которого характерны высокая влажность, значительное количество осадков и выраженная изменчивость ветрового режима. Их комплексный учет является обязательным при разработке модели распространения радионуклидов и мер по обеспечению радиационной безопасности вблизи АЭС.

Список литературы

1. Александров Ю.А. Основы радиационной экологии: учебное пособие / Мар. гос. ун-т. – Йошкар-Ола, 2007. – 268 с.
2. АО «Концерн Росэнергоатом». Ленинградская атомная электростанция [Электронный ресурс]. URL: https://www.rosenergoatom.ru/stations_projects/sayt-leningradskoy-aes/ (дата обращения 09.04.2025).
3. Богаткин О.Г., Тараканов Г.Г. Основы метеорологии: учебное пособие / РГГМУ — СПб, 2006. — 232 с.
4. Боголюбов А.С. Изображения и описания типов и подтипов почв России и СССР / Экологический центр «Экосистема» [Электронный ресурс]. URL: <https://ecosystema.ru/08nature/soil/012t.htm>. (дата обращения 10.04.2025).
5. Врублевский С. В. Стратификация и вертикальное равновесие насыщенного воздуха: тезисы доклада / С. В. Врублевский. — Минск, 2013. — 8 с.
6. Галиев А.А. Безопасность ядерного реактора ВВЭР-1200 // Colloquium-journal. — 2019. — № 20(44). — С. 10–15
7. Данилов П. В. и др. Поведение радиоактивных веществ в окружающей среде // Молодой ученый. – 2016. – №. 26. – С. 28-32.
8. Израэль Ю. А. Радиоактивные выпадения после ядерных взрывов и аварий: монография / Ю. А. Израэль. — Санкт-Петербург, 1996. — 355 с.
9. Калинин Н. А. Физическая метеорология: учебное пособие / Пермский государственный национальный исследовательский университет. — Пермь, 2023. — 257 с.

10. Ким Д., Геращенко Л. А. Радиационная экология: учеб. пособие / ГОУ ВПО «БрГУ». — Братск, 2010. — 212 с.

11. Комитет по природным ресурсам Ленинградской области. Перечень особо охраняемых природных территорий (ООПТ) регионального и местного значения в Ленинградской области по состоянию на 01.01.2025. — Санкт-Петербург, 2025. — 20 с

12. Мархоцкий Я.Л. Радиационная и экологическая безопасность атомной энергетики: учебное пособие / Вышэйшая школа. — Минск, 2009. — 112 с.

13. Меньшиков В.В. Моделирование последствий техногенных аварий: учебное пособие / Хим. фак. МГУ им. М.В. Ломоносова. — Москва, 2007. — 50 с.

14. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу (МПА-98). — Минатом России. — М., 1999. — 127 с.

15. Методические указания МУ 2.6.1.042-2001 «Расчет и обоснование размеров санитарно-защитных зон и зон наблюдения вокруг АЭС» — Министерство Российской Федерации по атомной энергии, Министерство здравоохранения Российской Федерации, Федеральное управление медико-биологических и экстремальных проблем. — М., 2001. — 35 с.

16. Министерство природных ресурсов и экологии Российской Федерации. Письмо от 30.04.2020 № 15-47/10213 «О предоставлении информации для инженерно-экологических изысканий». — Москва, 2020.

17. Недобух Т.А., Воронина А.В., Кутергин А.С. Основы радиохимии и дозиметрии: учебно-методическое пособие / Изд-во Уральского университета — Екатеринбург, 2015. — 135 с.

18. НТД 38.220.56-84 “Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения”. Том 1. Часть 1. — МХО Интератомэнерго, М., Энергоатомиздат, 1984. — 168 с.

19. Перевезенцев В. В. Газоаэрозольные выбросы атомных электростанций, миграция и накопление радионуклидов в объектах окружающей среды: учебное пособие / МГТУ им. Н. Э. Баумана. — Москва, 2016. — 78 с.

20. Положение о повышении точности прогностических оценок радиационных характеристик радиоактивного загрязнения окружающей среды и дозовых нагрузок на персонал и население: РБ-053-10: утв. Приказ от 8 июня 2010 г. №465. — Москва, 2010. — Приложение 7: Постоянная вымывания радиоактивных примесей осадками.

21. Приказ Министерства сельского хозяйства Российской Федерации от 21.10.2020 № 620 (ред. от 21.09.2023) «Об утверждении правил рыболовства для Западного рыбохозяйственного бассейна» (п. 28.1). — Москва, 2023.

22. Приказ от 2 ноября 2022 г. № 385 Об утверждении руководства по безопасности «Методика моделирования распространения аварийных выбросов опасных веществ» (утв. приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 ноября 2022 г. №385).

23. РОЗА ВЕТРОВ // Большая российская энциклопедия. Том 28. — Москва, 2015. — С. 601–602.

24. Санитарные правила и нормы СанПиН 2.6.1.2523-09 «Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009)» / утв. постановлением Главного государственного санитарного врача Российской Федерации от 7 июля 2009 г. № 47. — Москва, 2009. — 127 с.

25. Сахаров В. К. Радиоэкология: учебное пособие / Издательство «Лань». — Санкт-Петербург, 2006. — 320 с.

26. СП 131.13330.2020 «Строительная климатология» (СНиП 23-01-99) от 24.12.2020 № 859 / Федеральное государственное бюджетное учреждение «Научно-исследовательский институт строительной физики РААСН» при участии ФГБУ «Главная геофизическая обсерватория имени А.И. Воейкова». — М.: Минстрой России, 2020. — 234 с.

27. Шелегов А.С., Лескин С.Т., Слободчук В.И. Физические особенности и конструкция реактора РБМК-1000: учебное пособие / НИЯУ МИФИ — Москва, 2011. — 64 с.

28. Pasqual F. Atmospheric Diffusion. – New York: J. Willey, 1974. – 429 p.

Приложения

Приложение А

Таблица 1— Совместная повторяемость (доли единицы) классов устойчивости атмосферы, скоростей и направлений ветра в районе размещения ЛАЭС

м\с	Класс С								
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	год
0-2.0	0,011	0,006	0,005	0,004	0,009	0,016	0,013	0,034	0,097
2.1-4.0	0,007	0,004	0,003	0,002	0,001	0,003	0,019	0,027	0,066
4.1-6.0	0,005	0,002	0,001	0,002	0,005	0,007	0,006	0,006	0,034
>6.1	0,002	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,004	0,002	0,016
Класс D									
0-2.0	0,011	0,008	0,006	0,008	0,015	0,032	0,032	0,03	0,042
2.1-4.0	0,007	0,007	0,006	0,008	0,023	0,031	0,026	0,021	0,029
4.1-6.0	0,004	0,002	0,004	0,011	0,013	0,021	0,019	0,014	0,058
>6.1	0,001	0,001	0,002	0,004	0,007	0,007	0,004	0,003	0,029
Класс E									
0-2.0	0,006	0,005	0,002	0,008	0,015	0,012	0,011	0,004	0,063
2.1-4.0	0,003	0,001	0,003	0,007	0,012	0,007	0,007	0,004	0,044
4.1-6.0	0,001	0,001	0,003	0,004	0,008	0,006	0,004	0,001	0,028
>6.1	0,001	0,001	0,002	0,002	0,002	0,002	0,001	0,001	0,012
Класс F									
0-2.0	0,009	0,006	0,005	0,011	0,019	0,022	0,017	0,012	0,101
2.1-4.0	0,005	0,005	0,004	0,008	0,016	0,017	0,011	0,007	0,073
4.1-6.0	0,002	0,001	0,001	0,002	0,007	0,005	0,003	0,001	0,022
>6.1	0,001	0	0	0,001	0,004	0,002	0,001	0	0,009

Таблица 2 — Повторяемость (доли единицы) различных классов устойчивости атмосферы для района размещения ЛАЭС

Повторяемость (доли единицы)	Класс устойчивости						
	A	B	C	D	E	F	Σ
	0,001	0,015	0,226	0,357	0,186	0,215	1

Таблица 1 — Зависимость кратковременного фактора разбавления от класса устойчивости и направления ветра (класс С)

С	Класс устойчивости								
	Направление ветра								
х (м)	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	год
100	1,21E-21	6,31E-22	4,86E-22	4,37E-22	8,25E-22	1,41E-21	2,04E-21	3,35E-21	1,03E-20
300	2,03E-09	1,05E-09	8,10E-10	7,29E-10	1,38E-09	2,35E-09	3,40E-09	5,59E-09	1,73E-08
500	2,10E-08	1,09E-08	8,42E-09	7,57E-09	1,43E-08	2,44E-08	3,53E-08	5,81E-08	1,79E-07
1000	3,31E-08	1,72E-08	1,32E-08	1,19E-08	2,25E-08	3,84E-08	5,56E-08	9,14E-08	2,82E-07
2000	1,77E-08	9,19E-09	7,07E-09	6,36E-09	1,20E-08	2,05E-08	2,97E-08	4,88E-08	1,51E-07
3000	1,05E-08	5,44E-09	4,18E-09	3,77E-09	7,11E-09	1,21E-08	1,76E-08	2,89E-08	8,91E-08
4000	7,05E-09	3,67E-09	2,82E-09	2,54E-09	4,80E-09	8,18E-09	1,18E-08	1,95E-08	6,01E-08
5000	5,18E-09	2,69E-09	2,07E-09	1,87E-09	3,52E-09	6,01E-09	8,71E-09	1,43E-08	4,42E-08
7000	3,27E-09	1,70E-09	1,31E-09	1,18E-09	2,23E-09	3,80E-09	5,50E-09	9,03E-09	2,79E-08
10000	2,05E-09	1,06E-09	8,18E-10	7,36E-10	1,39E-09	2,37E-09	3,44E-09	5,65E-09	1,74E-08

Таблица 2 — Зависимость кратковременного фактора разбавления от класса устойчивости и направления ветра (класс D)

D	Класс устойчивости								
	Направление ветра								
	C	CB	B	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	год
100	4,08E-33	3,19E-33	3,19E-33	5,50E-33	1,03E-32	1,61E-32	1,44E-32	1,21E-32	2,80E-32
300	2,97E-11	2,33E-11	2,33E-11	4,01E-11	7,50E-11	1,18E-10	1,05E-10	8,79E-11	2,04E-10
500	4,95E-09	3,88E-09	3,88E-09	6,68E-09	1,25E-08	1,96E-08	1,74E-08	1,46E-08	3,40E-08
1000	3,79E-08	2,97E-08	2,97E-08	5,11E-08	9,57E-08	1,50E-07	1,34E-07	1,12E-07	2,61E-07
2000	3,65E-08	2,86E-08	2,86E-08	4,92E-08	9,21E-08	1,45E-07	1,29E-07	1,08E-07	2,51E-07
3000	2,56E-08	2,00E-08	2,00E-08	3,45E-08	6,45E-08	1,01E-07	9,00E-08	7,56E-08	1,76E-07
4000	1,86E-08	1,46E-08	1,46E-08	2,51E-08	4,69E-08	7,36E-08	6,55E-08	5,50E-08	1,28E-07
5000	1,43E-08	1,12E-08	1,12E-08	1,93E-08	3,61E-08	5,67E-08	5,05E-08	4,24E-08	9,84E-08
7000	9,54E-09	7,47E-09	7,47E-09	1,29E-08	2,41E-08	3,78E-08	3,36E-08	2,82E-08	6,55E-08
10000	6,20E-09	4,85E-09	4,85E-09	8,36E-09	1,56E-08	2,45E-08	2,18E-08	1,83E-08	4,26E-08

Таблица 3 — Зависимость кратковременного фактора разбавления от класса устойчивости и направления ветра (класс E)

E	Класс устойчивости								
	Направление ветра								
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	год
100	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
300	6,15E-19	4,47E-19	5,59E-19	1,17E-18	2,07E-18	1,51E-18	1,29E-18	5,59E-19	8,22E-18
500	9,74E-13	7,08E-13	8,85E-13	1,86E-12	3,27E-12	2,39E-12	2,04E-12	8,85E-13	1,30E-11
1000	1,10E-07	8,00E-08	1,00E-07	2,10E-07	3,70E-07	2,70E-07	2,30E-07	1,00E-07	1,47E-06
2000	6,30E-07	4,58E-07	5,73E-07	1,20E-06	2,12E-06	1,55E-06	1,32E-06	5,73E-07	8,42E-06
3000	7,05E-07	5,13E-07	6,41E-07	1,35E-06	2,37E-06	1,73E-06	1,47E-06	6,41E-07	9,42E-06
4000	6,35E-07	4,62E-07	5,77E-07	1,21E-06	2,14E-06	1,56E-06	1,33E-06	5,77E-07	8,49E-06
5000	5,51E-07	4,01E-07	5,01E-07	1,05E-06	1,85E-06	1,35E-06	1,15E-06	5,01E-07	7,36E-06
7000	4,20E-07	3,05E-07	3,82E-07	8,01E-07	1,41E-06	1,03E-06	8,78E-07	3,82E-07	5,61E-06
10000	3,01E-07	2,19E-07	2,74E-07	5,75E-07	1,01E-06	7,39E-07	6,30E-07	2,74E-07	4,03E-06

Таблица 4 — Зависимость кратковременного фактора разбавления от класса устойчивости и направления ветра (класс F)

F	Класс устойчивости								
	Направление ветра								
x (м)	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	год
100	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
300	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00	0,00E+00
500	2,97E-25	2,10E-25	1,75E-25	3,85E-25	8,05E-25	8,05E-25	5,60E-25	3,50E-25	3,59E-24
1000	1,46E-14	1,03E-14	8,60E-15	1,89E-14	3,96E-14	3,96E-14	2,75E-14	1,72E-14	1,76E-13
2000	1,21E-10	8,51E-11	7,10E-11	1,56E-10	3,26E-10	3,26E-10	2,27E-10	1,42E-10	1,45E-09
3000	1,10E-09	7,76E-10	6,46E-10	1,42E-09	2,97E-09	2,97E-09	2,07E-09	1,29E-09	1,33E-08
4000	2,61E-10	1,84E-10	1,53E-10	3,38E-10	7,06E-10	7,06E-10	4,91E-10	3,07E-10	3,15E-09
5000	3,94E-09	2,78E-09	2,32E-09	5,11E-09	1,07E-08	1,07E-08	7,43E-09	4,64E-09	4,76E-08
7000	5,48E-09	3,87E-09	3,23E-09	7,10E-09	1,48E-08	1,48E-08	1,03E-08	6,45E-09	6,61E-08
10000	6,06E-09	4,28E-09	3,57E-09	7,85E-09	1,64E-08	1,64E-08	1,14E-08	7,13E-09	7,31E-08

Таблица — Общая таблица. Зависимость класса устойчивости от направления ветра

х (м)	Направление ветра								
	с	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	год
100	1,32E-20	6,88E-21	5,29E-21	4,76E-21	9,00E-21	1,53E-20	2,22E-20	3,65E-20	1,13E-19
300	6,66E-08	3,48E-08	2,69E-08	2,47E-08	4,65E-08	7,92E-08	1,13E-07	1,84E-07	5,66E-07
500	1,32E-06	7,39E-07	6,03E-07	6,67E-07	1,26E-06	2,08E-06	2,58E-06	3,69E-06	1,10E-05
1000	1,27E-05	8,65E-06	9,38E-06	1,72E-05	3,08E-05	3,09E-05	2,92E-05	2,39E-05	1,34E-04
2000	7,82E-05	5,64E-05	6,86E-05	1,41E-04	2,49E-04	1,95E-04	1,70E-04	8,86E-05	9,93E-04
3000	1,20E-04	8,69E-05	1,07E-04	2,21E-04	3,91E-04	2,99E-04	2,57E-04	1,26E-04	1,55E-03
4000	1,37E-04	9,91E-05	1,22E-04	2,54E-04	4,48E-04	3,39E-04	2,92E-04	1,39E-04	1,78E-03
5000	1,43E-04	1,04E-04	1,28E-04	2,66E-04	4,69E-04	3,54E-04	3,04E-04	1,44E-04	1,86E-03
7000	1,42E-04	1,03E-04	1,28E-04	2,66E-04	4,70E-04	3,53E-04	3,03E-04	1,42E-04	1,87E-03
10000	1,35E-04	9,77E-05	1,21E-04	2,51E-04	4,44E-04	3,34E-04	2,85E-04	1,33E-04	1,77E-03

Таблица — долговременный фактор разбавления $\bar{\chi}_i^r(x)$ (с/м³)

x (м)	Направление ветра								
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	год
100	4,22E-22	5,20E+01	3,25E-22	4,68E+01	6,14E-22	7,98E+01	8,89E-22	1,31E+02	2,74E-21
300	7,08E-10	1,57E+02	5,47E-10	1,44E+02	1,03E-09	2,45E+02	1,48E-09	3,97E+02	4,55E-09
500	8,45E-09	2,79E+02	6,90E-09	3,09E+02	1,30E-08	5,10E+02	1,61E-08	7,30E+02	4,79E-08
1000	4,04E-08	6,83E+02	4,38E-08	1,25E+03	7,87E-08	1,25E+03	7,43E-08	1,03E+03	4,16E-07
2000	1,25E-07	1,44E+03	1,52E-07	2,96E+03	2,68E-07	2,32E+03	2,33E-07	1,21E+03	2,61E-06
3000	1,28E-07	2,17E+03	1,57E-07	4,50E+03	2,77E-07	3,44E+03	2,39E-07	1,68E+03	2,95E-06
4000	1,09E-07	2,90E+03	1,34E-07	6,03E+03	2,37E-07	4,57E+03	2,04E-07	2,18E+03	2,61E-06
5000	9,11E-08	3,63E+03	1,12E-07	7,55E+03	1,98E-07	5,70E+03	1,70E-07	2,70E+03	2,21E-06
7000	6,49E-08	5,08E+03	8,01E-08	1,06E+04	1,42E-07	7,97E+03	1,21E-07	3,73E+03	1,59E-06
10000	4,30E-08	7,26E+03	5,30E-08	1,51E+04	9,36E-08	1,14E+04	8,00E-08	5,30E+03	1,06E-06

