

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК**

Программное средство
для расчета радиационной обстановки в мезомасштабе
(за пределами промышленной площадки
объекта использования ядерной энергии)

Учебная версия 1.0

РОМ/Е1.0

Учебное пособие

Москва 2018

УДК 621.039
ББК 31.49-32.973.26
П 78

Программное средство для расчета радиационной обстановки в мезомасштабе (за пределами промышленной площадки объекта использования ядерной энергии. Учебная версия 1.0. РОМ/Е1.0 : Учебное пособие ; М. : Институт проблем безопасного развития атомной энергетики РАН, 2018. — 132 с. : ил. (в пер.).

В пособии описываются модели и подходы к решению задач расчета радиационной обстановки в мезомасштабе, реализованные в программном средстве «РОМ», разработанном в ИБРАЭ РАН. Приводится описание графического пользовательского интерфейса и инструкция по работе с программным средством, а также примеры расчетов. ПС РОМ предназначено для оценки радиационной обстановки при выбросах радиоактивных веществ в атмосферу как в аварийных режимах, так и в условиях нормальной эксплуатации объектов использования атомной энергии (ОИАЭ). Пособие содержит примеры решения задач оценки разных параметров радиационной обстановки, описание порядка ввода исходных данных для расчета, выбора служебных параметров, примеры визуализации и анализа расчетных результатов.

Пособие предназначено для студентов старших курсов технических специальностей, научных работников, инженеров и проектантов, специализирующихся в области анализа и обоснования безопасности реакторов нового поколения на быстрых нейтронах.

СОДЕРЖАНИЕ

1. Введение	7
1.1. Назначение ПС РОМ.....	7
1.2. Условия применения	8
1.3. Описание задачи	9
1.4. Возможности кода РОМ	9
1.5. Ограничения учебной версии.....	9
1.6. Установка ПС и рекомендуемое оборудование.....	10
2. Описание программного средства РОМ.....	11
2.1. Лагранжева тракторная модель распространения радионуклидов в атмосфере	11
2.1.1. Дифференциальная модель распространения в атмосфере.....	11
2.1.2. Метод решения уравнения переноса.....	13
2.1.3. Реализация методики решения уравнения переноса	15
2.2. Ввод и подготовка метеорологических параметров.....	23
2.3. Метеорологический блок для приземных данных	24
2.3.1. Методика определения категории устойчивости.....	24
2.3.2. Определение динамической скорости.....	29
2.3.3. Вертикальные профили скорости ветра и коэффициентов турбулентного обмена	29
2.3.4. Дополнительная входная информация.....	31
2.4. Информация об источнике	32
2.5. Особенности методики оценки радиационной обстановки при кратковременных выбросах с выбором максимально неблагоприятных условий.....	33
2.6. Особенности методики оценки радиационной обстановки при продолжительных выбросах с использованием метеорологической информации временных рядов ВМО.....	34
2.7. Особенности методики расчета радиационной обстановки в условиях нормальной эксплуатации.....	35
2.8. Дозиметрические модели.....	36
2.8.1. Расчеты дозы от радиоактивного облака	37
2.8.2. Расчет дозы от загрязненной поверхности	37
2.8.3. Расчет ингаляционной дозы	37
2.8.4. Уточненная дозиметрическая модель внешнего облучения от облака.....	38
2.8.5. Дозиметрическая модель расчета облучения по пищевым цепочкам.....	39
2.8.6. Расчет доз внутреннего облучения от трития и углерода	40
2.8.7. Данные по дозовым коэффициентам.....	41
2.9. Модель для оценки скорости гравитационного осаждения аэрозолей продуктов горения натрия	42
3. Описание графического интерфейса пользователя и инструкция по работе с ПС	43
3.1. Входные данные	43
3.2. Выходные данные.....	45
3.3. Запуск ПС РОМ	46
3.4. Выбор единиц измерения	47
3.5. Меню «Объект»	47
3.5.1. Подменю «Авария».....	48

3.5.2. Подменю «Местоположение объекта».....	49
3.5.3. Подменю «Точки индикации»	50
3.6. Меню «Источник»	53
3.7. Ввод метеорологических данных.....	57
3.7.1. Ввод метеорологических данных для расчета радиационной обстановки при максимально неблагоприятных условиях при кратковременных выбросах	61
3.7.2. Ввод метеорологических данных для расчета радиационной обстановки от продолжительных выбросов с учетом реальной метеорологии из временных рядов ВМО	63
3.7.3. Ввод метеорологических данных для расчета среднегодовых параметров радиационной обстановки при регулярном выбросе.....	65
3.8. Ввод параметров расчета	65
3.9. Выполнение программы. Расчет варианта.....	69
3.9.1. Проведение расчета при разных способах вычисления расчетных величин и записи результатов.....	71
3.9.2. Проведение расчета при кратковременных выбросах с выбором максимально неблагоприятных условий.....	72
3.9.3. Проведение расчета при продолжительных выбросах в атмосферу с использованием математического алгоритма преобразования информации временных рядов ВМО	73
3.9.4. Проведение расчета доз облучения населения за счет потребления загрязненных продуктов питания.....	73
3.10. Анализ и представление результатов.....	75
3.10.1..... Графика→Выбор функции	75
3.10.2..... Графика→Установка линий уровня	75
3.10.3..... Окна→Создать окно.....	77
3.10.4..... Профили	78
3.10.5..... Контрмеры.....	81
3.11. Работа с ПС СОНА	84
4. Примеры решения задач с помощью программного средства.....	87
4.1. Серийный расчет	87
4.1.1. Авария	88
4.1.2. Местоположение объекта.....	88
4.1.3. Местоположение объекта.....	89
4.1.4. Источник	90
4.1.5. Параметры счета.....	92
4.1.6. Задание целевых функций.....	93
4.1.7. Параметры Авторасчета	95
4.1.8. Запуск на счет и получение результатов.....	95
4.1.9. Зависимость максимальных значений целевых функций от расстояния.....	100
4.2. Многовариантный расчет с использованием реальных временных метеорологических рядов	100
4.2.1. Авария	101
4.2.2. Местоположение объекта.....	102
4.2.3. Источник	102
4.2.4. Параметры счета.....	105

4.2.5. Задание целевых функций.....	105
4.2.6. Параметры Авторасчета	105
4.2.7. Ввод метеоданных.....	105
4.2.8. Запуск на счет и получение результатов.....	107
4.2.9. Зависимость максимальных значений целевых функций от расстояния.....	110
4.3. Расчет в режиме нормальной эксплуатации	110
4.3.1. Авария	115
4.3.2. Местоположение объекта.....	115
4.3.3. Источник	116
4.3.4. Параметры счета.....	117
4.3.5. Задание целевых функций.....	118
4.3.6. Параметры Авторасчета	118
4.3.7. Ввод метеоданных.....	118
4.3.8. Запуск на счет и получение результатов.....	119
4.3.9. Зависимость максимальных значений целевых функций от расстояния.....	122
4.4. Расчет в пунктах индикации и другие возможности	123
Литература	129

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АЭС	— атомная электростанция
ОИЯЭ	— объект использования ядерной энергии
РУ	— реакторная установка
СУЗ	— система управления и защиты реактора
ТВС	— тепловыделяющая сборка
ПС	— программное средство
метеопараметр	— метеорологический параметр
ПСА	— пограничный слой атмосферы
рн	— радионуклид
ГПИ	— графический пользовательский интерфейс
виджет	— элемент управления ГПИ

1. ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие предназначено для подготовки квалифицированных пользователей к работе с программным средством (ПС) РОМ/Е1.0. В учебном пособии даются материалы, знакомящие пользователей с математическими моделями распространения радиоактивных веществ в атмосфере, реализованными в ПС, а также с пользовательским интерфейсом и работой с ним. В последнем разделе приведено описание четырёх практических задачи по оценке радиационной обстановки.

Первая рассмотренная практическая задача позволяет пользователю овладеть возможностью проводить серийные расчёты, которые предназначены для расчёта последствий кратковременных аварийных выбросов на примере аварии на Белоярской АЭС. Вторая практическая задача знакомит пользователя с возможностью использовать реальные временные ряды метеорологических данных для проведения множественных расчётов с целью получения реалистичной картины радиационной обстановки, также на примере аварии на Белоярской АЭС. Третья практическая задача посвящена оценке последствий выбросов радиоактивных веществ в режим нормальной эксплуатации на примере реактора «БРЕСТ-ОД-300». Четвёртая практическая задача знакомит пользователя с некоторыми дополнительными возможностями ПС РОМ/Е1.0.

Основная задача, которую ставят авторы пособия, — научить пользователя самостоятельно выполнять расчёты с помощью ПС и анализировать полученные результаты.

1.1. Назначение ПС РОМ

Компьютерная система РОМ предназначена для оценки радиационной обстановки при атмосферных выбросах радиоактивных веществ в аэрозольной и/или газовой форме на АЭС и других объектах использования атомной энергии (ОИАЭ) в аварийных режимах и при нормальной эксплуатации. Система может использоваться для анализа и обоснования безопасности ОИАЭ, а также для поддержки принятия решений в реальном времени на начальной, острой фазе радиационной аварии [1]. ПС РОМ является развитием аттестованного кода НОСТРАДАМУС [2].

ПС РОМ рассчитывает следующие параметры:

- мгновенные значения приземной объемной активности радионуклидов в аэрозольной и/или газовой форме ($\text{Бк}/\text{м}^3$) для каждого радионуклида (далее — объемная активность);
- временные интегралы объемной активности;
- поверхностная активность радионуклида в аэрозольной форме на поверхности ($\text{Бк}/\text{м}^2$) для каждого радионуклида (далее — плотность выпадений);
- мощности дозы и дозы облучения от каждого радионуклида (или суммарные от всех нуклидов) на органы и ткани (гонады, красный костный мозг, легкие, щитовидная железа, толстый кишечник, кожа) с учетом возрастных групп (от 0 до 1 года, от 1 года до 2 лет, от 2 до 7 лет, от 7 до 12 лет, от 12 до 17 лет, взрослые) для населения и с учетом разных путей облучения: внешнее облучение от радиоактивного облака, внешнее облучение от загрязненной поверхности, внутреннее облучение от ингаляционного поступления радионуклидов, внутреннее облучение от перорального поступления радионуклидов; облучение по водным путям не рассчитывается;
- параметры радиационной обстановки при кратковременных выбросах с выбором наиболее неблагоприятных метеорологических условий;
- параметры радиационной обстановки при продолжительных выбросах с использованием реальных метеорологических данных временных рядов;

- среднегодовые дозы облучения населения вокруг объекта использования атомной энергии (ОИАЭ) при регулярных выбросах при нормальной эксплуатации с использованием реальных метеорологических данных временных рядов;
- скорость гравитационного осаждения аэрозолей продуктов горения натрия.

1.2. Условия применения

ПС обеспечивает расчет распространения радионуклидов только в воздушной среде. Миграция радионуклидов в водной среде и в почве при проведении расчетов ПС не учитывается.

ПС рассчитывает атмосферный перенос радионуклидов только при рельефе местности с плавным изменением высоты (например, ПС неприменимо для расчета переноса радионуклидов в условиях городской застройки).

Расчет атмосферного переноса радионуклидов в аэрозольной и/или газовой форме проводится только для простых метеорологических условий, при которых годеи реализованный в ПС упрощенный алгоритм восстановления вертикальных профилей скорости и направления ветра и коэффициентов турбулентной диффузии. Особые метеорологические условия, при которых этот алгоритм не работает, например, такие, как атмосферные фронты, бризовая циркуляция, горнодолинная циркуляция, в ПС не моделируются.

Используемые в ПС дозиметрические модели неприменимы для оценки больших доз облучения, приводящих к детерминированным эффектам.

В ПС дозы облучения населения по пищевым цепочкам от трития и углерода-14 для выброса при авариях не рассчитываются (рассчитываются только среднегодовые дозы).

В ПС расчет доз облучения по пищевым цепочкам при авариях проводится с учётом периода вегетации растений, участвующих в пищевых цепочках.

Допустимые значения входных параметров:

- Скорость ветра: от 0,5 до 15 м/с.
- Стратификация атмосферы: от устойчивой (категория G) до неустойчивой (категория A) по классификации Тернера.
- Минимальная высота выброса: 1 м.
- Форма источника: точечный или объемный (распределенный в цилиндре произвольной высоты и радиуса).
- Расстояние до источника: от 500 м до 60 км.
- Характер выброса: аварийный произвольной длительности (мгновенный, кратковременный и продолжительный – до месяца); а также регулярный (годовой) выброс в режиме нормальной эксплуатации.
- Продолжительность прогноза: не ограничена.

Допустимые значения входных параметров модели осаждения натриевых аэрозолей:

- Вид аэрозоля продуктов горения натрия, для которого оценивается скорость осаждения: NaOH.
- Температура воздуха (°C): от 17 до 27.
- Относительная влажность воздуха (%): от 22 до 96.
- Исходный размер сухих частиц (мкм): от 0,1 до 15.

1.3. Описание задачи

В системе РОМ реализована лагранжева траекторная стохастическая модель атмосферного переноса, основанная на решении уравнения турбулентной диффузии методом статистических испытаний (Монте-Карло). В траекторных моделях распространение облака примеси представляется одновременным движением большого количества пробных точек, каждая из которых движется со скоростью ветра в том месте, где она находится. На это движение накладываются случайные отклонения, моделирующие рассеяние примеси в атмосфере. Величина случайных смещений определенным образом связана с коэффициентом турбулентного перемешивания. Каждой точке приписывается определенная активность так, чтобы суммарная активность всех точек была равна полной активности выброса. Концентрация активности в воздухе ассоциируется с концентрацией точек.

Для сглаживания результатов расчета разработана гибридная методика «блуждающих облаков», в которой каждая пробная точка представляется как облако конечных размеров с гауссовым распределением концентрации. Концентрация в заданной точке теперь определяется как сумма вкладов всех облаков в этой точке. При этом размеры облаков растут со временем в соответствии с диффузионным процессом, при котором скорость роста квадрата размера пропорциональна коэффициенту диффузии. В этом случае степень перекрытия облаков не будет меняться с течением времени. Суммарная дисперсия примеси в этих процессах должна быть равна исходной атмосферной дисперсии.

1.4. Возможности кода РОМ

Кроме лагранжевой траекторной модели атмосферного переноса, которая отличает код РОМ от широко распространенных гауссовых методик, код содержит еще следующие модели:

- Модель пограничного слоя атмосферы для восстановления вертикальных профилей метеорологических параметров по данным измерений на приземном уровне.
- Методика для определения категории стабильности атмосферы по синоптическим признакам.

Это дает дополнительные возможности по отношению к гауссовым моделям:

- рассчитывать перенос загрязнений на расстояния до сотни километров;
- учитывать реальную трехмерную неоднородность ветрового поля в пределах атмосферного погранслоя;
- рассматривать источник произвольной конфигурации и формы;
- учитывать дисперсный состав аэрозольных частиц;
- учитывать изменение со временем параметров источника и метеорологических условий;
- рассчитывать влияние рельефа местности на процесс рассеивания;
- рассчитывать влияние осадков с интенсивностью, зависящей от времени и координат.

1.5. Ограничения учебной версии

В учебной версии кода РОМ введены следующие ограничения:

- Исключена возможность расчета радиационной обстановки на реальных объектах с использованием реальных координат (разработаны учебные географические карты для указанных площадок с условными географическими координатами).
- Закрыт доступ к БД по радиационно опасным объектам, кроме площадки Белоярской АЭС и площадки СХК.

- Закрыт доступ к базе данных основной части населенных пунктов в районе размещения указанных ОИАЭ.
- Ограничен доступ к реальным метеорологическим данным для района размещения Белоярской АЭС за последние годы.

Кроме того, введены следующие функциональные ограничения:

- Невозможность проведения расчетов на радиальной сетке.
- Отсутствует возможность учета двумерного распределения типа ландшафта местности.
- Закрыта возможность использования внешних трехмерных данных: полей скорости ветра, коэффициентов турбулентного обмена и неоднородного распределения осадков.
- Закрыта возможность ручного задания вертикального профиля компонент скорости ветра.
- Количество трехчасовых интервалов во временном ряде метеопараметров ограничено 64.
- Количество временных отрезков («ступенек») источника выброса ограничено 24.
- Недоступна возможность автоматического учета теплового подъема струи в режиме серийного и многовариантного счета.
- Отсутствует возможность использования радиальной сетки для расчета двумерных полей данных (концентраций, плотности выпадений, мощностей доз и интегральных доз). Доступна только декартова сетка.
- Отсутствует возможность регулярного задания точек индикации посредством опции «Радиальный сектор».
- Недоступен функционал работы с базой данных сценариев выброса.
- Недоступна опция автоматического сохранения двумерных полей параметров радиационной обстановки в бинарных файлах.

1.6. Установка ПС и рекомендуемое оборудование

Для установки системы на компьютер под управлением операционной системы WINDOWS с установочного диска скопировать файл *install/bde_setup.exe* и запустить этот файл для установки пакета «*Borland Database Engine*». Далее нужно скопировать каталог *install/rom* в произвольное место дискового пространства операционной системы. После этого ПС РОМ готово к работе. Можно создавать произвольное количество копий ПС РОМ, при этом копии могут работать одновременно, никак не влияя на работу друг друга.

Код РОМ может работать под управлением любых современных персональных компьютеров и рабочих станций со следующими ориентировочными ограничениями:

- Частота процессора >1ГГц (произвольное количество ядер).
- Объем оперативной памяти >4 Гб.
- Объем дискового пространства >100 Гб.

Однако, чем больше такие параметры, как частота процессора, частота шины памяти, объем кэш-памяти процессора (L1, L2 и L3 уровней), тем большую производительность должен показывать код РОМ. Для удобства работы так же желательно использовать *FullHD* монитор.

2. ОПИСАНИЕ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА РОМ

2.1. Лагранжева траекторная модель распространения радионуклидов в атмосфере

В настоящее время существует несколько подходов к моделированию атмосферного переноса. Они различаются кругом учитываемых факторов, влияющих на процессы атмосферной дисперсии, и способами учета влияния этих факторов.

Наиболее простой и наиболее распространенный сейчас подход основан на применении так называемых гауссовых моделей переноса. Эти модели реализуют аналитическое точное решение стационарного уравнения адвекции-диффузии с постоянными коэффициентами.

Гауссовы модели просты и оперативны. Они не требуют больших объемов вычислений. Входящие в стандартные модели константы определяются на основе статистической обработки многочисленных наблюдений и экспериментов по распространению примеси. Большая часть этих экспериментов проведена в довольно узком диапазоне условий. Использование этих экспериментальных данных допустимо только для условий, в которых они получены и для которых накоплен достаточный экспериментальный материал. Распространение этих данных на другие условия переноса примеси требует осторожности.

Более реалистичную оценку атмосферного рассеивания дают модели, которые, в отличие от гауссовых моделей, используют информацию о пространственной неоднородности метеорологических параметров (зависимость скорости и направления ветра и коэффициентов турбулентной диффузии от высоты) и учитывают законы подобия пограничного слоя атмосферы (ПСА). Такие модели, учитывающие влияние на перенос примесей неоднородного трехмерного поля ветра, неоднородных коэффициентов турбулентного обмена, требуют существенно больше вычислительных ресурсов и времени для расчета, чем гауссовы модели. Тем не менее, при современной компьютерной технике они позволяют работать в режиме реального времени.

Эти модели описывают распространение примеси в рамках единого алгоритма в широком диапазоне условий, как в стандартных, так и в нестандартных условиях (малые скорости ветра, высотные источники).

В настоящем разделе описана разработанная в ИБРАЭ РАН гибридная лагранжева траекторная стохастическая модель атмосферного переноса.

Описание модели, заложенной в программное средство РОМ, а также части результатов моделирования верификационных экспериментов опубликовано в работах [3, 4, 5], а также в верификационных отчетах ПС НОСТРАДАМУС и РОМ [1, 2].

2.1.1. Дифференциальная модель распространения в атмосфере

Представляемая модель описывает распространение примесей в атмосфере. Предполагается, что примеси могут быть в газовой и/или аэрозольной форме. При этом газовые компоненты (если они есть) предполагаются имеющими плотность приблизительно равную плотности воздуха и/или достаточно разреженными, так что эффекты плавучести не учитываются.

Модель исходит из того, что распространение примеси в атмосфере описывается полуэмпирическим уравнением адвекции-диффузии. Это уравнение переноса и диффузии имеет вид:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU}{\partial x} + \frac{\partial CV}{\partial y} + \frac{\partial C\hat{W}}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right) + Q + S. \end{aligned} \quad (2.1)$$

В этом уравнении:

- x, y, z, t — координаты и время;
- $C = C(x, y, z, t)$ — объемная концентрация примеси в воздухе;
- $U = U(x, y, z, t), V = V(x, y, z, t)$ — горизонтальные компоненты скорости ветра;
- $\hat{W} = W(x, y, z, t) - W_g$;
- $W(x, y, z, t)$ — вертикальная компонента скорости ветра;
- W_g — скорость гравитационного оседания (может быть положительна для нуклидов в аэрозольной форме);
- K_x, K_y — коэффициенты горизонтальной диффузии;
- K_z — коэффициент вертикальной диффузии;
- $Q = Q(x, y, z, t)$ — мощность источника выброса;
- S — член, учитывающий остальные физические процессы (вымывание осадками, радиоактивный распад и появление дочерних радионуклидов в результате цепочек превращений).

Граничные условия для уравнения (2.1) следующие. На поверхности ($z = 0$) задается поток примеси на подстилающую поверхность за счет сухого осаждения:

$$\left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} - \hat{W}C \right) \Big|_{z=0} = C \cdot V_d.$$

Здесь V_d — скорость сухого осаждения. Эта скорость может быть представлена как $W_g + V_t$, где V_t — составляющая скорости сухого осаждения, обусловленная турбулентным потоком частиц в поверхностном слое воздуха.

На верхней границе расчетной области $z = Z_m$ предполагается отсутствие потока примеси:

$$\left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} - \hat{W}C \right) \Big|_{z=Z_m} = 0.$$

На боковых (вертикальных) границах расчетной области, предполагается условие $\partial C / \partial n = 0$ (n — направление нормали к боковой границе; условие означает нулевой диффузионный поток, при этом конвективный поток примеси определяется скоростью ветра). Следует отметить, что граничное условие на участках границы, далеких от центра струи, практически не влияет на решение.

Величина Z_m выбирается таким образом, чтобы она была несколько больше высоты пограничного слоя атмосферы (ПСА): $Z_m = 1,2 - 1,5 H_m$. (определение высоты ПСА обсуждается ниже, п. 3.3.4). Если высота ПСА меняется со временем в течение расчета, то Z_m должно быть больше максимального значения H_m .

Скорость ветра и коэффициенты диффузии в уравнении (2.1) считаются заданными функциями координат и времени.

2.1.2. Метод решения уравнения переноса

Уравнение (2.1) с неоднородным полем скорости ветра при неизотропной турбулентности (без учета влажного вымывания и цепочек превращений) решается методом статистических испытаний (метод Монте-Карло). Этот метод можно наглядно интерпретировать следующим образом.

Облако примеси представляется в виде большого количества пробных частиц (точек), каждая из которых движется в соответствии со скоростью ветра и, кроме того, подвергается случайным смещениям, моделирующим турбулентное рассеивание. Объемная концентрация точек ассоциируется с концентрацией примеси. Каждой точке соответствует активность A , равная полной активности выброса, деленной на число точек.

Рассмотрим сначала решение уравнения переноса вдали от источника и без учета осаждения на поверхность и вымывания осадками, а также без учета нуклидного состава выброса (один радионуклид в выбросе) и без учета радиоактивного распада.

Координаты пробных точек удовлетворяют системе стохастических уравнений [6, 7]:

$$\begin{cases} \frac{dX}{dt} = U_r + U^1, \\ \frac{dY}{dt} = V_r + V^1, \\ \frac{dZ}{dt} = W_r + W^1. \end{cases} \quad (2.2)$$

Где:

$$\begin{cases} U_r = U(x, y, z, t), \\ V_r = V(x, y, z, t), \\ W_r = W(x, y, z, t) - W_g + W''. \end{cases} \quad (2.3)$$

Первые члены в правых частях (2.2) — компоненты усредненной скорости ветра. Вертикальная скорость частицы отлична от скорости ветра, даже если гравитационная скорость равна нулю. Добавка W'' необходима, как будет видно дальше, для согласования решения при неоднородном коэффициенте вертикальной диффузии. Ее величина будет найдена ниже.

U^1, V^1, W^1 — компоненты пульсационной скорости ветра вдоль траектории частиц — случайные функции. Предполагается, что значения пульсационной скорости в разные моменты времени на траектории частицы не скоррелированы между собой (характерное время затухания корреляций меньше временного шага интегрирования). Отметим, что движение пробных точек не моделирует реальных траекторий частиц примеси. Описываемая процедура представляет собой способ решения полуэмпирического уравнения (2.1).

Проинтегрируем систему стохастических уравнений (2.2) на малом временном интервале dt (шаг интегрирования) с учетом указанных предположений о корреляционной функции скоростей:

$$\begin{cases} dX = U_r dt + \delta x, \\ dY = V_r dt + \delta y, \\ dZ = W_r dt + \delta z. \end{cases}$$

Где $\delta x, \delta y$ и δz — случайные смещения частицы. Они удовлетворяют следующим соотношениям:

$$\begin{cases} \langle \delta x^2 \rangle = \omega_x^2 dt, \\ \langle \delta y^2 \rangle = \omega_y^2 dt, \\ \langle \delta z^2 \rangle = \omega_z^2 dt. \end{cases}$$

Здесь ω_x^2 , ω_y^2 и ω_z^2 — коэффициенты, зависящие от корреляционных функций скоростей. Знак $\langle \rangle$ означает усреднение по статистическому ансамблю. Теперь изменения координат точек в конкретной реализации процесса за шаг интегрирования могут быть записаны в виде:

$$\begin{cases} dX = U_r dt + \omega_x a_x, \\ dY = V_r dt + \omega_y a_y, \\ dZ = W_r dt + \omega_z a_z. \end{cases} \quad (2.4)$$

Где a_x , a_y и a_z — случайные величины с гауссовым распределением вероятности, нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\langle a_x^2 \rangle = \langle a_y^2 \rangle = \langle a_z^2 \rangle = dt$.

Начальные условия для системы (2.2) следующие. Траектория каждой точки начинается в объеме источника примеси. Скорость рождения точек в источнике пропорциональна интенсивности источника.

Этот процесс можно связать с концентрацией примеси. Объемные концентрации примеси могут быть получены при помощи функции плотности вероятности $\mu(x_0, y_0, z_0, t_0, x, y, z, t)$ — того, что частица, появившаяся в точке с координатами (x_0, y_0, z_0) в момент времени t_0 , окажется в момент времени t в точке с координатами (x, y, z) .

Объемная концентрация следующим образом выражается через функцию плотности вероятности:

$$C(x, y, z, t) = \int_0^t dt_0 \iiint_V \mu(x_0, y_0, z_0, t_0, x, y, z, t) S(x_0, y_0, z_0, t_0, t) dx_0 dy_0 dz_0 \quad (2.5)$$

Здесь V — объем в атмосфере, который занимает облако.

Можно показать, что если в (2.4) принять $\omega_x^2 = 2K_x$, $\omega_y^2 = 2K_y$ и $\omega_z^2 = 2K_z$, то объемная концентрация, соответствующая (2.5), будет удовлетворять следующему уравнению:

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial U_r C}{\partial x} + \frac{\partial V_r C}{\partial y} + \frac{\partial W_r C}{\partial z} = \\ = \frac{\partial^2 (K_x C)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 (K_y C)}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 (K_z C)}{\partial z^2}, \end{aligned}$$

или

$$\begin{aligned} \frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial \left(U_r - \frac{\partial K_x}{\partial x} \right) C}{\partial x} + \frac{\partial \left(V_r - \frac{\partial K_y}{\partial y} \right) C}{\partial y} + \frac{\partial \left(W_r - \frac{\partial K_z}{\partial z} \right) C}{\partial z} = \\ = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right). \end{aligned} \quad (2.6)$$

В этом уравнении U_r , V_r и W_r — компоненты регулярной скорости движения частиц как функции координат, определяемые (2.3). В (2.6) учтено, что горизонтальные компоненты согласно (2.3) равны компонентам усредненной скорости ветра.

Как правило, производными от коэффициентов горизонтального турбулентного обмена по сравнению с горизонтальной скоростью ветра можно пренебречь и положить $\partial K_x / \partial x = \partial K_y / \partial y = 0$. Для вертикальной компоненты это, вообще говоря, не так. Согласно (2.3)

$$W_r = \hat{W} + W''.$$

Если выбрать $W'' = \partial K_z / \partial z$ и подставить это значение в (2.6), то это уравнение перейдет в уравнение

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \frac{\partial CU}{\partial x} + \frac{\partial CV}{\partial y} + \frac{\partial C\hat{W}}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(K_x \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K_y \frac{\partial C}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K_z \frac{\partial C}{\partial z} \right),$$

полностью идентичное (2.1) без учета объемных источников и стоков. Учет объемных стоков и граничных условий при реализации случайного движения точек описывается ниже.

Таким образом, для того, чтобы концентрация примеси, даваемая выражением (2.5), удовлетворяла исходному уравнению (2.1), необходимо, чтобы вертикальная скорость движения частиц отличалась от скорости \hat{W} на величину $\partial K_z / \partial z$:

$$W_r = W(x, y, z, t) + \frac{\partial K_z}{\partial z} - W_g.$$

В некоторых моделях подобного типа член $\partial K_z / \partial z$ в последнем уравнении системы (2.4) не учитывался [8]. Как показано в [9], это приводит к нереалистичному распределению примеси по высоте, скоплению примеси у поверхности, завышенным значениям выпадения. Так как в нижних слоях атмосферы коэффициент вертикальной диффузии быстро растет с высотой, за счет этого появляется эффективная средняя (на фоне турбулентных пульсаций) вертикальная скорость.

2.1.3. Реализация методики решения уравнения переноса

Согласно вышеизложенному, концентрация примеси может быть определена через число пробных точек, попавших в заданный малый объем. Недостатком такого способа является то, что при разумном числе пробных точек (5—10 тысяч) не удается достичь компромисса между пространственным разрешением и гладкостью результатов расчета. Пространственное разрешение требует малых размеров контрольной ячейки dx , dy . Но при малых размерах в эту ячейку будет попадать мало точек, и расчетные концентрации будут сильно флуктуировать.

Для сглаживания результатов расчета разработана гибридная методика «блуждающих облаков» для вычисления распределения концентрации на основе данных о координатах пробных частиц, сочетающая в себе преимущества гауссовых и лагранжевых моделей. Основная идея методики состоит в том, что каждая пробная точка представляется как облако конечных размеров с гауссовым распределением концентрации. Концентрация в заданной точке теперь определяется как сумма вкладов всех облаков в этой точке. При этом размеры облаков растут со временем в соответствии с диффузионным процессом, когда скорость роста квадрата размера пропорциональна коэффициенту диффузии. В этом случае степень перекрытия облаков практически не будет меняться с течением времени. Суммарная дисперсия концентрации примеси в этих процессах (т. е., дисперсия, связанная с диффузией центров облаков и с диффузионным расширением самих облаков) должна быть равна исходной атмосферной дисперсии.

Смещения центров облаков определяются уравнениями:

$$\begin{cases} dX = Udt + \sqrt{2K'_x} a_x, \\ dY = Vdt + \sqrt{2K'_y} a_y, \\ dZ = Wdt + \sqrt{2K'_z} a_z. \end{cases}$$

Здесь a_x, a_y, a_z — случайные величины с нормальным распределением с нулевым математическим ожиданием и дисперсией $\langle a_x^2 \rangle = \langle a_y^2 \rangle = \langle a_z^2 \rangle = dt$.

Рост размеров облаков R и H (соответственно — горизонтального и вертикального) определяется соотношениями:

$$\begin{cases} dR^2 = 2K_x'' dt, \\ dH^2 = 2K_z'' dt. \end{cases}$$

Здесь K'_x, K'_z, K''_x, K''_z — эффективные коэффициенты диффузии (горизонтальный и вертикальный), определяющие соответственно разброс центров облаков и рост их размеров. Для того, чтобы выполнялось равенство суммарной дисперсии исходной атмосферной дисперсии, должно быть

$$\begin{cases} K'_x + K''_x = K_x, \\ K'_z + K''_z = K_z. \end{cases}$$

Или:

$$\begin{cases} K'_x = K_x \beta, \\ K''_x = K_x (1 - \beta), \\ K'_z = K_z \beta, \\ K''_z = K_z (1 - \beta). \end{cases}$$

Здесь β — некоторый произвольный коэффициент, значение которого определяется подбором. Случай $\beta = 1$ эквивалентен предыдущей модификации. Случай $\beta = 0$ эквивалентен гауссовой модели (все частицы движутся по одной траектории, и вертикальная зависимость коэффициента диффузии не проявляется). Поэтому выбирается максимально близкое к 1 значение β , при котором получаются достаточно гладкие профили концентраций на поверхности.

Показанное выше соотношение между коэффициентами диффузии приводит к тому, что $H \approx \sigma_z (1 - \beta)^{1/2}$. Диффузионный рост вертикального размера струи ограничен высотой ПСА H_m (предполагается, что источник находится в пределах ПСА), так что $\sigma_z \leq H_m$. Чтобы не нарушить суммарной дисперсии, рост вертикального размера отдельных облаков также должен быть ограничен. В коде полагается, что как только вертикальный размер данного облака превысит значение $H_m (1 - \beta)^{1/2}$, K''_z становится равным нулю, благодаря чему дальнейший рост вертикального размера этого облака прекращается.

Вычисление приземных концентраций

Концентрация примеси от отдельного k -го облака с центром в точке (x_k, y_k, z_k) C_k в произвольной точке x, y, z определяется следующим образом (напомним, что распределение концентрации в облаке — гауссово). Пусть функция $G(x, \mu, \sigma)$ — есть функция одномерного распределения Гаусса с математическим ожиданием μ и дисперсией σ^2 :

$$G(x, \mu, \sigma) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \exp \left\{ -\frac{(x - \mu)^2}{2\sigma^2} \right\}.$$

Введем также интеграл от этой функции (функция распределения нормального распределения — функция ошибок):

$$\Phi(x) = \int_{-\infty}^x G(\tilde{x}, 0, 1) d\tilde{x}$$

Тогда вышеупомянутая концентрация будет равна:

$$C_k(x, y, z) = A_k \cdot G(x, x_k, R) \cdot G(y, y_k, R) \cdot \{G(z, z_k, H) + G(z, -z_k, H)\}. \quad (2.7)$$

$$R^2 = 2(1 - \beta) \int_0^t K_x dt.$$

$$H^2 = 2(1 - \beta) \int_0^t K_z dt.$$

Здесь C_k — концентрация от k -го облака в точке x, y, z (центр контрольного объема), Бк/м³; A_k — полная активность одного облака, Бк; x_k, y_k, z_k — координаты центра k -го облака, м.

Сумма экспонент в четвертом множителе в правой части соответствует учету «зеркально симметричных» относительно поверхности частиц. Он необходим для правильного учета граничного условия на поверхности и обеспечивает сохранение полной «массы» выброса в отсутствие осадения. При вычислении приземной концентрации ($z_0=0$) учет зеркальных частиц сводится к удвоению первого члена выражения.

Для вычисления приземной концентрации примеси каждому облаку приписывается активность A , так, чтобы суммарная активность всех облаков равнялась полной выброшенной активности. Приземная концентрация определяется как сумма приземных концентраций от всех облаков выброшенной примеси.

Для удобства представления приземных концентраций (и других связанных с ней вычисляемых величин) на двумерной расчетной сетке вклад от каждого облака в приземную концентрацию определяется как средняя концентрация в контрольном объеме, представляющем собой прямоугольный параллелепипед с основанием, равным ячейке разностной сетки и некоторой малой высотой. Если эта высота много меньше характерного вертикального размера струи, то результат не зависит от ее выбора. Это выгодно отличает этот способ оценки концентрации от основанного на подсчете числа точек в контрольном объеме (описанного выше), где высота объема требовала специального выбора. В коде эта высота выбрана — 1 м. Введем также обозначения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{x}_- = \left(x - \frac{h_x}{2} - x_k \right) / R, \\ \tilde{x}_+ = \left(x + \frac{h_x}{2} - x_k \right) / R, \\ \tilde{y}_- = \left(y - \frac{h_y}{2} - y_k \right) / R, \\ \tilde{y}_+ = \left(y + \frac{h_y}{2} - y_k \right) / R, \\ \tilde{z}_- = (-1 - z_k) / H, \\ \tilde{z}_+ = (1 - z_k) / H. \end{array} \right.$$

Приземная (на высоте $z = 1$ м) концентрация $C_k(x, y)$ от k -го облака в узле в регулярной сетки с координатами x, y дается формулой:

$$C_k(x, y, 1) = \frac{A_k}{Vol} \{ \Phi(\tilde{x}_+) - \Phi(\tilde{x}_-) \} \{ \Phi(\tilde{y}_+) - \Phi(\tilde{y}_-) \} \{ \Phi(\tilde{z}_+) - \Phi(\tilde{z}_-) \}. \quad (2.8)$$

Здесь: $C_k(x, y, 1)$ — приземная концентрация от k -го облака в точке x, y , Бк/м³; h_x, h_y, h_z — размеры контрольного параллелепипеда, м; $Vol = h_x h_y h_z$ — контрольный объем, м³.

Таким образом, в узлах расчетной сетки записываются не точные (относящиеся к узлам ячеек), а усредненные по площади ячейки значения концентрации. Такой способ вычисления приземной концентрации и плотности выпадений позволяет получать правильные (удовлетворяющие закону сохранения) интегральные значения выпавшей активности независимо от соотношения размеров облаков и ячейки сетки.

Полная концентрация от всех отдельных облаков выброса в точке x, y получается суммированием (2.8) по всем облакам k .

Расчет плотности выпадений за счет сухого осаждения

Активность облаков может меняться за счет сухого осаждения у поверхности земли. Процессам осаждения подвержены только радионуклиды в аэрозольной форме. Для каждого радионуклида известна скорость сухого осаждения V_d у поверхности земли (м/с). Зная скорость сухого осаждения в каждый момент времени и значение приземной концентрации, можно рассчитать плотность выпадений радионуклида в зависимости от времени.

Введем обозначения:

$$\left\{ \begin{array}{l} \xi_x = \Phi(\tilde{x}_+) - \Phi(\tilde{x}_-), \\ \xi_y = \Phi(\tilde{y}_+) - \Phi(\tilde{y}_-), \\ \xi_z = \Phi(\tilde{z}_+) - \Phi(\tilde{z}_-). \end{array} \right.$$

Вклад данного k -го облака в изменение плотности выпадений $E(x, y)$ в узле (x_i, y_j) сетки за счет сухого осаждения за один шаг интегрирования вычисляется так:

$$dE_k(x_i, y_j) = C_k(x_i, y_j, 1) V_d dt. \quad (2.9)$$

Здесь $dE_k(x_i, y_j)$ — вклад k -го облака в приращение плотности выпадений в точке (x_i, y_j) — центре расчетной ячейки (i, j) , Бк/м²; $C_k(x_i, y_j, 1)$ — вклад k -го облака в приземную концентрацию

в точке (x_i, y_j) , Бк/м³. Для получения изменения плотности выпадений в данной ячейке за счет сухого осаждения, необходимо соотношение (2.9) просуммировать по всем частицам.

С учетом того, что,

$$C_k(x_i, y_j, 1) = \frac{A_k \xi_x \xi_y \xi_z}{h_x h_y h_z},$$

а также, что

$$\delta A_k(x_i, y_j) = -dE_k(x_i, y_j) h_x h_y,$$

(где $\delta A_k(x_i, y_j)$ — изменение активности данного облака за счет сухого осаждения в данной ячейке), получим:

$$\delta A_k(x_i, y_j) = -A_k dt \xi_x \xi_y \left\{ \frac{1}{h_z} \xi_z V_d \right\}. \quad (2.10)$$

Для расчета изменения полной массы данного облака, необходимо соотношение (2.10) просуммировать по всем ячейкам расчетной сетки.

Расчет поля осаджений радионуклидов за счет вымывания осадками

Содержание радионуклидов в облаке выброса может меняться, кроме того, за счет вымывания осадками. В данной версии программы предполагается, что нижняя кромка облаков, из которых выпадают осадки, находится выше верхней границы струи радиоактивных примесей, так что вымыванию подвергается вся струя.

Вымывание учитывается путем уменьшения активности в каждой расчетной частице, причем полное число этих частиц в этом процессе также не меняется.

Активность (δA_k), теряемая за шаг dt данным k -м облаком за счет влажного вымывания дается выражением:

$$\delta A_k = -A_k \frac{dt}{\tau_p}, \quad (2.11)$$

где: $\tau_p = 1/(\chi P)$ — характерное время вымывания, с; χ — константа вымывания, час/с/мм; P — интенсивность осадков, мм/час.

Пусть $\delta A_k(x_i, y_j)$ — доля теряемой активности в узле (x_i, y_j) площади $h_x h_y$. Тогда эта величина равна:

$$\delta A_k(x_i, y_j) = \delta A_k \xi_x \xi_y.$$

Тогда изменение плотности выпадений за счет вымывания в каждом узле (x_i, y_j) будет рассчитываться по формуле:

$$\delta E_k(x_i, y_j) = -\frac{\delta A_k \xi_x \xi_y}{h_x h_y} = -\frac{A_k dt \xi_x \xi_y}{\tau_p h_x h_y}. \quad (2.12)$$

Для получения изменения суммарной плотности выпадений необходимо соотношение (2.12) просуммировать по всем частицам. Полное обеднение облака за счет вымывания осадками считается по формуле (2.11).

Учет различных свойств осаджений

Приведенная выше методика для расчета плотности выпадений и обеднения облака обобщается на случай полидисперсного состава аэрозольных частиц и радионуклидного состава выброса.

Скорости сухого осаждения, гравитационного оседания и константа влажного вымывания могут иметь разные значения из-за разных физико-химических свойств радионуклидов в выбросе, а также из-за разных размеров аэрозолей. Для учета разницы свойств разных составляющих выброса все пробные частицы подразделяются на ряд групп, причем каждая группа имеет свои значения скорости сухого осаждения, гравитационного оседания и константы вымывания.

Для учета зависимости параметров выброса от времени действия источника, последний подразделяется на временные отрезки (временные фазы или ступеньки), таким образом, что на протяжении каждого такого отрезка времени нуклидный состав и интенсивность выброса каждого нуклида были постоянны (и менялись скачком при переходе к следующей ступеньке).

В самом общем случае временные фазы источника могут либо частично перекрываться друг с другом, либо следовать друг за другом с разрывами (в таких разрывах источник фактически не действует).

Для каждой временной фазы источника l (l — номер фазы) имеется свой список нуклидов и свой набор групп частиц по свойствам осаждения. Каждому нуклиду r ставится в соответствие группа $m(r)$. В данном пособии не рассматривается достаточно редкий случай, при котором один и тот же нуклид принадлежит нескольким группам, хотя код РОМ позволяет работать и с такими источниками. Будем предполагать, что каждому нуклиду r ставится в соответствие только одна группа m . Каждому нуклиду ставится в соответствие доля в фазе $d_r^{l,m}(t)$, которая численно равна отношению активности нуклида r в текущий момент времени к суммарной активности (сумме активностей всех нуклидов всех групп, выброшенных в фазе l) в начальный момент начала действия фазы l . Каждой группе ставится в соответствие доля группы m в фазе l — d_l^m , которая численно равна отношению суммарной активности группы к суммарной активности в фазе l в момент начала этой фазы. Величина d_l^m не меняется со временем (инвариантна), а величина $d_r^{l,m}(t)$ меняется с течением времени за счет радиоактивного распада.

Каждому облаку (пробной точке) в фазе l ставится в соответствие номер группы m и соответствующий группе нуклидный состав. Таким образом, каждое облако характеризуется номером фазы, номером группы и нуклидным составом.

В коде РОМ на расчетной сетке вычисляются и хранятся объемные активности и плотности выпадений для каждой группы каждой фазы источника (то есть, суммарные объемные активности и плотности выпадений всех нуклидов данной группы данной фазы) в текущий момент модельного времени: $C_m^l(x_i, y_j, t)$, объемная концентрация группы l фазы m , и $E_m^l(x_i, y_j, t)$, плотность выпадений группы l фазы m . Мгновенные концентрации $C_m^l(x_i, y_j, t)$ вычисляются как сумма $A_k(x_i, y_j, t)/Vol$ по всем облакам, принадлежащим группе m и фазе l . Плотности осаджений $E_m^l(x_i, y_j, t)$ вычисляются как сумма $\Delta A_k(x_i, y_j, t)/h_x h_y$ по всем временным шагам и всем облакам, принадлежащим группе m и фазе l .

В вычисленных и записанных таким образом приземной концентрации и плотности выпадений каждой группы каждой фазы не учитывается изменение активности за счет радиоактивного

распада, так как эти величины рассчитываются исходя из активностей частиц в момент начала действия фаз.

С учетом радиоактивного распада приземная концентрация радионуклида r C^r в ячейке (x_i, y_j) будет определяться выражением:

$$C^r(x_i, y_j, t) = \sum_l \sum_m C_m^l(x_i, y_j, t) \frac{d_r^{l,m}(t)}{d_l^m}. \quad (2.13)$$

Суммирование производится по всем группам всех фаз. Аналогично, плотность выпадений нуклида r E^r в момент времени t будет вычисляться по формуле:

$$E^r(x_i, y_j, t) = \sum_l \sum_m E_m^l(x_i, y_j, t) \frac{d_r^{l,m}(t)}{d_l^m}. \quad (2.14)$$

Радиоактивные благородные газы формально включаются в отдельную группу, для которой $V_d=W_g=0$, а также $\chi=0$. В отдельную группу выделяются также изотопы йода, для каждого химического соединения которого имеются свои оценки параметров осаждения.

Для крупных частиц (размеры > 50 мкм) сухое осаждение на поверхность определяется в основном гравитацией. Для более мелких частиц сухое осаждение может определяться в основном турбулентным диффузионным потоком на поверхность. Скорость сухого осаждения зависит от метеорологических условий, от характера поверхности, химических свойств аэрозольных частиц и поверхности.

Разбиение на группы по свойствам осаждения требует знания распределения аэрозольных частиц в выбросе по размерам. Такая информация, как правило, отсутствует.

В условиях отсутствия информации о распределении размеров аэрозольных частиц параметры групп по свойствам осаждения задаются пользователем. Так, в соответствии с документом [10] принимается, что компоненты выброса, возникающие при разрушении активной зоны реактора при тяжелой аварии, могут иметь следующий состав и свойства в отношении осаждения (см. Таблицу 2.1).

Таблица 2.1. Типовые параметры осаждений для различных групп радионуклидов

	Аэрозоли	Молекулярный йод	Органический йод	Инертные газы
Скорость сухого осаждения, м/с	$8 \cdot 10^{-3}$	$2 \cdot 10^{-2}$	10^{-4}	0
Постоянная вымывания, час/мм/с	$2,6 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$1,3 \cdot 10^{-6}$	0

Учет цепочек радиоактивного распада

Рассмотрим некоторую фазу выброса и таблицу нуклидов в этой фазе. Доля каждого из нуклидов в фазе $d_r^{l,m}(t)$ изменяется со временем за счет радиоактивного распада с учетом цепочек распада. В коде РОМ учтены цепочки распада для 118 радионуклидов (разные химические соединения йода с точки зрения цепочек распада считаются одним нуклидом). База данных по нуклидам может пополняться. Методика расчета радиоактивного распада с учетом цепочек распада аналогична методике, приведенной в справочнике [11].

Рассмотрим некоторый нуклид под номером l , у которого в цепочке распада $n-1$ поколений нуклидов ($n>1$). За время dt доли активностей в фазе изменятся следующим образом (индексы « l, m » здесь для удобства опущены):

$$\left\{ \begin{array}{l} d_1(t+dt) = d_1(t) \exp\{-\lambda_1 dt\}, \\ d_2(t+dt) = d_1(t) \lambda_1 \left\{ \frac{\exp(-\lambda_1 dt)}{\lambda_2 - \lambda_1} + \frac{\exp(-\lambda_2 dt)}{\lambda_1 - \lambda_2} \right\}, \\ \dots \\ d_m(t+dt) = d_1(t) \left\{ \prod_{k=1}^{k=n-1} \lambda_k \right\} \left\{ \sum_{k=1}^{k=n} \frac{\exp(-\lambda_k dt)}{\prod_{n \neq k} (\lambda_n - \lambda_k)} \right\}. \end{array} \right. \quad (2.15)$$

Здесь $\lambda_i = 0,693 / T_i^{1/2}$ и $T_i^{1/2}$ — постоянная распада и период полураспада i -го нуклида соответственно. В коде РОМ могут учитываться цепочки распада длиной не более 5.

Численный алгоритм решения уравнений движения пробных точек

Система уравнений (2.2) решается следующим образом. Местоположение облака на следующем шаге по времени (в момент времени $n+1$) определяется исходя из компонент скорости ветра и коэффициентов турбулентного обмена в точке, где находится частица в момент времени n . Сначала облако переносится со скоростью ветра:

$$\left\{ \begin{array}{l} \tilde{X}^{n+1} = X^n + U_r^n dt, \\ \tilde{Y}^{n+1} = Y^n + V_r^n dt, \\ \tilde{Z}^{n+1} = Z^n + W_r^n dt. \end{array} \right. \quad (2.16)$$

Для определения окончательного местоположения частицы центр облака испытывает случайное смещение, величина которого в среднем тем больше, чем больше коэффициент диффузии:

$$\left\{ \begin{array}{l} X^{n+1} = \tilde{X}^{n+1} + \sqrt{2K_h \beta dt} \eta_x, \\ Y^{n+1} = \tilde{Y}^{n+1} + \sqrt{2K_h \beta dt} \eta_y, \\ Z^{n+1} = \tilde{Z}^{n+1} + \sqrt{2K_v \beta dt} \eta_z. \end{array} \right. \quad (2.17)$$

Здесь η_x , η_y и η_z — нормально распределенные случайные величины. В следующем разделе описывается методика получения независимых псевдослучайных чисел с нормальным распределением.

Кроме того, изменяются размеры облака:

$$\left\{ \begin{array}{l} R^{n+1} = \sqrt{(R^n)^2 + 2K_h (1-\beta) dt}, \\ H^{n+1} = \sqrt{(H^n)^2 + 2K_v (1-\beta) dt}. \end{array} \right. \quad (2.18)$$

Рекомендуемый шаг интегрирования по времени должен удовлетворять условию Куранта:

$$\frac{\max\{U_r, V_r\}}{\min\{h_x, h_y\}} dt \leq 1.$$

Тогда за шаг интегрирования по времени за счет адвекции частица сместится не более чем на одну расчетную ячейку.

В реализованном алгоритме, как было отмечено выше, $\beta = 0,9$. Это значение было подобрано при сравнении расчетов с использованием стандартного метода Монте-Карло (с использованием точечных частиц) с модифицированным методом облаков и аналитическими решениями. Оно обеспечивает высокую точность результатов моделирования с неоднородными метеопараметрами и одновременно дает гладкие профили приземных концентраций.

2.2. Ввод и подготовка метеорологических параметров

В состав кода РОМ включен алгоритм восстановления вертикального профиля скорости ветра и характеристик атмосферной диффузии примеси исходя из минимального набора входных параметров по модели (ПСА). Алгоритм приводится далее по тексту.

Для однозначного определения параметров атмосферной дисперсии — восстановления вертикального профиля по модели ПСА — используется следующая входная информация:

- Долгота и широта метеорологической станции.
- Мировое время (UTC) на момент измерения.
- Модули направления скорости ветра на высоте флюгера (10 м).
- Высота снежного покрова или флаг его наличия.
- Балл облачности (от 1 до 10).
- Высота нижней границы облачности.
- Шероховатость подстилающей поверхности (или тип по классификации, позволяющей оценить шероховатость: например «UMD land cover classification»).
- Метеорологическая дальность видимости (м).
- Количество осадков (мм) с момента последнего измерения и период между этими измерениями.

Если вокруг ОИЯЭ имеется несколько метеорологических мачт, то для определения метеорологических параметров для модели ПСА, используемой в коде РОМ, обычно производится интерполяция из точек, в которых расположены метеостанции в точку, где размещен ОИЯЭ.

Если известны компоненты скорости ветра на высоте флюгера, интенсивности осадков и класс устойчивости атмосферы на M станциях в интересующий момент времени, то для этих параметров рекомендуется использовать покомпонентное усреднение с весами, равными обратному квадрату расстояния от ОИЯЭ до метеостанции.

Кроме того, в полной версии кода РОМ есть возможность использовать для расчетов полностью трехмерные нестационарные поля скорости ветра с произвольной детализацией, как по пространству, так и по времени. Такие трехмерные поля не могут задаваться пользователем вручную. Они являются выходными данными современных прогностических программных систем высокого разрешения (например, WRF). Для кода РОМ разработан специальный универсальный формат входного файла, который может считываться кодом и использоваться для расчетов.

Еще одна опция задания метеорологических данных в коде — это использование реальных данных, накопленных за последние несколько лет на метеорологических станциях, расположенных вблизи интересующего нас ОИЯЭ. Эти данные представляют собой записи метеорологических параметров, измеренных на каждой станции с интервалом в три часа. Такие данные используются для оценки среднегодовых концентраций радионуклидов и доз облучения вокруг ОИЯЭ, а также для оценки радиационной обстановки при продолжительных (несколько суток и более) аварийных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. На основе исходных («сырых») данных создаются входные файлы для кода РОМ. Обработка сырых данных с метеорологических станций и последующая генерация на их основе файлов, читаемых кодом РОМ является не формализуемой на данный момент задачей и не входят в сам код РОМ. Для использования данных возможностей необходимо обращаться к разработчикам кода РОМ.

2.3. Метеорологический блок для приземных данных

В случае, когда имеются только данные стандартных приземных измерений на метеостанциях, такой важнейший параметр, как категория устойчивости, не может быть определен ни по температурному градиенту, ни по флуктуациям направления скорости. Единственный способ определения категории устойчивости заключается в использовании синоптических данных. Методика нахождения класса устойчивости взята из [12] и подробно описана ниже.

Вычисление вертикальных профилей параметров, необходимых для расчета рассеивания примеси (скорости и направления ветра, коэффициентов турбулентного обмена), производится с использованием законов подобия пограничного слоя атмосферы (ПСА). В основу расчета высоты ПСА, профилей скорости и вертикального коэффициента диффузии положены данные работы Н. Л. Бызовой, В. А. Шнайдемана, В. Н. Бондаренко [13]. Методика определения горизонтального коэффициента диффузии использует тот же подход, основанный на законах подобия ПСА. Конкретные формулы и параметризации взяты из работ [14, 15]. Такой подход имеет свои ограничения.

Он опирается на представления о стационарном ПСА и тем самым не учитывает переходных процессов формирования ПСА и нестационарности в неустойчивых условиях.

Модель основана на данных ВММ Обнинска высотой 300 м, и требует экстраполяции для неустойчивых условий, когда высота ПСА может оказаться выше 300 м.

Модель корректно описывает ПСА только для баротропной атмосферы и не учитывает влияния бароклинности.

В то же время по наземным данным невозможно извлечь более подробную информацию, и описанная модель должна применяться с известными оговорками.

2.3.1. Методика определения категории устойчивости

Данные стандартных приземных измерений на метеостанциях не содержат информации о категории устойчивости атмосферы. В связи с этим необходимо использовать ту или иную методику для оценки и классификации состояния атмосферы.

Для приближенного описания устойчивости используют методики, основанные на наземных наблюдениях, такие как методика Паскуилла с поправками Тернера. В коде РОМ используется та же методика. По сравнению с классами устойчивости по Паскуиллу для этого способа характерен более детальный учет состояний атмосферы и введение в рассмотрение состояний, квалифицируемых как «очень устойчивые».

По классификации Тернера атмосферная устойчивость разделяется на 7 категорий, приведенных в таблице 2.2.

Таблица 2.2. Категории устойчивости по Тернеру

Класс устойчивости	Буквенное обозначение	Цифровое обозначение
Сильно неустойчивая	A	1
Умеренно неустойчивая	B	2
Слабо неустойчивая	C	3
Нейтральная (безразличная)	D	4
Слабо устойчивая	E	5
Умеренно устойчивая	F	6

Сильно устойчивая	G	7
-------------------	---	---

Основой для такого определения класса устойчивости атмосферы по данной методике является индекс инсоляции [12].

В общем случае индекс инсоляции *insol* предварительно определяется по астрономическому времени суток T_{ast} на метеостанции, дате и координатам станции. Астрономическое время суток определяется из мирового времени (UTC), которое обычно фиксируется на метеостанциях по следующей формуле:

$$T_{ast} = T_{UTC} + \frac{LON}{15}. \quad (2.19)$$

Где LON — долгота станции. Объяснение этой формулы просто: за один солнечный час земля поворачивается на 15 градусов вокруг своей оси, а астрономическое время на нулевом меридиане совпадает со временем UTC (а также временем по Гринвичу). Время $T_{ast}=12:00$ соответствует моменту, когда высота солнца максимальна для данной точки.

Вычисление индекса инсоляции производится по следующему алгоритму. Сначала вычисляется угол между прямой, соединяющей центры Солнца и Земли, и плоскостью, перпендикулярной оси вращения Земли α_{SE} . Он максимален в момент летнего солнцестояния, минимален — в момент зимнего, равен нулю — в моменты осеннего и весеннего равноденствия:

$$\alpha_{SE} = \beta \cos\left(\frac{2\pi\Delta_{days}}{365}\right). \quad (2.20)$$

Здесь $\beta \approx 23,5$ — угол наклона оси вращения Земли, Δ_{days} — количество дней, прошедшее с момента последнего летнего солнцестояния (21 июня). Далее пусть α_{SUN} — высота Солнца в градусах в точке с координатами (LON; LAT) в момент времени h (по астрономическим часам). Тогда синус этого угла будет равен:

$$\sin \frac{\pi\alpha_{SUN}}{180} = \sin\left(\frac{\pi LAT}{180}\right) \sin\left(\frac{\pi\alpha_{SE}}{180}\right) + \cos\left(\frac{\pi LAT}{180}\right) \cos\left(\frac{\pi\alpha_{SE}}{180}\right) \cos\left[\frac{\pi(h-12)}{12}\right] \quad (2.21)$$

Формула (2.21) получена по теореме косинусов для трехгранного угла. Далее вычисляется длительность дня D_d :

$$\begin{cases} \hat{t} &= -\tan \frac{\pi LAT}{180} \tan \frac{\pi\alpha_{SE}}{180}, \\ t &= \max(-1, \min(1, \hat{t})), \\ D_d &= \frac{24}{\pi} \arccos(t), \end{cases} \quad (2.22)$$

а также время восхода T_{up} и захода Солнца T_{down} :

$$\begin{cases} T_{up} &= 12 - \frac{D_d}{2}, \\ T_{down} &= 12 + \frac{D_d}{2}. \end{cases} \quad (2.23)$$

Если в данный момент светлое время суток, то есть $h > T_{up}$ и $h < T_{down}$, то индекс инсоляции определяется по высоте Солнца в градусах. Если темное время — то по времени, прошедшему после захода Солнца. Данные для определения индекса инсоляции приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3. Индекс инсоляции в зависимости от времени суток

День		Ночь	
α_{SUN}	<i>insol</i>	$h-T_{down}$	<i>insol</i>
<15°	1	<2	—1
<30°	2	<7	—2
<45°	3	>7	—3
<60°	4		
>60°	5		

Далее производится корректировка индекса инсоляции на основе следующей информации:

- Балл облачности B (от 0 до 10).
- Высота нижней границы облачности Hc (м).
- Видимость $Lvis$ (м).
- Наличие снежного покрова.
- Время суток (день или ночь).

Балл облачности — степень закрытия облаками небосвода в десятых долях. Облачность 10 баллов — сплошная облачность; 6÷9 баллов — больше половины небосвода покрыто облаками; 4÷6 баллов — около половины.

Модифицированный индекс *insolNew* инсоляции определяется из вспомогательного индекса (принимающего значения от 0 до 6 и зависящего от времени суток, балла облачности, высоты облаков и видимости) и оригинального индекса инсоляции, определенного по таблице 2.3. Модифицированный индекс инсоляции определяется по таблице 2.4.

Таблица 2.4. Определение модифицированного индекса инсоляции по исходному и вспомогательному индексу

<i>insolNew</i>		Исходный индекс инсоляции							
		-3	-2	-1	1	2	3	4	5
Вспомогательный Индекс i_{coll}	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	1	1	1	1	2
	2	0	0	0	1	1	2	3	4
	3	-1	-1	1	1	1	1	2	3
	4	-1	-1	-1	1	1	2	3	4
	5	-2	-1	-1	1	2	3	4	5
	6	-3	-2	-1	1	2	3	4	5

Вспомогательный индекс (обозначим его i_{coll}) определяется по схеме, приведенной на рисунке 2.1.

2.3.2. Определение динамической скорости

Для использования данных о вертикальной структуре ПСА, приведенных в [13], необходима оценка динамической скорости (скорости трения) U_* .

Для расчета скорости трения по данным о приземном ветре используются, как предложено в работе [13], соотношение, выражающее закономерности ПСА:

$$\begin{cases} U_* = \frac{0,4U_f}{\ln \frac{z_f}{z_0} + A(y_f)}, \\ y_f = \frac{z_f}{L(\text{Stab}, z_0)}. \end{cases} \quad (2.24)$$

Здесь z_f — высота флюгера (10 м — принятое в коде значение); z_0 — шероховатость подстилающей поверхности (м); $L = L(\text{Stab}, z_0)$ — так называемый масштаб Монина—Обухова, способ определения которого дается, например, в [16]; Stab — категория стабильности (целое число от 1 до 7); U_f — скорость ветра на высоте флюгера; $A(y_f)$ — функция одного параметра.

Функция $A(y)$ определяется видом универсальных функций профиля скорости ветра [13]. Используемое в коде выражение для этой функции приведено в [1, 2].

2.3.3. Вертикальные профили скорости ветра и коэффициентов турбулентного обмена

Высотные профили скорости ветра и вертикального коэффициента диффузии берутся из таблиц, приведенных в [13].

Безразмерные профили параметров ПСА получены в работе [13] на основе данных наблюдений и использования модели пограничного слоя атмосферы. Типовые профили получены для 7 категорий устойчивости, для теплого и холодного сезонов отдельно. Данные в пределах каждого класса устойчивости осреднены. Эти данные являются результатом измерений на высотной метеорологической мачте в Обнинске.

Хотя входные данные для настройки модели получены на основе данных измерений для поверхности с шероховатостью определенного типа (шероховатость $z_0 \sim 0,5 \div 1$ м), полученные безразмерные профили находятся как в качественном, так и в количественном плане близкими с экспериментальными данными, полученными для поверхностей, в том числе и с другими уровнями шероховатости [17].

Приведенные в [13] таблицы высотных профилей представляют как функции высоты следующие параметры:

- Скорость ветра.
- Угол разворота ветра относительно направления на высоте флюгера.
- Энергию турбулентности.
- Вертикальный коэффициент диффузии.

Типовые профили представлены в безразмерном виде. Масштабом скорости является величина, пропорциональная динамической скорости: $v_d = 2,5U_*$. Масштабом высоты — величина $\lambda = 0,4U_* / f$, где f — параметр Кориолиса, численно равный $2\pi \sin(\pi \cdot \text{LAT} / 180) / 43200$. Масштабом коэффициента вертикальной диффузии — величина $K_d = 0,4\lambda U_*$. Масштабом удельной

энергии турбулентности выступает величина $b_d = 4,54U_*^2$. Таблицы перечисленных величин (функции безразмерной высоты), взятые из [13], приведены также в [1, 2].

Вертикальные зависимости скорости ветра и угла разворота ветра восстанавливаются на основе тех же таблиц [12, 13]:

$$\begin{cases} V(z) = v_d \tilde{v}\left(\frac{z}{\lambda}\right), \\ \theta(z) = \tilde{\theta}\left(\frac{z}{\lambda}\right). \end{cases} \quad (2.25)$$

где \tilde{v} и $\tilde{\theta}$ — значения безразмерной скорости и угла поворота как функций от безразмерной высоты z/λ . Данные по \tilde{v} и $\tilde{\theta}$ приведены в [1, 2].

Следует иметь в виду, что такое восстановление на основе статистических данных корректно лишь в случае баротропной атмосферы.

Коэффициенты вертикальной турбулентной диффузии рассчитываются на основании работы [13]:

$$K_z(z) = K_d \tilde{K}_z\left(\frac{z}{\lambda}\right). \quad (2.26)$$

Здесь \tilde{K}_z — безразмерный коэффициент вертикального турбулентного обмена, функция безразмерной высоты. Данные по нему приведены в таблицах [1, 2], где представлены типовые безразмерные высотные профили коэффициента вертикальной диффузии для разных классов устойчивости для теплого и холодного времени года.

Для определения горизонтального коэффициента турбулентной диффузии используются законы подобия ПСА, результаты статистической теории турбулентной диффузии [18], а также эмпирические данные и параметризации.

Пусть σ_v есть среднеквадратичная дисперсия флуктуаций горизонтальной скорости. Тогда среднеквадратичное смещение частиц в турбулентном потоке (или размер «среднего факела») σ_y согласно [18] может быть выражено формулой:

$$\sigma_y = \frac{\sigma_v t}{\sqrt{1 + \frac{1}{2\tau_L}}}. \quad (2.27)$$

Здесь t — время диффузии, а τ_L — лагранжев временной корреляционный масштаб турбулентных пульсаций. Горизонтальный коэффициент диффузии определяется из обычного соотношения.

$$K_y = \frac{1}{2} \frac{d\sigma_y^2}{dt} = \sigma_v^2 \frac{t \left(1 + \frac{t}{4\tau_L}\right)}{\left(1 + \frac{t}{2\tau_L}\right)^2}. \quad (2.28)$$

Для определения величины σ_v используются следующие параметризации, взятые из [15]. Для устойчивых условий:

$$\sigma_v = 2U_* \left(1 - 0,9 \frac{z}{H_m} \right)^{\frac{3}{8}}, \text{ при условии, что } z \leq \frac{4}{5} H_m. \quad (2.29)$$

Для неустойчивых условий:

$$\sigma_v = U_* \left[2 - \frac{z}{H_m} + 0,31 \left(-\frac{H_m}{0,4L} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{1}{2}}. \quad (2.30)$$

Для нейтральных условий:

$$\sigma_v = 2,5U_* \left(1 + 10 \frac{z}{H_m} \right)^{-\frac{1}{4}}. \quad (2.31)$$

Временной масштаб корреляций может быть найден из соотношения [18]:

$$\tau_L = \frac{\sigma_v^2}{c_2 \varepsilon}. \quad (2.32)$$

Здесь ε — скорость диссипации турбулентной энергии, c_2 — константа (в коде используется значение 0,6). Скорость диссипации ε , в свою очередь, определяется на основе параметризаций, взятых из [15, 18, 19].

Для устойчивой стратификации:

$$\varepsilon = \frac{U_*^3}{0,4z} \left(1 + 4,7 \frac{z}{L} \right) \left(1 - 0,85 \frac{z}{H_m} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (2.33)$$

Для неустойчивой стратификации:

$$\varepsilon = \frac{U_*^3}{0,4z} \left[\left(1 - \frac{z}{H_m} \right)^2 + 0,75 \left(\frac{z}{L} \right)^{\frac{2}{3}} \right]^{\frac{3}{2}}. \quad (2.34)$$

Для нейтральной стратификации:

$$\varepsilon = \frac{U_*^3}{0,4z}. \quad (2.35)$$

Приведенные формулы показывают, что на малых временах диффузии $t \ll \tau_L$ горизонтальный коэффициент диффузии K_y растет линейно со временем, а при $t \gg \tau_L$ выходит на константу, равную $\sigma_v^2 \tau_L$ на заданной высоте.

2.3.4. Дополнительная входная информация

Для оценки начального подъема примеси над источником с ненулевым начальным импульсом и плавучестью пользователь должен предварительно оценить эффективную высоту подъема на основе любой из известных методик.

Для этого могут использоваться заложенные в код формулы Бриггса. Для оценки высоты используются введенные данные о размере источника, скорости и температуре выходящих газов, температуре окружающего воздуха и устойчивости атмосферы.

Параметр шероховатости определяется в зависимости от вида ландшафта. Для расчетов переноса на десятки километров используется «мезошероховатость» (в отличие от микрошероховатости, используемой при рассмотрении дисперсии примеси на небольшие расстояния). Зависимость шероховатости от вида ландшафта берется на основе работ [18, 20, 15]. В таблице 2.6 приведена классификация поверхностей, взятая из работы [20].

Параметр шероховатости может быть введен непосредственно, либо выбран из таблицы.

Таблица 2.6. Классификация мезошероховатости поверхностей [20]

Тип поверхности	z ₀ , м	
	лето	зима
Водная поверхность	0,01	0,01
Открытое поле	0,17	0,04
Лес	0,75	0,75
Сельская застройка	0,4	0,4
Городская территория	1,0	1,0
Центр крупного города	4,0	4,0

2.4. Информация об источнике

Необходимая информация об источнике содержит следующие данные:

- высота источника;
- размеры источника по горизонтали и вертикали;
- нуклидный состав выброса, включая разбиение на группы по свойствам осаждения;
- полная выброшенная активность по каждому нуклиду;
- длительность выброса;
- время начала выброса;
- параметры осаждения (скорость сухого осаждения, скорость гравитационного оседания, скорость вымывания осадками) для каждого нуклида.

Все перечисленные параметры могут произвольным образом меняться со временем. Для того, чтобы учесть временную зависимость этих параметров, время работы источника в коде РОМ делится на произвольное количество временных интервалов или фаз (временных ступенек) таким образом, чтобы внутри каждой такой фазы все параметры были постоянны (и менялись скачком при переходе к следующей фазе).

Таким образом, каждая фаза характеризуется своим временным интервалом, в течение которого она действует, высотой выброса, интенсивностью выброса, набором групп по свойствам осаждения, нуклидным составом. Как уже отмечалось выше, временные интервалы фаз могут перекрываться друг с другом или следовать друг за другом с разрывами.

Источник в коде РОМ может содержать произвольное количество временных фаз. В учебной версии, однако, количество фаз ограничено 24 для всех режимов, кроме режима нормальной эксплуатации.

Источник в коде РОМ может быть точечным, объемным или площадным. Объемный источник имеет форму цилиндра, пользователь задает его радиус и высоту. Площадной источник имеет форму круга с задаваемым радиусом. Нулевые размеры соответствуют точечному источнику.

В каждой фазе источника имеется свой набор групп, которые характеризуются параметрами осаждения: скорость гравитационного и сухого осаждения, интенсивностью вымывания осадками (см. подраздел 0). Каждая группа в свою очередь характеризуется списком нуклидов и суммарной активностью каждого из них.

Ввод данных о составе источника может осуществляться несколькими способами:

- Непосредственный ввод данных с помощью ГПИ.
- Считывание из текстового файла «*.sf» в специальном формате (SOURCEFILE).
- Описание формата SOURCEFILE содержится в разделе 3 данного пособия.

В первом случае пользователь может ввести несколько групп пробных частиц, различающихся свойствами осаждения и вымывания. Таким образом, учитывается полидисперсность выброса. Как правило, в расчетах используется четыре группы с различными свойствами осаждения (см. таблицу 2.1 подпункта 0).

Считывание из файла «*.sf» используется при расчете среднегодовых параметров радиационной обстановки при расчете последствий выбросов в режиме нормальной эксплуатации. Подробнее об этом — в разделе 3.

2.5. Особенности методики оценки радиационной обстановки при кратковременных выбросах с выбором максимально неблагоприятных условий

Данная возможность кода РОМ используется, когда существует неопределенность в моменте выброса и атмосферных условиях распространения, ввиду чего необходимо использовать консервативные предположения. Ставится задача — определить наилучшие параметры радиационной обстановки в условиях этой неопределенности.

В случае кратковременного выброса консервативным следует считать предположение о постоянстве всех атмосферных параметров распространения в течение всего времени выброса. Выброс длительностью до 3 часов можно считать кратковременным.

Предполагается, что параметры радиационной обстановки в каждой точке радиоактивного следа соответствуют наиболее неблагоприятным для этой точки атмосферным условиям. Чтобы рассчитать параметры в наиболее неблагоприятных условиях, необходимо провести серию расчетов со всеми возможными условиями и выбрать наиболее консервативный результат. Вопрос состоит в том, какие условия (метеорологические и характеристики источника) необходимо варьировать в такой серии расчетов.

Из метеорологических параметров таким является, например, категория устойчивости атмосферы. В случае высотного источника для точек, лежащих на разных расстояниях от источника, наиболее неблагоприятные параметры радиационной обстановки могут реализоваться при разных значениях категории устойчивости.

В гауссовых моделях зависимость фактора разбавления от скорости ветра монотонная, поэтому наилучшие условия реализуются при минимально возможной скорости ветра. В лагранжевой модели кода РОМ это, вообще говоря, не так. Это связано с тем, что в этом случае учитывается структура пограничного слоя атмосферы — зависимость коэффициентов турбулентной диффузии от высоты и скорости ветра. Немонотонность зависимости радиационных параметров от скорости ветра проявляется при скоростях ветра в диапазоне $0 \div 2$ м/с. Поэтому скорость ветра (в указанном диапазоне) является варьируемым параметром для поиска наиболее неблагоприятных условий.

Шероховатость отнесена к заранее не известным варьируемым параметрам на том основании, что ее величина может существенно меняться в зависимости от наличия или отсутствия снежного покрова, а точность ее определения невелика (разброс может составлять порядок величины). В то же время зависимость от нее параметров радиационной обстановки в разных точках является немонотонной (как и зависимость от класса устойчивости).

Что касается высоты выброса, то зависимость радиационной обстановки от нее является монотонной при фиксированном классе устойчивости. Наихудшим условиям для всех точек соответствует минимально возможная высота — данный параметр является характеристикой источника выброса и варьированию не подлежит.

Перечисленные параметры (скорость ветра на высоте флюгера, класс стабильности, шероховатость подстилающей поверхности) должны варьироваться для получения консервативного результата при наихудших условиях. Для каждого параметра задается список возможных значений. В итоге, для каждых возможных сочетаний скорости ветра, класса устойчивости и шероховатости производится расчет радиационной обстановки. Серия расчетов производится в автоматическом режиме, без участия пользователя. Она состоит из количества разных сочетаний атмосферных параметров — $N_V N_S N_{Z0}$ расчетов, где N_V — количество возможных значений скорости ветра, N_S — количество возможных значений класса стабильности, N_{Z0} — количество возможных значений шероховатости подстилающей поверхности.

Для каждой точки расчетной сетки выбирается максимальное значение заданного параметра радиационной обстановки в этой точке, полученное в серии расчетов. Это наибольшее значение и есть консервативная оценка параметра радиационной обстановки в максимально неблагоприятных условиях для кратковременного выброса.

2.6. Особенности методики оценки радиационной обстановки при продолжительных выбросах с использованием метеорологической информации временных рядов ВМО

Как уже отмечалось, в расчетах радиационной обстановки при выбросах радиоактивных веществ в атмосферу для обоснования безопасности ОИЯЭ требуется принимать консервативные предположения относительно метеорологической ситуации.

Для кратковременного выброса можно консервативно считать, что направление ветра не изменяется в течение всего времени выброса, а остальные параметры метеорологической обстановки подобрать для каждой точки из консервативных соображений. Соответствующая методика описана в предыдущем подразделе. Для продолжительного выброса (продолжительность в сутки и более) эта методика не годится, поскольку вероятность того, что направление ветра останется неизменным в течение длительного времени (несколько суток), практически равна нулю, и использование такого предположения заведомо приведет к завышению расчетных параметров радиационной обстановки. Наиболее последовательный и обоснованный способ задания исходной метеорологической информации при моделировании продолжительных выбросов — это использование реальных данных из метеорологических временных рядов ВМО за последние годы. Это позволяет учесть реальную изменчивость метеорологических характеристик на протяжении времени выброса, причем без использования каких-либо усреднений и упрощений.

Методика использования реальных погодных данных заключается в следующем. Проводится серия расчетов радиационной обстановки вокруг заданного объекта. При этом в качестве метеорологических исходных условий используются реальные данные временных рядов (архивы ВМО) для района размещения этого объекта за прошедший период (последние несколько лет) с реальной последовательностью изменения погодных условий. Эти данные записаны с интервалом 3 часа. Внутри каждого 3-часового интервала погодные условия считаются неизменными. Характеристики источника (продолжительность, нуклидный состав выброса, его зависимость от времени) для всех расчетов серии одни и те же. Отдельные расчеты в серии расчетов отличаются

друг от друга только одним параметром — временем начала выброса: начало выброса последующего расчета смещается относительно предыдущего на период, равный периоду записи данных на метеостанциях, то есть 3 часа. Общее количество таких расчетов в серии равно количеству смещений времени начала выброса и не превосходит длину используемого временного ряда. Так, если длина ряда — 1 год, то количество расчетов не превосходит $365 \cdot 8 = 2920$. В каждом расчете рассчитывается радиационная обстановка в каждой точке расчетной области, возникающая к моменту окончания аварийного выброса. Из всех полученных таким образом значений какого-либо параметра радиационной обстановки (общее количество значений равно количеству расчетов в серии) для каждой точки выбирается наибольшее. Эта величина и есть консервативная оценка данного параметра на основе реалистичных метеорологических данных.

Описанная методика обеспечивает учет реальной изменчивости метеорологических условий, определяющих атмосферное рассеивание выброса в течение времени действия источника. Таким образом, перебираются все погодные состояния, имевшие место по результатам измерений в течение длительного периода (равному длине временного ряда — несколько лет) с учетом сезонного и суточного хода метеоусловий для выбранного района. При этом автоматически учитываются все корреляции между изменениями различных метеорологических параметров (направление, сила ветра, устойчивость атмосферы, осадки) и их корреляции с изменениями параметров выброса (предполагается, что характеристики выброса не постоянны, а меняются со временем).

Подобное использование реальных метеорологических данных становится мировой тенденцией и начинает широко применяться в расчетной практике обоснования безопасности АЭС. Так, описанная методика успешно использована для оценки последствий аварийных радиационных атмосферных выбросов планируемой новой литовской АЭС Visaginas в рамках работ по обоснованию ее безопасности, выполнявшихся консорциумом Consortium Pöyry — LEI (Pöyry Energy Oy (Finland) и Lithuanian Energy Institute (Lithuania)). В качестве вычислительного ядра использовался финский программный комплекс SILAM (Finnish Meteorological Institute (FMI)). В качестве реальных погодных условий брались данные временных рядов для района размещения станции за 2001 и 2002 гг. (источник данных — Centre for Medium Range Weather Forecasts (ECMWF) Operational Data Archives). Рассматривался аварийный выброс АЭС длительностью 30 суток.

В этих работах проводилась большая серия расчетов, и меры для сокращения объема вычислений не принимались.

2.7. Особенности методики расчета радиационной обстановки в условиях нормальной эксплуатации

Для оценки радиационных последствий выбросов в условиях нормальной эксплуатации считаются последствия годового равномерного выброса. Радиационные последствия должны рассчитываться вокруг объекта с учетом статистического распределения метеопараметров вблизи станции. Причем необходимо использовать многолетнюю статистику. При расчете в коде РОМ все многообразие метеопараметров разделяется на дискретное количество различных сочетаний: N_v различных значений компонент скорости ветра; N_ϕ различных направлений ветра; 7 классов устойчивости. Пусть V_i — дискретные значения скорости ветра, $i = [1; N_v]$; ϕ_j — дискретные значения направления ветра, $j = [1; N_\phi = 16]$; $p_k = \{A, B, C, D, E, F, G\}$, $k = [1; N_s = 7]$ — возможные классы устойчивости атмосферы. Количество возможных значений скорости ветра может быть различной и зависит от поставляемых данных. Напротив, количество направлений ветра и классов стабильности — фиксированные величины. Для каждой тройки индексов (i, j, k) должна быть известна вероятность наблюдения такого сочетания $P(i, j, k)$, полученная на основе многолетних наблюдений. Тогда часть годового выброса каждого радионуклида $r A_r(i, j, k)$, которая в среднем выбрасывается в период времени, в который наблюдается сочетание метеопараметров

(i, j, k) , будет равна $P(i, j, k)A_r(i, j, k)$. Кроме того, для моделирования необходимо знать среднюю интенсивность осадков в период наблюдения каждого сочетания метеопараметров (i, j, k) . Иногда известна лишь среднегодовая интенсивность выброса, то есть одинаковая для всех сочетаний метеопараметров.

При таком подходе каждое сочетание метеопараметров рассчитывается независимо одно от другого, то есть отсутствует корреляция между различными условиями атмосферного переноса. Это принципиальное ограничение применяемой в коде РОМ методики по оценке радиационной обстановки в условиях постоянного годового выброса.

Полученную таким образом последовательность фаз источника можно назвать квази-сценарием, так как он не отражает реальной временной картины выброса.

Суммарное количество градаций метеопараметров равно $N_v N_\phi N_S = 16 \times 7 \times N_v = 112 N_v$. Для моделирования рассматривается такое же количество фаз метеопараметров и фаз источника. Длительность как фаз источника, так и фаз метеопараметров выбирается произвольно. Длительность фаз связана с общим временем счета. Это, как правило, время ухода облака примеси за расчетную область. В большинстве случаев достаточная длительность каждой градации равна 3 часам.

2.8. Дозиметрические модели

Код РОМ предназначен как для оперативного прогнозирования радиационной обстановки на ранней стадии аварии, так и для работ по обоснованию безопасности ОИАЭ. Поэтому он ориентирован на расчет доз облучения, которые могут быть получены людьми как непосредственно в процессе воздействия радиоактивного облака, так и в течение длительного периода после аварии, а также от постоянно действующего источника при нормальной эксплуатации. Для обеспечения расчета облучения на длительных временных интервалах в код РОМ была введена модель облучения по пищевым цепочкам.

Код РОМ может рассчитывать концентрации, временные интегралы концентраций и плотности выпадений радионуклидов на поверхность отдельно по каждому нуклиду, либо для всех нуклидов в выбросе.

Рассчитываются эффективные дозы и эквивалентные дозы внутреннего и внешнего облучения на разные органы по разным путям: дозы внутреннего облучения от вдыхания загрязненного воздуха, от потребления загрязненной радионуклидами пищи, мощности доз и дозы внешнего облучения от погружения в радиоактивное облако, а также от нахождения на загрязненной поверхности. Эквивалентные дозы облучения рассчитываются для каждого из ряда органов тела человека (гонады, красный костный мозг, легкие, щитовидная железа, толстый кишечник, кожа). Может быть оценен вклад в эквивалентную и эффективную дозы от каждого нуклида по отдельности. Дозы внешнего облучения, рассчитываемые кодом РОМ (кроме доз, рассчитанных по уточненной модели, описываемой ниже), включают вклад гамма-излучения, бета-излучения и тормозного излучения от бета-частиц. Уточненная модель облучения от облака учитывает только гамма-излучение. Дозы внутреннего облучения рассчитываются для нескольких возрастных групп (0—1 год, 0—2 года, 2—7 лет, 7—12 лет, 12—17 лет, взрослые).

Дозиметрические модели, используемые в коде РОМ, пригодны для оценки только сравнительно малых доз облучения, вызывающих только стохастические эффекты и не приводящих к детерминированным эффектам.

При вычислении объемной и поверхностной плотностей активности и доз облучения учитывается радиоактивный распад радионуклидов. При этом принимаются в расчет цепочки радиоактивного распада, то есть учитывается появление и распад дочерних радионуклидов.

2.8.1. Расчеты дозы от радиоактивного облака

Мощность эквивалентной (или эффективной) дозы внешнего облучения от облака определяется формулой:

$$\dot{D}_c^{r,j}(x, y, t) = C^r(x, y, t)R_c^{r,j}. \quad (2.36)$$

Здесь $D_c^{r,j}$ — мощность эквивалентной (или эффективной) дозы на орган j от радионуклида r за счет внешнего облучения от облака в точке x, y , Зв/с; C^r — объемная плотность активности радионуклида r в точке (x, y) в момент времени t , Бк/м³; $R_c^{r,j}$ — коэффициент дозового преобразования для внешнего облучения от облака на орган j от радионуклида r , Зв·м³/Бк·с. В формуле (2.36) под C^r понимается концентрация, рассчитанная по формуле (2.13), то есть учитывающая изменение концентрации за счет цепочек распада. Для вычисления интегральной дозы соотношение (2.36) интегрируется по времени с шагом, равным шагу расчета движения пробных облаков.

2.8.2. Расчет дозы от загрязненной поверхности

Мощность эквивалентной (или эффективной) дозы внешнего облучения от загрязненной поверхности определяется формулой:

$$\dot{D}_s^{r,j}(x, y, t) = E^r(x, y, t)R_s^{r,j}. \quad (2.37)$$

Здесь $\dot{D}_s^{r,j}$ — мощность эквивалентной (или эффективной) дозы на орган j от радионуклида r за счет внешнего облучения от загрязненной поверхности в точке (x, y) в момент времени t , Зв/с; $E^r(x, y, t)$ — поверхностная плотность выпадения радионуклида r в точке (x, y) в момент времени t , Бк/м²; $R_s^{r,j}$ — коэффициент дозового преобразования для облучения от загрязненной поверхности на орган j от радионуклида r , Зв·м²/Бк·с. В формуле (2.37) под E^r понимается поверхностная плотность активности, вычисленная по формуле (2.14), то есть учитывающая изменение плотности за счет цепочек распада. Интегральная доза рассчитывается путем интегрирования соотношения (2.37) по времени с шагом, равным шагу расчета движения пробных облаков.

2.8.3. Расчет ингаляционной дозы

Доза внутреннего облучения за счет ингаляции вычисляется по формуле

$$D_i^{r,j,a}(x, y, t) = U^a R_i^{r,j,a} \int_0^t C^r(x, y, t) dt \quad (2.38)$$

Здесь $D_i^{r,j,a}$ — ожидаемая пожизненная доза внутреннего облучения на орган j от радионуклида r для лиц возрастной группы a за счет вдыхания загрязненного радионуклидом r воздухом, Зв. $R_i^{r,j,a}$ — коэффициент дозового преобразования для внутреннего облучения от ингаляции на орган j от радионуклида r для лиц возрастной группы a , Зв/Бк; U^a — скорость дыхания лицами возрастной категории a , м³/с. Интегрирование производится за все время прохождения облака с шагом, равным шагу расчета движения пробных облаков.

2.8.4. Уточненная дозиметрическая модель внешнего облучения от облака

ПС РОМ содержит две дозиметрических модели для вычисления дозы внешнего облучения от загрязненного воздуха. По первой модели определяется фактически доза от однородного облака бесконечной протяженности с заданной плотностью активности. Вклад в дозу от данного нуклида получается как произведение плотности активности на коэффициент дозового преобразования. Эта простая модель используется, когда размеры радиоактивного облака достаточно велики. Однако она становится некорректна, когда характерный масштаб изменения плотности активности сопоставим или меньше характерной длины пробега гамма-квантов в воздухе. В этих случаях возможно применение другой дозиметрической модели, позволяющей корректно рассчитывать дозу облучения от облака произвольной формы и размеров.

В этой модели мощность дозы рассчитывается как сумма мощностей доз от всех пробных точек, составляющих облако, так же, как в [21]. Рассчитываются только дозы гамма-излучения, бета излучение не учитывается. Каждое пробное облако радиоактивного шлейфа рассматривается как точечный источник с известной активностью и нуклидным составом.

Мощность эффективной дозы в некоторой точке от радионуклида r , находящейся в центре i -го облака, дается выражением [21, 22].

$$\begin{cases} \dot{D}_i^r &= k A_i^r \frac{\sum E_l^r \mu_{E_l,d} g_l^r B(R_i) \exp(-\mu_{E_l}) K(E_l^r)}{4\pi r R_i^2}, \\ B(R_i) &= 1 + R_i \frac{\mu_{E_l} (\mu_{E_l} - \mu_{E_l,d})}{\mu_{E_l,d}}. \end{cases} \quad (2.39)$$

Здесь:

- \dot{D}_i^r — мощность дозы от радионуклида r , находящегося в облаке i , Зв/с.
- A_i^r — активность нуклида r в i -м облаке, Бк.
- $K(E)$ — коэффициент пропорциональности между экспозиционной дозой в воздухе и эффективной дозой для гамма-излучения при той же плотности потока моноэнергетических фотонов с энергией E .
- E_l^r — энергия l -й линии гамма-спектра нуклида r , МэВ.
- g_l^r — квантовый выход кванта l -й линии гамма-спектра нуклида r .
- $\mu_{E_l,d}$ — коэффициент поглощения гамма-квантов в воздухе для энергии E_l , м^{-1} .
- μ_{E_l} — коэффициент ослабления гамма-излучения в воздухе для энергии E_l , м^{-1} .
- ρ — плотность воздуха, $\text{кг}/\text{м}^3$.
- $B(R_i)$ — фактор накопления излучения.
- R_i — расстояние между точкой наблюдения и источником (центром i -го облака), м.
- k — постоянная, равная $5,6 \cdot 10^{11}$ Бк·с·Дж/МэВ.

Суммирование проводится по l , то есть по всем энергиям в спектре нуклида r . Для получения полной мощности дозы необходимо просуммировать вклады, определяемые формулой (2.39) по всем нуклидам r в данном облаке и по всем облакам i .

Для того, чтобы в процессе счета избежать вычисления таких громоздких выражений с суммированием по энергетическому спектру излучения каждого нуклида, мощности дозы от точечного источника как функции от расстояния до точки измерения для всех нуклидов рассчитаны заранее и введены в базу данных, отдельную от кода. Поэтому для вычисления мощности дозы

от любой пробной точки необходимо лишь произвести интерполяцию между табличными значениями. Однако для более точной интерполяции выражение справа в первой формуле системы (2.39) линеаризуется путем умножения на R_i^2 и интерполируется выражение $\dot{D}_i^r R_i^2$, после чего полученное значение делится на квадрат расстояния, для которого требуется вычислить мощность дозы.

Применение этого метода встречает известную трудность, заключающуюся в том, что какая-либо пробная точка может случайно оказаться слишком близко (ближе среднего расстояния между точками) к точке измерения. В силу обратной квадратичной зависимости мощности от расстояния это приведет к нефизичному скачку мощности дозы в данной точке измерения. Чтобы избежать этого, при подсчете дозы учитываются вклады только тех точечных источников, которые лежат вне сферы некоторого радиуса R вокруг точки наблюдения. К полученной таким образом дозе прибавляется доза в центре сферического облака радиуса R с однородной плотностью активности, равной плотности в точке измерения. Благодаря этому приему получают гладкие результаты, в предельных случаях переходящие в значения для бесконечного однородного облака и для точечного источника.

2.8.5. Дозиметрическая модель расчета облучения по пищевым цепочкам

Облучение населения за счет потребления продуктов питания, выращенных на загрязненной территории, может давать существенный вклад в общую дозу на поздней стадии аварии, если в аварийном выбросе присутствует в заметном количестве аэрозольная составляющая.

В этом пункте дается описание модели и расчетных соотношений для оценки доз облучения по пищевым цепочкам, принятой в коде РОМ.

В коде РОМ используется простейшая модель, основанная на одной из принятых в России методик расчета доз облучения по пищевым цепочкам — на методике, изложенной в [23, 24]. Эта методика относится к простым моделям коэффициентов концентрирования и требует сравнительно небольшого количества эмпирических коэффициентов. При расчете облучения по пищевому пути вторичный ветровой подъем выпавшей активности и его влияние на облучение в последующие после выброса годы не учитывается.

Первичными исходными данными для оценки дозы за счет перорального поступления активности являются плотности выпадений по каждому радионуклиду, рассчитываемые кодом РОМ в каждом узле расчетной сетки. Плотность выпадений представляется в виде суммы двух частей: плотность выпадений за счет сухого осаждения аэрозольных частиц E_d^r (Бк/м²) и плотность выпадений за счет вымывания осадками E_w^r (Бк/м²). Полная плотность выпадений равна сумме этих частей: $E_d^r + E_w^r$.

Концентрация радионуклида r в продукте питания n (Бк/кг или Бк/л), полученного на загрязненной территории сразу после выпадения активности облака, рассчитывается по соотношению:

$$C_n^r = (E_d^r + 0,2E_w^r) K_{stalk}^r + (E_d^r + E_w^r) K_{root}^r \quad (2.40)$$

Здесь K_{stalk}^r и K_{root}^r нормированные на продуктивность коэффициенты накопления «выпадения из атмосферы — содержание в продуктах питания» по стеблевому и корневому пути соответственно (м²/кг, м²/л).

Ожидаемая пожизненная доза, получаемая вследствие потребления загрязненных продуктов питания в течение одного года, рассчитывается по соотношению:

$$H_n^{r,j,a} = R_f^{r,j,a} U_n^a C_n^r. \quad (2.41)$$

Здесь $H_n^{r,j,a}$ — эквивалентная доза на орган j (либо эффективная доза), от радионуклида r , от потребления продукта питания n , для лиц возрастной группы a (Зв). $R_f^{r,j,a}$ — коэффициент дозового преобразования «поступление — доза» для радионуклида r на орган j (Зв/Бк) для возрастной группы a . U_n^a — годовое потребление продукта n лицами возрастной группы a (кг, л). Окончательная доза получается сложением соотношений (2.41) по всем продуктам питания нуклидам.

Следует иметь в виду, что в модели, реализованной в коде РОМ, учитывается период вегетации (созревания), период, в который можно производить сбор урожая, а также период, когда сельскохозяйственные работы не производятся. Доза облучения существенно зависит от сезона, в который произошел выброс. Та часть осадений, которая выпала до начала периода вегетации, дает вклад в поступление радионуклидов лишь по корневому пути поступления. Данное обстоятельство может снизить дозу на порядки величин и сделать модельную оценку более реалистичной в случае весеннего или осеннего выброса (а также зимнего). Значения плотности выпадений радионуклидов в формуле (2.41) считаются на момент сбора урожая. Момент сбора урожая, в свою очередь, определяется из консервативных, но реалистичных соображений. Например, период сбора урожая может быть от 1 июля по 30 сентября (задается для каждого типа продуктов питания по отдельности). Для каждой конкретной аварии в качестве момента сбора урожая принимается ближайшая к моменту окончания выброса дата из диапазона, когда вообще возможен сбор урожая. Таким образом, если выброс производится в холодное время года, то, во-первых, может учитываться только корневой путь поступления радионуклидов в продукты питания, а во-вторых, выпадения считаются на момент ближайшего сбора, то есть примерно через полгода, что, как правило, тоже уменьшает дозу, так как активность нуклидов за прошедшие полгода будет меньше за счет процесса самораспада. Консервативным остается предположение о том, что население потребляет продукты питания, выращенные только на загрязненной территории.

При постоянных выбросах, то есть в условиях нормальной эксплуатации, применяется такой же подход, однако не вводится поправка на сезон, описанная выше. Под E_d^r и E_w^r понимаются среднегодовые выпадения (через год после начала выброса), и используются другие коэффициенты накопления [25, 26].

Что касается аварийных выбросов, то методика расчета доз от перорального поступления остается прежней и в случае серийного счета, и в случае многовариантного расчета.

2.8.6. Расчет доз внутреннего облучения от трития и углерода

Для оценки доз, связанных с выбросами трития (^3H) и углерода (^{14}C) в коде РОМ используются модели, основанные на консервативном подходе и описанные в РБ-106-15 [24]. Согласно этим методикам, среднегодовая доза облучения за счет поступления трития ингаляционно, перорально и через кожные покровы, рассчитывается по формуле:

$$D_T^i = \frac{d_T^i}{H \cdot 3,15 \cdot 10^7} \int_0^{365 \text{ дней}} C^T(t) dt \quad (2.42)$$

Здесь D_T^i — доза в рассматриваемой точке за счет поступления трития в организм (Зв); C^T — объемная активность трития в зависимости от времени (Бк/м³); d_T^i — коэффициент дозового преобразования для трития (Зв·л/Бк/год); H — среднегодовая абсолютная влажность воздуха (л/м³). Интегрирование в формуле (2.42) производится за один год. Величину дозового коэффициента в РБ-106-15 рекомендуется принять равной $2,6 \cdot 10^{-8}$ в приведенных единицах измерения. При этом H должно измеряться в л/м³ (количество литров воды, полученной при конденсации всего пара в 1 м³ воздуха). Характерные значения H при разных температурах воздуха и 100% относительной влажности даны в таблице 2.7.

Таблица 2.7. Абсолютная влажность воздуха H (л/м³) при разных значениях температуры (при 100% относительной влажности)

Температура окружающей среды, °С	Абсолютная влажность воздуха, л/м ³
-40	$1,76 \cdot 10^{-4}$
-30	$4,54 \cdot 10^{-4}$
-20	$1,07 \cdot 10^{-3}$
-10	$2,36 \cdot 10^{-3}$
0	$4,85 \cdot 10^{-3}$
10	$9,78 \cdot 10^{-3}$
20	$1,73 \cdot 10^{-2}$
30	$3,03 \cdot 10^{-2}$
40	$5,11 \cdot 10^{-2}$

Для получения абсолютной влажности при другой относительной влажности необходимо приведенное в таблице 2.7 значение умножить на относительную влажность.

Аналогично может быть вычислена доза от углерода, поступающего в организм человека пероральным путем. Согласно РБ-106-15 (22) эта доза определяется следующим образом:

$$D_C^i = \frac{d_C^i}{\gamma \cdot 3,15 \cdot 10^7} \int_0^{365 \text{ дней}} C^C(t) dt \quad (2.43)$$

Здесь D_C^i — доза в рассматриваемой точке за счет поступления углерода в организм (Зв), C^C — концентрация углерода в зависимости от времени (Бк), d_C^i — коэффициент дозового преобразования для углерода (Зв·г/Бк/год), γ — параметр, который рекомендуется принять равным $0,18 \cdot \text{г/м}^3$. Величину дозового коэффициента рекомендуется в случае отсутствия экспериментальных данных принять равной $5,6 \cdot 10^{-5}$ (Зв·г/Бк/год). Принимая во внимание рекомендованное значение параметра, получаем эффективное значение коэффициента дозового преобразования для углерода:

$$\tilde{d}_C^i = \frac{d_C^i}{\gamma} = 9,0 \cdot 10^{-12} \frac{\text{Зв} \cdot \text{м}^3}{\text{Бк} \cdot \text{с}}$$

Тогда, годовая доза будет равна:

$$D_C^i = \tilde{d}_C^i \int_0^{365 \text{ дней}} C^C(t) dt. \quad (2.44)$$

2.8.7. Данные по дозовым коэффициентам

Данные по свойствам радионуклидов содержатся в отдельной от кода базе данных, которая включает информацию о периодах полураспада и о взаимных превращениях, а также о коэффициентах дозового преобразования для разных путей облучения. В базе данных имеются данные

для 118 радионуклидов, значимых с точки зрения дозообразования и имеющих в заметных количествах в активной зоне реакторов. Перечень нуклидов можно посмотреть, например, в файле «database/list_nuclids.ctg» базы данных кода РОМ.

Источником данных по коэффициентам дозового преобразования являются публикации [23—31].

2.9. Модель для оценки скорости гравитационного осаждения аэрозолей продуктов горения натрия

Для учета специфических особенностей реакторов на быстрых нейтронах, разрабатываемых в рамках проектного направления ПРОРЫВ, в код РОМ в качестве отдельного программного блока включен блок для оценки параметров аэрозолей горения натрия (СОНА). Появление таких аэрозолей, которые помимо радиоактивности, представляют еще и токсикологическую опасность, возможно в аварийных режимах работы РУ типа БН при проливах и горении натрия контуров охлаждения. Внедрение модуля позволяет расширить область применения кода РОМ для анализа безопасности реакторов типа БН.

Программный модуль СОНА предназначен для оценки скорости осаждения аэрозолей продуктов горения натрия (гидроскида NaOH и карбоната Na_2CO_3) с учетом взаимодействия гигроскопичных частиц соединений натрия с атмосферным водяным паром и роста их размеров из-за поглощения воды. В качестве входных данных должны быть введены исходный размер «сухих» аэрозольных частиц (Na_2O или NaOH) и относительная влажность воздуха. По этим данным модуль рассчитывает равновесный размер капелек с растворенными в них натриевыми соединениями, возникающих при поглощении исходной частицей водяного пара, и их плотность. На основании этих параметров рассчитывается скорость их гравитационного осаждения на поверхность и связанное с этим изменение концентрации в воздухе и на поверхности.

Программный модуль основывается на физической модели взаимодействия аэрозолей окислов натрия с водяным паром и углекислым газом атмосферы, разработанной специалистами ГНЦ РФ-ФЭИ [32]. Модель рассматривает процессы конденсации и испарения пара на каплях водного раствора гидроксида и карбоната натрия и рассчитывает их равновесные размеры, соответствующие равновесию этих процессов. На основании равновесных размеров и плотности этих частиц рассчитывается гравитационная скорость осаждения их на поверхность. Эта скорость используется кодом РОМ для расчета концентрации этих аэрозолей в воздухе и на поверхности.

В основу математической модели эволюции натриевых аэрозолей во влажной атмосфере положены результаты исследований, изложенные в отчетах ГНЦ РФ-ФЭИ [33—35], а также в работах [36, 37].

Давление насыщения водяного пара на поверхности капли раствора NaOH всегда меньше, чем давление насыщения на поверхности чистой воды. Это и приводит к конденсации пара на каплях раствора, даже если парциальное давление пара в атмосфере меньше насыщенного. Конденсация происходит до тех пор, пока давление пара на поверхности капли не сравняется с внешним давлением пара в воздухе. Этим определяется равновесный размер капель раствора во влажной атмосфере.

Расчет параметров осаждения аэрозолей продуктов горения натрия производится в два этапа. На первом, исходя из относительной влажности воздуха и зависимости давления насыщения над поверхностью капли от концентрации NaOH в ней, определяется равновесный размер капель и их плотность. На втором на основе этих данных по модифицированной формуле Стокса рассчитывается скорость осаждения капель. Методика расчета изложена в верификационном отчете кода РОМ [1].

3. ОПИСАНИЕ ГРАФИЧЕСКОГО ИНТЕРФЕЙСА ПОЛЬЗОВАТЕЛЯ И ИНСТРУКЦИЯ ПО РАБОТЕ С ПС

3.1. Входные данные

Входные данные включают географическую информацию, метеорологические данные и информацию об источнике выброса.

Географическая информация включает:

- Электронная географическая карта (в формате BMP или JPG).
- Географические координаты (градусы) углов прямоугольной (в географических координатах) области моделирования.
- Географические координаты источника.
- Размерность (число узлов) двумерной регулярной прямоугольной расчетной сетки, на которой производится представление результатов расчета.
- Дата и время начала аварии.

Метеорологические данные, необходимые для работы лагранжевой модели переноса, включают, вообще говоря, трехмерные поля компонент скорости ветра, горизонтального и вертикального коэффициентов диффузии и двумерное поле интенсивности осадков. В упрощенном варианте, при сравнительно небольшом размере расчетной области (30 км) принимается, что перечисленные параметры распределены однородно по горизонтальному направлению и зависят только от высоты. В этом случае метеорологические данные следующие:

- Вертикальный профиль скорости ветра.
- Вертикальный профиль горизонтального и вертикального коэффициентов диффузии.
- Интенсивность осадков.

Если вертикальные профили метеопараметров неизвестны, в коде РОМ предусмотрено восстановление этих профилей на основе одномерной модели пограничного слоя атмосферы (ПСА), в которой для восстановления приведенных выше величин требуется следующая исходная информация минимального объема:

- Скорость и направление ветра на высоте 10 м.
- Класс устойчивости атмосферы.
- Шероховатость подстилающей поверхности.
- Интенсивность осадков.

Если информации о категории устойчивости нет, то с помощью встроенного в интерфейс ПС функционала класс стабильности атмосферы может быть определен по нескольким методикам. Первая методика позволяет определить класс стабильности по синоптическим данным:

- Дата и астрономическое время.
- Широта станции.
- Балл облачности.
- Высота облаков.
- Флаг наличия снега.

- Дальность видимости.
- Скорость ветра на высоте флюгера (10 м).

Вторая методика позволяет определить класс стабильности по радиационному балансу. Для этого требуются следующие параметры:

- Время суток (день, ночь).
- Скорость ветра.
- Интенсивность излучения с поверхности земли (Дж/см²/ч).

Третья методика позволяет определить класс устойчивости по общему описанию.

Четвертая возможность позволяет определить класс стабильности по вертикальному градиенту температуры. Для этого требуются следующие параметры:

- Значения температуры на двух высотах.
- Высота источника.
- Скорость ветра в верхней точке измерения, в которой измерялась температура.

Входные данные для восстановления вертикальных полей скорости ветра и коэффициентов турбулентного обмена записываются во входные файлы кода РОМ, которые хранятся в каталоге «variants/». Файлы имеют текстовый формат и имеют расширение «*.GPR».

Заметим, что метеорологические параметры могут быть изменяющимися во времени, причем шаг изменения по времени может быть любым. Однако следует заметить, что количество шагов по времени, в которые происходят изменения параметров атмосферного переноса в учебной версии ограничено 64.

Что касается источника выброса необходимая для расчета исходная информация следующая:

- Эффективная (с учетом теплового подъема) высота выброса.
- Горизонтальный и вертикальный размер источника. Источник может быть задан точечным, площадным, или объемным (в форме цилиндра).
- Радионуклидный состав выброса, включая распределение по группам осаждения.
- Интенсивность выброса в зависимости от времени и длительность действия. В зависимости от времени может меняться и нуклидный состав выброса.
- Скорости гравитационного осаждения, сухого осаждения и вымывания осадками для аэрозольной составляющей выброса.

Ввод данных о составе источника может осуществляться двумя способами. Обычно используется первый способ — ручной ввод данных с помощью ГПИ РОМ. Второй способ заключается в загрузке данных из текстового файла специального формата (имеющего расширение «*.SF») — данная возможность используется в режиме расчета годового выброса в режиме нормальной эксплуатации.

В случае ввода с помощью ГПИ пользователь может ввести произвольное количество временных отрезков (или «ступенек») выброса (в учебной версии не более 24), каждый из которых характеризуется своим нуклидным составом, распределением нуклидов по группам осаждения (см. подраздел 0), высотой, выброшенной за время действия отрезка активностью каждого нуклида, временем начала и длительностью. Такие временные отрезки источника будет далее называть «фазами» источника. Количество фаз источника в учебной версии ограничено 16; в оригинальной версии это число не ограничено.

Таким образом, все данные об источнике — нуклидный состав, количество и состав групп по свойствам осаждения, параметры осаждения и вымывания, интенсивность выброса — могут быть заданы изменяющимися со временем произвольным образом.

Модель атмосферного переноса РОМ не учитывает эффектов плавучести. Если выброс сопровождается тепловыделением, конвективный тепловой подъем струи или облака может быть оценен с помощью отдельной модели, встроенной в код РОМ и основанной на формулах Бриггса. В этом случае пользователь должен ввести следующие данные:

- Скорость ветра на высоте флюгера.
- Температура воздуха в градусах.
- Класс устойчивости атмосферы.
- Шероховатость подстилающей поверхности.
- Высота и диаметр трубы.
- Скорость истечения загрязненного воздуха из трубы.
- Температура загрязненного воздуха, выходящего из трубы.

Возможность встроена в ГПИ кода РОМ. Однако оригинальная версия кода РОМ позволяет учитывать подъем струи в автоматическом режиме в режиме серийного и многовариантного счета. В учебной версии такая возможность отсутствует.

Код РОМ использует несколько типов файлов входных данных.

Файлы «*.GPR» — основной проектный входной файл. Это текстовый файл, содержащий исходную метеорологическую информацию, информацию об источнике, информацию о карте и расчетной области и проч. В этом файле записана информация, введенная пользователем с помощью ГПИ РОМ. Все файлы «*.GPR» содержатся в каталоге «VARIANT».

Файлы «*.BMP» или «*.JPG» — графические файлы с картами, на фоне которых визуализируются результаты расчетов. Графические карты расположены в каталоге «map/».

Файл «*.GEO» — текстовые файлы привязки углов графических электронных карт к реальным географическим координатам. Данные файлы содержатся в том же каталоге, что и графические файлы. Каждый файл «*.GEO» должен иметь такое же имя (за исключением расширения), что и соответствующий графический файл. Тогда в процессе визуализации и построения расчетной сетки реальные объекты, изображенные на карте, будут иметь реальные координаты.

Стоит отметить, что в учебной версии доступны только две карты: вокруг Белоярской АЭС (БН-1200) и в районе Северска Томской области (БРЕСТ-ОД-300).

3.2. Выходные данные

В каждый момент модельного времени код рассчитывает следующий набор параметров:

- Координаты центров всех пробных частиц («облаков»), их горизонтальные и вертикальные размеры.
- Объемные приземные концентрации для каждого радионуклида и их временные интегралы для каждого нуклида.
- Плотности выпадений для каждого нуклида и их временные интегралы.
- Мощности дозы и интегральные дозы облучения от каждого нуклида для каждого из учитываемых путей облучения (от облака, от загрязненной поверхности, от ингаляции, по пищевому пути) на каждый из органов.

Объемные и поверхностные концентрации, их временные интегралы, мощности дозы и интегральные дозы рассчитываются по двумерной декартовой расчетной сетке с постоянными шагами.

Двумерные поля для каждой функции визуализируются на фоне географической карты в виде закрашенной области, причем цвет закрашки в каждой точке однозначно определяется значением визуализируемого двумерного поля.

Кроме того в определенных точках на карте (так называемых пунктах индикации) могут быть представлены временные профили заказанных пользователем параметров.

Код РОМ специально не генерирует выходных файлов с двумерными полями (концентраций, плотности выпадений, мощностей доз, интегральных доз). Однако есть возможность сохранять двумерные поля на расчетной сетке для повторного использования (например, для загрузки в другое время после перезапуска ПС РОМ). Имеется также возможность автоматически сбрасывать двумерные поля заданного пользователем параметра в заданные моменты модельного времени. Тогда эти файлы будут сохраняться в каталоге «gf/». Файлы сохраняются в бинарном формате.

В выходной файл «wrg.pvl» (корневой каталог кода РОМ) в режиме обычного счета записывается временная динамика заказанных пользователем параметров в пунктах индикации.

Кроме того, во всех режимах расчета (обычном, серийном, многовариантном, годовой выброс) в корневом каталоге с кодом создаются текстовые файлы с зависимостью заданных пользователем параметров от расстояния до источника.

3.3. Запуск ПС РОМ

Код РОМ запускается запуском на исполнение файла «ROM.EXE» из каталога с ПС РОМ. Конфигурационный файл. При первом запуске запустится GPR-файл «SINGLE-TASK-BEL.GPR». Этот файл вариант исходных данных по умолчанию. Пользователь может модифицировать данный сценарий, сохранять его под другим именем, загружать другие GPR-файлы, которые содержатся в папке «VARIANT». Последние четыре файла, с которыми работал пользователь, сохраняются в конфигурационном файле «ROM.CFG». Здесь содержится:

- Имя текущего GPR-файла, который будет загружен при запуске «ROM.EXE».
- Директория баз данных («DATABASE»).
- Директория карт («MAP»).
- Количество последних файлов (до 4).
- Имена последних файлов.

В каталоге «DATABASE» содержатся файлы баз данных, которые используются в коде РОМ:

- «HUM-VS-TEMP.DAT» — файл с зависимостью абсолютной влажности воздуха от температуры окружающей среды (при 100% влажности). Используется для оценки среднегодовой влажности для расчета доз от трития и углерода.
- «CL_DATA.DAT» — файл с зависимостью мощности дозы облучения от точечного источника для всех нуклидов, входящих в базу данных; а также мощности дозы в центре полусферы, внутри которой равномерно распределен радионуклид.
- «FOOD2.DBF» — файл с базой данных дозовых коэффициентов преобразования «активность, попавшая в организм перорально, — пожизненная доза».
- «INHAL2.DBF» — файл с базой данных коэффициентов дозового преобразования «активность, попавшая в организм с вдыхаемым воздухом, — доза».
- «FOOD2.NPR» — файл с информацией по периодам вегетации и сбора урожая для разных сельскохозяйственных культур. Используется для расчета дозы облучения от пищевых цепочек при аварийных выбросах.
- «LIST_NUCLIDS.CTG» — файл с распределением нуклидов по группам осаждения по умолчанию. Используется при загрузке временного сценария источника выброса из SF-файлов при моделировании нормальной эксплуатации.
- «NUCLID.TAB» — файл с цепочками распада радионуклидов и периодами полураспада.
- «PLATO.DBF» — файл с базой данных коэффициентов дозового преобразования «плотность выпадений — мощность дозы облучения от поверхности» ($Zv \cdot m^2 / \text{Бк} \cdot \text{с}$).

- «CLOUD.DBF» — файл с базой данных коэффициентов дозового преобразования «объемная концентрация — мощность дозы облучения от облака» ($\text{Зв}\cdot\text{м}^3/\text{Бк}/\text{с}$).
- «VOSRAST2.DAT» — файл с информацией о скоростях дыхания у лиц разных возрастных категорий.

При переносе или создании еще одного рабочего каталога с кодом «РОМ» (например, для одновременного запуска нескольких задач) конфигурационный файл изменять не нужно, так как все пути, прописанные в нем, относительно (относительно корневого каталога, в котором расположен код).

Меню «Файл» кода РОМ содержит несколько пунктов:

- «Чтение» — используется для открытия любого GPR-файла из директории «VARIANTS/». Для вызова этого меню можно воспользоваться кнопкой «» на панели быстрого доступа.
- «Запись» — запись состояния входных данных в текущий GPR-файл. Кнопка «».
- «Сохранить как» — сохранение текущего состояния входных данных в GPR-файл под другим именем.
- «Просмотр» — просмотр файла GPR в текстовом виде. Кнопка «».
- «Единицы измерения» — выбор единиц измерения физических величин, используемых для визуализации и задания входных параметров. Кнопка «».
- «Выход» — завершение работы с программой.

Каждый файл исходных данных GPR содержит следующую информацию:

- Наименование аварии и краткий комментарий к ней.
- Название и положение объекта.
- Сценарий источника.
- Метеоданные.
- Параметры счета.

Редактировать файлы исходных данных «вручную» не рекомендуется. Для модификации необходимо использовать возможности ГПИ РОМ. В противном случае корректность сценария может быть нарушена.

3.4. Выбор единиц измерения

Осуществляется с помощью команды меню «Файл→Единицы измерения» или кнопкой быстрого доступа «».

При выполнении этой команды открывается диалоговое окно «Выбор единиц измерения» (рисунк. 3.1). В этом диалоговом окне можно выбрать нужную единицу измерения базовых параметров из выпадающих списков и посмотреть переводной коэффициент к системе, используемой по умолчанию (СИ).

Первые пять задают единицы измерения при визуализации двумерных полей соответствующих величин. Единица измерения времени влияет на визуализацию временных профилей. Единица измерения активности, установленная в данном окне, используется при задании параметров источника.

3.5. Меню «Объект»

Для ввода информации об объекте воспользуйтесь командой главного меню «Объект». Этот пункт содержит три подпункта:

- «Авария». Кнопка «».

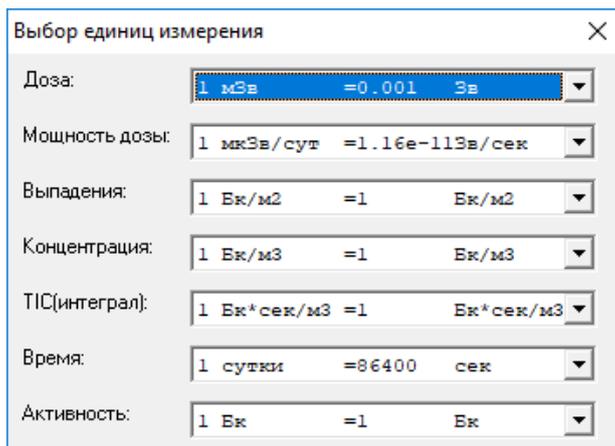


Рисунок 3.1. Окно «Выбор единиц измерения»

- «Местоположение объекта». Кнопка «».
- «Точки индикации».

3.5.1. Подменю «Авария»

Подпункт меню «Авария» открывает окно «Авария» для задания информации о дате выброса и максимальной продолжительности прогноза — задаются во вкладке «Дата».

Обычно максимальная продолжительность прогноза значительно превосходит длительность самого выброса плюс время дрейфа радиоактивного облака в пределах расчетной области. Таким образом, обычно расчет заканчивается, когда все частицы ушли за пределы расчетной области. В большинстве случаев 50 ч вполне достаточно для прохождения радиоактивного облака (при мгновенном источнике).

Однако, у пользователя есть возможность ограничить время прогноза, при этом расчет будет завершён через указанное время, даже если к этому моменту ещё остались расчетные частицы.

Вкладка «Описание» позволяет задать псевдоним и описание аварии. Псевдоним задается в поле «Псевдоним аварии:» и может быть любым, но состоящим из латинских букв и без пробелов. Описание задается в поле «Описание аварии:». В нем рекомендуется приводить наиболее существенные особенности аварии. Это помогает ориентироваться в GPR-файлах, особенно когда их количество велико.

На рисунке 3.2 приведено окно для задания параметров аварии.

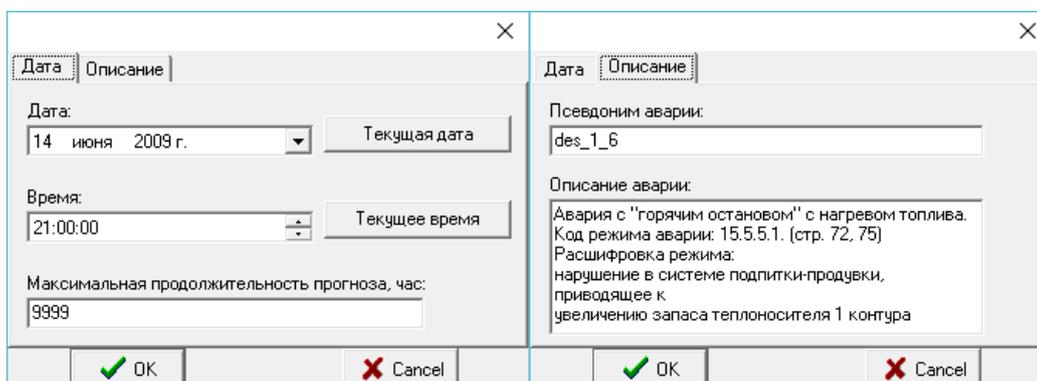


Рисунок 3.2. Вкладки окна «Авария»

Во вкладке «дата», в качестве момента аварии можно выбрать текущую дату и время. Заметим, что от даты зависит вертикальный профиль скорости ветра и коэффициентов турбулентного обмена, так как в модели ПСА, используемой в коде РОМ, они различаются для холодного и теплого периодов года. Холодным периодом считается время с октября по апрель. Теплым — с мая по сентябрь.

Кроме того, от даты выброса может зависеть учет стеблевого пути накопления радионуклидов в продуктах питания в модели облучения от пищевых цепочек (см. пункт 2.8.5).

3.5.2. Подменю «Местоположение объекта»

Команда «Местоположение объекта» предназначена для следующих целей:

- Задания координат источника.
- Задания карты-подложки для визуализации и привязки расчетной области к реальным координатам.
- Задание области прогноза и расчетной области внутри области, определенной картой.
- Задания размерностей расчетной сетки.

Под расчетной областью в коде РОМ понимается область, в которой распространяются лагранжевы частицы. При выходе за пределы расчетной области частицы не отслеживаются. Расчетной области соответствует вся видимая часть карты диалогового окна.

Область прогноза — это прямоугольная область, ограничивающая двумерную расчетную сетку, на которой рассчитываются поля приземных концентраций, выпадений, доз и других параметров.

При выполнении команды главного меню «Объект→Местоположение объекта» появляется диалоговое окно с заголовком «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки». Окно показано на рисунке 3.3.

В левой части этого окна расположены виджеты для задания параметров. В правой части окна показывается карта. Местоположение источника показывается красным крестом внутри белого квадрата на фоне карты.

В панели «Объект» напротив метки «Название» расположено поле для ввода и отображения названия объекта. Ниже, напротив меток «долгота» и «широта» расположены поля для цифрового задания координат источника.

Для интерактивного задания координат источника необходимо навести указатель «мыши» в нужное место на карте и щелкнуть правой кнопкой.

В панели «Расчетная область» напротив меток «Размер по X» и «Размер по Y» расположены поля для отображения пределов области, заданной картой, в километрах и градусах. В этой же панели напротив метки «Изменить размер» расположены кнопки для кратного изменения расчетной области. Использование кнопок «/2» и «/10» позволяет в два раза уменьшить размеры расчетной области по долготе и широте. Кнопки «*2» и «*10» дают возможность выполнения обратных операций. При выполнении этих операций центр расчетной области является неподвижным, а область прогноза становится равной измененной расчетной области. Если при увеличении расчетной области, она выходит за пределы области карты, то изменения размеров не происходит.

В панели «Карта» напротив метки «Файл *.BMP» расположен выпадающий список с выбором карты. Все доступные карты с соответствующими файлами привязки находятся в каталоге «map/». При выборе карты расчетная область и область прогноза становятся равными области карты.

Если координаты источника находятся в пределах области новой карты, то они не меняются. В противном случае источник помещается в центр карты.

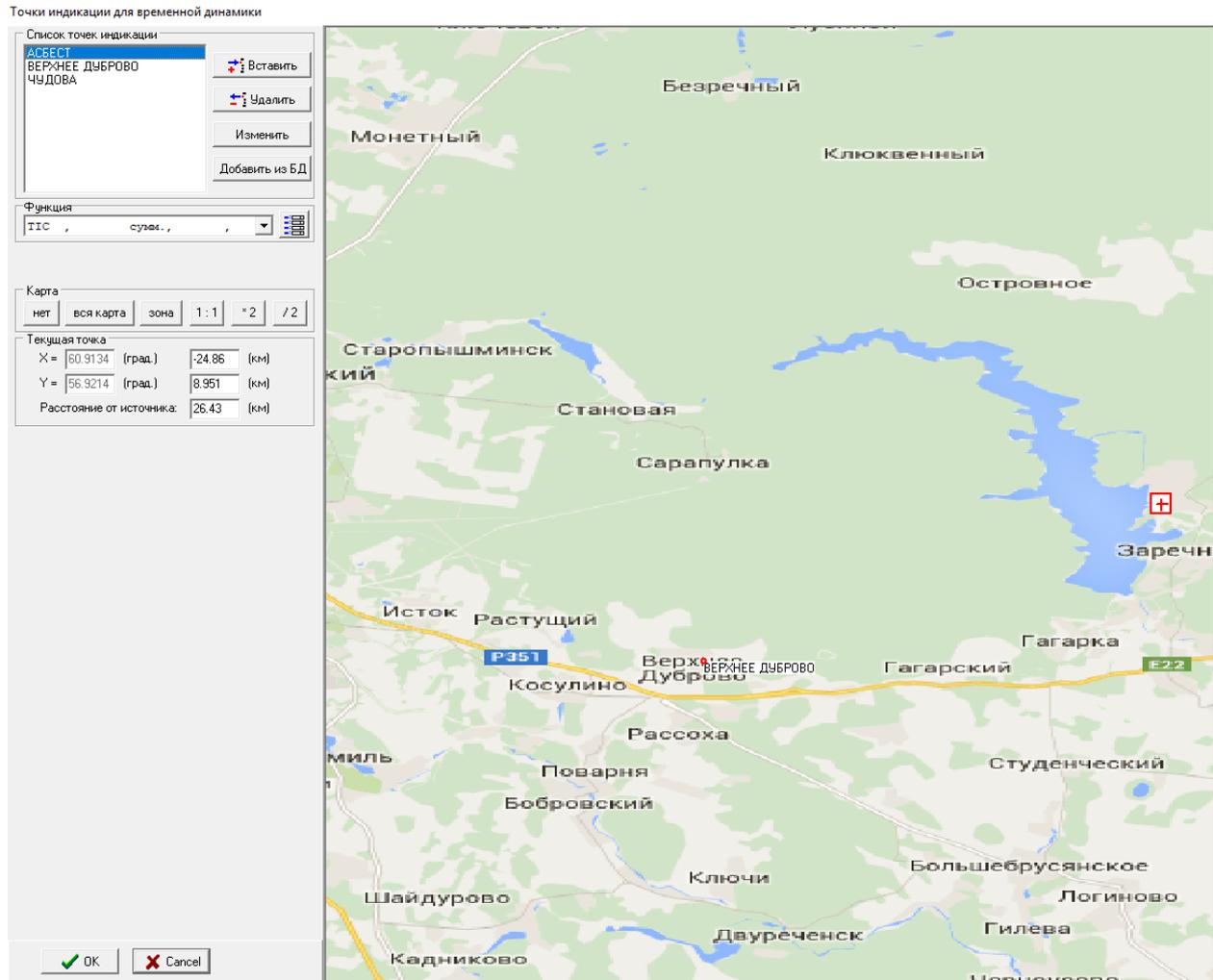


Рисунок 3.4. Окно «Точки индикации для временной динамики»

Кнопка «Удалить» позволяет удалить выбранный в списке пункт индикации. Кнопка «Изменить» позволяет изменить параметры выбранного в списке пункта индикации. Кнопка «Добавить из БД» позволяет добавить пункт индикации из базы данных. База данных содержится в текстовом файле с расширением «*.CSV», имя этого файла должно быть таким же, как и имя карты-подложки (без расширения), этот файл должен располагаться в каталоге «map/». Если этот файл отсутствует, то данная опция не работает.

При нажатии на кнопку «Добавить из БД» появляется дополнительное окно «Населенные пункты» (рисунок 3.5). В появившемся окне нужно выбрать интересующие пункты и нажать кнопку «ОК». В списке появятся названия выбранных пользователем населенных пунктов.

БД может содержать только населенные пункты, наиболее часто используемые в качестве точек индикации. В то же время в качестве точек индикации может быть использован и любой другой достаточно крупный или важный объект, например, предприятие, склад, бомбоубежище и другие.

Добавить новую точку индикации, которой нет в базе данных можно с помощью диалогового окна «Точка индикации» (рисунок 3.6). При нажатии на кнопку «Изменить» появляется такое же окно с данными для выбранной в списке точки индикации.

Это окно позволяет задать долготу и широту пункта индикации. Сделать это можно в формате с плавающей точкой, в географическом формате, а также посредством задания расстояния вдоль координатных осей.

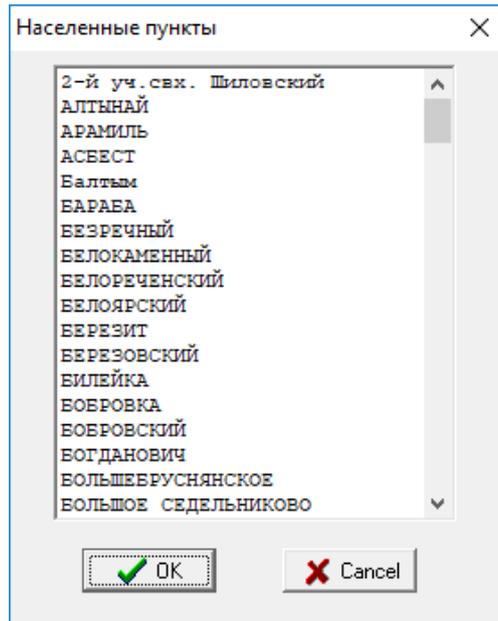


Рисунок 3.5. Окно с базой данных населенных пунктов

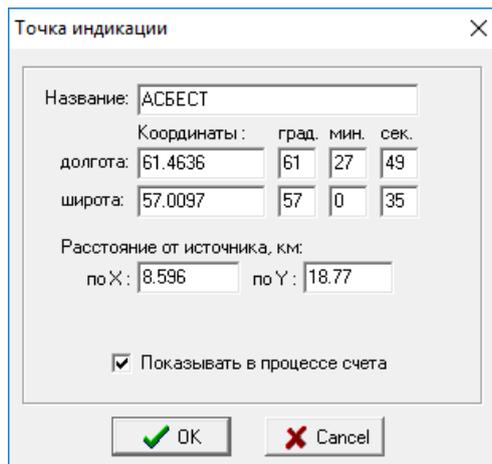


Рисунок 3.6. Окно «Точка индикации»

В панели «Функция» содержится выпадающий список параметров, временная динамика которых будет считаться в каждом из пунктов индикации. Кнопка справа от этого списка вызывает окно «Ввод целевых функций», показанное на рисунке 3.7.

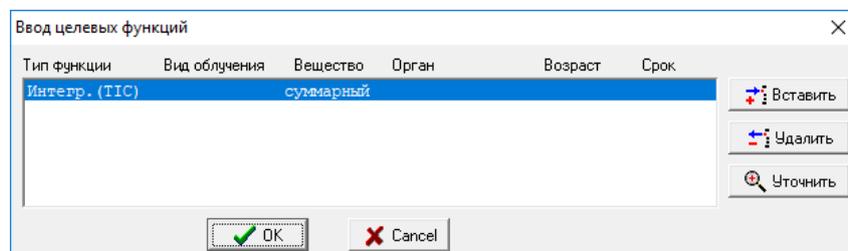


Рисунок 3.7. Окно «Ввод целевых функций»

В центральной части окна содержится список целевых параметров для расчета. Каждый параметр характеризуется набором свойств: «Тип функции», «Вид облучения», «Вещество», «Орган», «Возраст», «Срок». Подробно спецификация целевых функций приводится в пункте 3.10.3.

Кнопка «Вставить» позволяет добавить еще одну целевую функцию к уже имеющимся. Кнопка «Удалить» позволяет удалить выбранную в списке функцию в случае, если она в списке не единственная. Кнопка «Уточнить» позволяет настроить параметры функции, вызвав окно редактирования целевой функции. В данном случае рассчитывается единственная целевая функция — проинтегрированная по времени концентрация всех нуклидов в выбросе.

При нажатии кнопки «ОК» результаты редактирования целевых функций сохраняются. При нажатии «Cancel» — результаты модификации пропадают.

Заметим, что для того, чтобы как список точек индикации, так и список целевых функций сохранились в текущем расчетном варианте кода РОМ, необходимо, нажать кнопку «ОК» также и в родительском окне, из которого вызывалось окно «Ввод целевых функций». А именно, в окне «Точки индикации для временной динамики». В противном случае результаты редактирования данных в этом окне пропадут. Следует отметить, что данный принцип справедлив почти для всех диалоговых окон задания входных данных: при запуске окна редактирования создается копия структуры данных, которую требуется модифицировать посредством данного окна, непосредственно в окне эти данные модифицируются, а на уровне главного окна ПС РОМ нужные данные заменяются модифицированной копией.

Для того чтобы результат сохранился при перезапуске ПС РОМ, необходимо выполнить запись изменений: «Файл→Запись».

3.6. Меню «Источник»

Данное меню содержит единственный подпункт меню: «Редактирование». При вызове этого подменю открывается окно «Ввод параметров источника». Это окно можно вызвать также с помощью кнопки на панели быстрого доступа. Для этого на ней нужно найти и нажать кнопку . Окно показано на рисунке 3.8.

Окно «Ввод параметров источника» позволяет задать временной сценарий выброса — список временных фаз источника, групповой (по свойствам осаждений и вымывания осадками) состав каждой фазы и нуклидный состав каждой группы.

Выброс делится на временные фазы, характеризуемые временем начала и продолжительностью, а также полной активностью на каждой фазе и эффективной высотой источника. В каждой временной фазе в свою очередь имеется свой набор групп нуклидов, отличающихся по свойствам осаждения — гравитационной скорости, скорости сухого осаждения и вымывания осадками. И, наконец, в каждой группе имеется свой набор нуклидов.

Все параметры источника задаются в окне «Ввод параметров источника». При открытии указанного окна отображаются все параметры выброса. Выброс в этой показанной аварии состоит из восьми последовательных трехчасовых фаз. Каждая фаза имеет порядковый номер от 1 до N , где N — полное количество фаз источника. Групповой состав каждой фазы одинаков.

В верхней части напротив метки «Полная активность» содержится поле для редактирования суммарной активности выброса. При изменении этого поля активность каждого нуклида каждой группы каждой временной фазы изменяется в пропорции, равной отношению введенного пользователем значения и текущей суммарной активности.

Напротив метки «Эффективная высота» содержится поле для ввода эффективной высоты. Если таковые данные известны пользователю, их следует ввести в это поле. Если при этом справа от кнопки «Рассчитать» выбран пункт «Все фазы», то высота каждой фазы источника станет равной введенному значению. В противном случае изменение высоты произойдет для выбранной в нижней части окна временной фазы источника.

При нажатии на кнопку «Рассчитать» открывается диалоговое окно «Расчет эффективной высоты» (рисунок 3.9).

№	Время, час		Активность, Бк	Высота, м
	начало	диапазон		
1	0	3	2.36e+13	1.00e+02
2	3	3	2.36e+13	1.00e+02
3	6	3	2.36e+13	1.00e+02
4	9	3	2.36e+13	1.00e+02
5	12	3	2.36e+13	1.00e+02

Рисунок 3.8. Диалоговое окно «Ввод параметров источника»

Рисунок 3.9. Диалоговое окно расчета эффективной высоты выброса

В этом окне задаются все необходимые параметры для расчета эффективной высоты. Если возникают затруднения в определении класса устойчивости, то надо выполнить команду меню «Метео→Локальная погода», перейти во вкладку «Класс стабильности» и нажать кнопку «Расчет класса устойчивости». Перед пользователем появится окно «Определение класса устойчивости», с помощью которого можно рассчитать этот показатель или задать на основании справочника.

Доступны две модели: «МЭИ» и «ЕРА». Обе модели основаны на формулах Бриггса, но рекомендуется использовать модель ЕРА.

Расчетное значение эффективной высоты выброса выводится сразу же после редактирования любого параметра в элементе редактирования, расположенном в нижней части окна. При нажа-

тии кнопки «ОК» автоматически подставляется расчетное значение эффективной высоты выброса в таблицу временного сценария источника и элемент редактирования «Эффективная высота» диалогового окна «Ввод параметров источника».

На панели «Начальные размеры облака» содержатся виджеты для задания высоты и радиуса источника. Высота и радиус облака задаются исходя из следующих соображений:

- При точечном, непродолжительном выбросе из трубы высота и радиус облака можно принять нулевыми.
- При площадном выбросе с поверхности земли задается радиус облака, равный радиусу источника, а высота облака задается равной нулю.
- При объемном выбросе задается радиус облака, равный радиусу источника, а высота облака задается равной вертикальному размеру объемного источника.
- При выбросе из трубы большого размера радиус и вертикальный размер облака принимают равным радиусу трубы.

Исходя из вышеизложенного, принимаем радиус облака, равным радиусу трубы источника — 1,25 м и высоту — 1,25 м.

Далее задаются параметры самого радиоактивного выброса. Будем считать, что выброс имеет 5 фаз. Рассмотрим, например, вторую фазу. Параметры выброса на второй фазе:

В таблице в нижней части окна «Ввод параметров источника» приводится информация о фазах источника. Кнопка «Вставить» справа от этой таблице создает копию текущей выбранной фазы и помещает ее под текущей фазой. Кнопка «Удалить» удаляет выделенную фазу, а кнопка «Удалить все» — удаляет все фазы, кроме первой. Кнопка «Группы» открывает окно редактирования группового состава фазы «Группы». Кнопка «Разделить» позволяет разделить выделенную фазу на заданное число последовательных по времени одинаковых фаз. Кнопка «Загрузить сценарий» позволяет загрузить сценарий из стандартного текстового файла SF. Данная опция используется при загрузке квази-сценария годового выброса.

Время начала действия фазы — через 3 часа после начала аварии; продолжительность — 3 часа; высота выброса — 100 м. После нажатия на кнопку «Группы» перед пользователем появляется окно с тем же названием, как показано на рисунке 3.10.

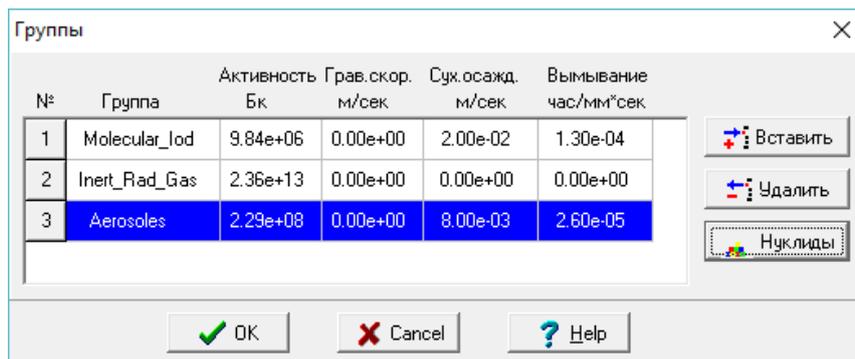


Рисунок 3.10. Окно «Группы»

В основной части данного диалогового окна расположена таблица параметров групп фазы: название группы, суммарная активность, скорость гравитационного и сухого осаждения аэрозолей (обычно равна нулю), а также параметр вымывания. В данном случае фаза разделена на три группы. Кнопка «Вставить» позволяет скопировать выделенную группу и поместить ее строчкой ниже текущей. Кнопка «Удалить» позволяет удалить выделенную группу. А кнопка «Нуклиды» вызывает диалог для задания списка нуклидов группы и их активностей. Данное окно для группы «Aerosoles» показано на рисунке 3.11.

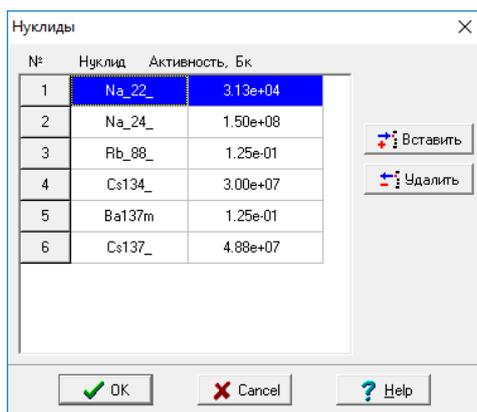


Рисунок 3.11. Окно «Нуклиды»

Кнопка «Вставить» окна «Нуклиды» позволяет добавить нуклид в список. Кнопка «Удалить» — соответственно удалить нуклид из списка. Кнопка «ОК» данного окна позволяет сохранить результат редактирования нуклидного состава.

Кнопка «ОК» окна «Группы» аналогично позволяет сохранить результаты редактирования группового состава фазы (включая нуклидный состав каждой группы). Если отредактировать поле в столбце «Активность, Бк» в выделенной группе, то активности каждого нуклида, входящего в состав редактируемой группы, изменятся пропорционально.

В данном случае состав каждой фазы выброса по йоду молекулярному:

- I_m-131 — 8.90e+06;
- I_m-132 — 9.49e+05;

Состав выброса по газообразным нуклидам:

- Kr-85 — 6.37e+10;
- Kr-85-m — 4.01e+11;
- Kr-87 — 2.25e+11;
- Kr-88 — 6.75e+11;
- Xe-131-m — 1 (продукт распада);
- Xe-133 — 1.69e+13;
- Xe-135 — 5.36e+12;

Состав выброса по аэрозолям:

- Na-22 — 3.13e+4;
- Na-24 — 1.5e+8;
- Rb-88 — 1 (продукт распада);
- Cs-134 — 3e+7;
- Cs-137 — 4.88e+7;
- Ba-137-m — 1 (продукт распада).

После редактирования группового состава фазы и нажатия кнопки «ОК» (окна «Группы»), значение поля «Полная активность, Бк» окна «Ввод параметров источника» изменится. Будут учтены изменения активности отредактированной фазы.

Если изменить суммарную активность выделенной фазы в окне «Ввод параметров источника», то пропорциональным образом изменятся и активности групп, входящих в состав временной фазы.

3.7. Ввод метеорологических данных

Для того, чтобы открыть окно «Ввод метеоданных», предназначенное для задания временного сценария атмосферных параметров распространения нужно либо выполнить команду меню «Метео→Локальная погода», либо воспользоваться кнопкой , расположенной на панели быстрого доступа.

Как и в источнике, сценарий изменчивости атмосферных параметров (далее метеосценарий) состоит из временных ступенек — «фаз». Время прогноза делится на отрезки произвольной продолжительности и для каждого из этих отрезков задаются метеоданные. Отличие состоит в том, что в сценарии погоды временные фазы следуют друг за другом непрерывно — конец одной является и началом следующей.

Окно «Ввод метеоданных» представлено на рисунке 3.12.

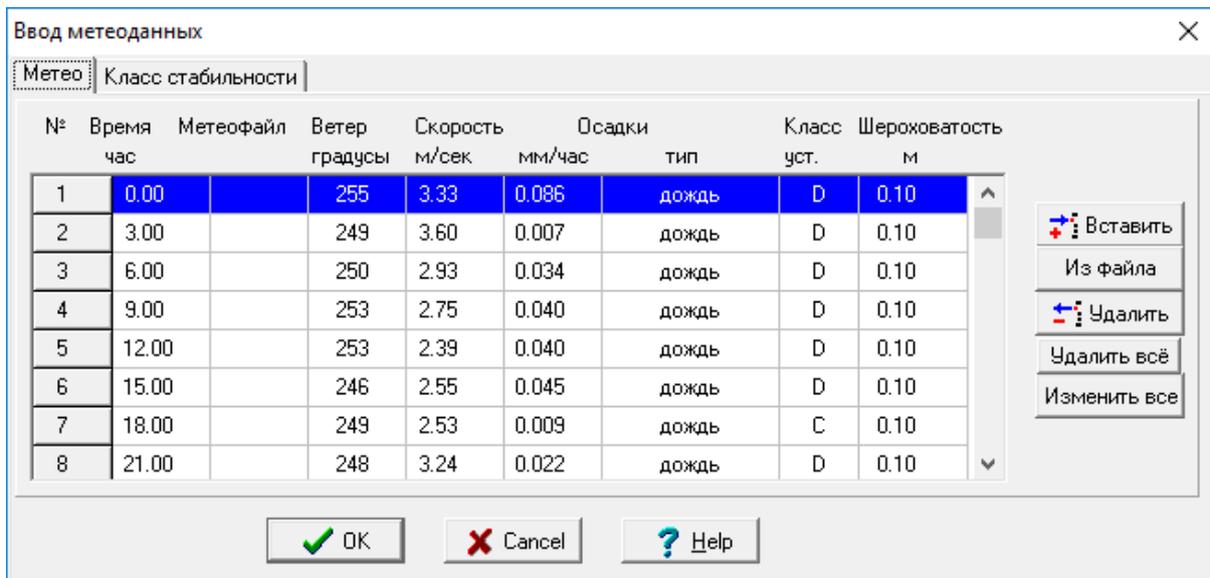


Рисунок 3.12. Диалоговое окно «Ввод метеоданных»

В окне «Ввод метеоданных» представлен пример метеосценария.

Сценарий, приведенный на рисунке 3.12, состоит из 64 последовательных трехчасовых интервалов, в коде «РОМ» именуемых метео-фазами. Первая фаза характеризуется направлением ветра 255°, скоростью ветра 3,33 м/с, интенсивностью осадков 0,086 мм/час, классом устойчивости атмосферы D. Шероховатость подстилающей поверхности хоть и может быть задана различной для разных фаз, как правило, одинакова. Фазы должны быть непрерывны во времени, в столбце «Время, час» указывается только время начала временной фазы. Для вставки временной фазы нужно нажать кнопку «Вставить». Колонка «Метеофайл», если есть информация о трехмерной картине ветра, при наличии соответствующего файла (в учебной версии кода не работает). Колонка «Ветер, градусы» содержит информацию о направлении ветра в градусах. Этот параметр можно непосредственно задать в таблице или, используя правую кнопку «мышки», выбрать направление ветра из раскрывающегося списка, содержащего 16 направлений с шагом 360°/16. Колонка «Скорость» хранит информацию о скорости ветра.

Есть возможность явно задать вертикальный профиль скорости ветра, если таковой известен. Для этого нужно установить стрелку «мышки» на колонке «Скорость» в третьей фазе, нажать правую клавишу «мышки» и из выпадающего списка выбрать «V_z». При этом, появляется новое диалоговое окно для задания распределения ветра по высоте (рисунок 3.13).

Вертикальный профиль ...

Число узлов (2 < N < 30): 30

№	Высота, м	Скорость, м/сек	Угол, град.
1	0.00	3.33	255.00
2	5.00	2.84	255.00
3	10.00	3.33	255.00
4	15.00	3.62	255.28
5	20.00	3.82	255.67
6	25.00	3.98	256.06
7	30.00	4.11	256.45
8	35.00	4.22	256.84
9	40.00	4.31	257.23

OK Cancel

Рисунок 3.13. Диалоговое окно для задания вертикального профиля ветра

Колонка «Осадки» содержит интенсивность осадков в период действия фазы. При входе в него щелчком левой клавиши «мыши», это поле работает как элемент редактирования, куда можно внести любое значение осадков, предполагая, что количество осадков постоянно во всей области расчета. В полной версии кода ROM если нажать правую кнопку «мыши», то появиться кнопка, открывающая ниспадающий список с 2-мя строчками: «const» (однородное поле осадков) и «2D-дождь» (двумерное распределение осадков). Выбрав «2D-дождь» открывается новое диалоговое окно «Ввод 2D-дождя» (рисунок 3.14), позволяющее задать двумерное распределение осадков на местности.

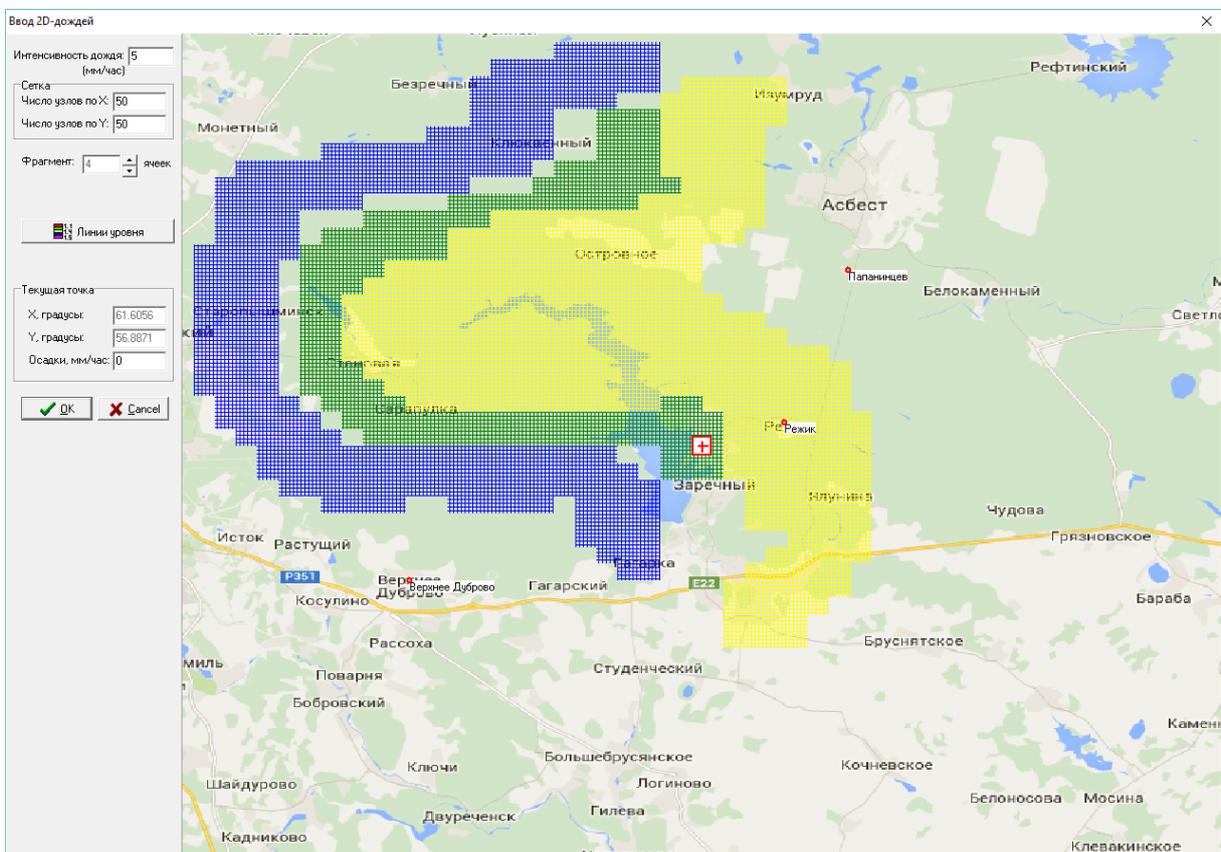


Рисунок 3.14. Ввод 2D-распределения дождя

В колонке «Тип» задается тип осадков из следующего ниспадающего списка, открывающегося при входе в это поле:

- Дождь.
- Снег с дождем.
- Ливень.
- Снег.
- Морось и туман.

В колонке «Класс устойчивости» задается класс устойчивости атмосферы по шкале Тернера с поправками из следующего ниспадающего списка: А, В, С, D, E, F, G. С помощью кнопки «Расчет класса устойчивости» вкладки «Класс стабильности» можно вызвать окно «Определение класса устойчивости», с помощью которого можно рассчитать этот параметр.

На рисунках 3.15 и 3.16 представлены вкладки окна «Определение класса устойчивости», которые позволяют определить класс устойчивости по различным методикам.

Вкладка «Синоптика» позволяет определить класс устойчивости по следующим данным:

- Месяц, когда произошла авария.
- Местное время.
- Сдвиг декретного времени — промежуток времени, который нужно прибавить к 12:00, чтобы определить время, когда высота солнца максимальна в данной местности.
- Широта станции (в географическом формате или с плавающей точкой).
- Балл облачности.
- Высота облаков.
- Наличие снега.
- Видимость.
- Скорость ветра.

При нажатии на кнопку «Рассчитать» данной вкладки производится расчет класса устойчивости. Подробно методика определения класса устойчивости по синоптическим данным, используемой в данном окне, представлена в подразделе 2.3.1.

Вкладка «Радиационный баланс» позволяет рассчитать класс стабильности на основе радиационного баланса. Для этого необходимо ввести следующие данные:

- Время суток.
- Скорость ветра.
- Интенсивность излучения с поверхности земли.

После чего нажать кнопку «Рассчитать».

Вкладка «Справочник» позволяет оценить класс устойчивости по описанию типичных для каждого класса наблюдаемых условий.

Вкладка «Мачта» позволяет определить класс устойчивости на основе температурного градиента. Для этого нужно ввести нижеперечисленные данные и нажать кнопку «Рассчитать»:

- Высоты точек измерения.
- Температура в точках измерения.
- Высота источника.
- Скорость ветра на высшей точке измерения.

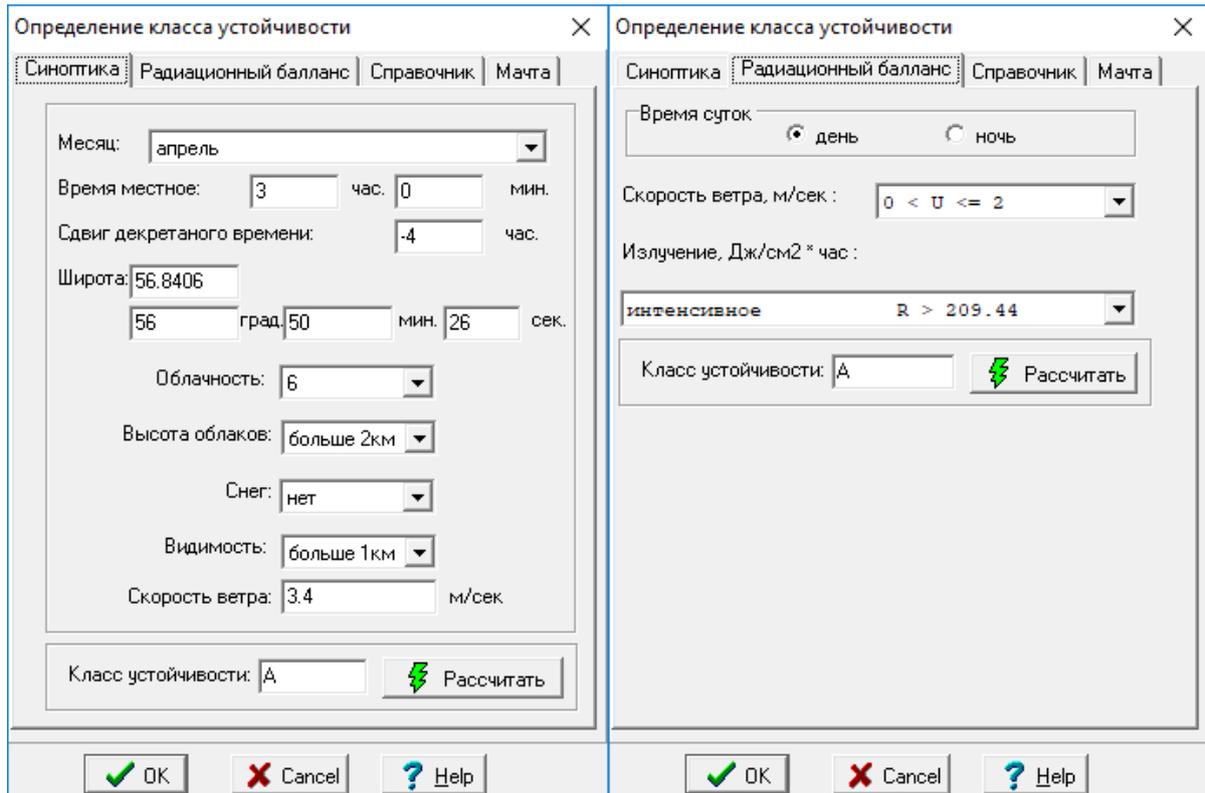


Рисунок 3.15. Первые две вкладки окна «Определение класса устойчивости»

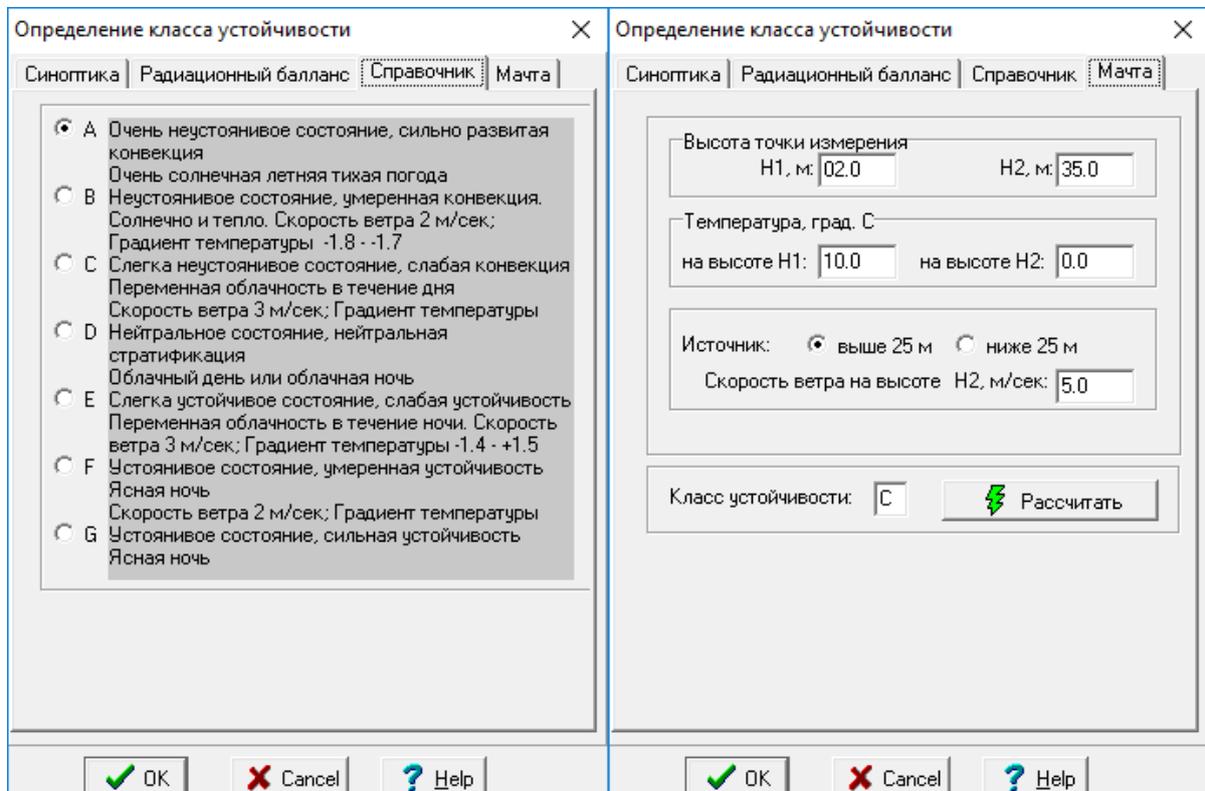


Рисунок 3.16. Последние две вкладки окна «Определение класса устойчивости»

Вернемся к описанию работы с окном «Ввод метеоданных». Столбец «Шероховатость» — задание шероховатости поверхности для зоны прогноза. Шероховатость может быть задана самостоятельно пользователем или выбрана из следующего списка, который появляется при нажатии правой клавиши «мышки»:

- 10^{-5} — очень гладкая снежная или ледяная поверхность.
- $5 \cdot 10^{-5}$ — гладкий снег на невысокой траве.
- $2 \cdot 10^{-4}$ — гладкая водная поверхность.
- 0,01 — водная поверхность.
- 0,003 — пустыня.
- 0,001 — снежная поверхность при наличии кустарника.
- 0,17 — открытое поле летом.
- 0,04 — открытое поле зимой.
- 0,002 — скошенная трава высотой 0,015 м.
- 0,007 — скошенная трава высотой 0,03 м.
- $0,04 \div 0,09$ — высокая трава 0,6—0,7 м.
- $0,1 \div 0,2$ — неоднородная поверхность с чередующимися участками травы, кустарника, деревьями и т. п.
- 0,5 — парк.
- $0,75 \div 1,0$ — лес с высотой деревьев до 10 м.
- 0,4 — сельская застройка.
- $1 \div 4$ — город с высокими зданиями.

Напомним, что количество метеофаз в учебной версии ограничено 64. При нажатии на кнопку «Из файла» пользователю предлагается выбрать текстовый файл в формате MPL для загрузки из него метеосценария.

3.7.1. Ввод метеорологических данных для расчета радиационной обстановки при максимально неблагоприятных условиях при кратковременных выбросах

При расчете радиационной обстановки от кратковременных выбросов для каждой точки следа подбираются наиболее неблагоприятные условия. При этом данные, введенные вручную, не используются. В этом режиме задается только диапазон метеорологических параметров, внутри которого автоматическим образом производится подбор наиболее неблагоприятных условий.

Запуск программы в этом режиме осуществляется из главного меню. Вид главного меню показан на рисунке 3.17. В основном меню выбирается опция «Авторасчет».

При выполнении команды меню «Авторасчет» открывается диалоговое окно «Параметры Авторасчета». Вид окна представлен на рисунке 3.18.

В нем может быть выбрана одна из четырех опций: «Обычный расчет», «Серийный расчет», «Расчет со сдвигом по метеофазам», а также «Нормальная эксплуатация». При выборе первой опции происходит обычный расчет с метеорологической информацией, введенной через меню «Метео». При второй опции («Серийный расчет») окно используется для ввода совокупности тех параметров, которые будут варьироваться для нахождения наиболее неблагоприятных параметров радиационной обстановки. Варьируемые метеорологические параметры (скорость ветра, категория устойчивости) задаются в виде списка значений, которые они могут принимать. В этом же окне задаются варьируемые значения шероховатости. Выбор третьей опции («Расчет со сдвигом по метеофазам») делается для проведения расчета с использованием метеоданных временных рядов.

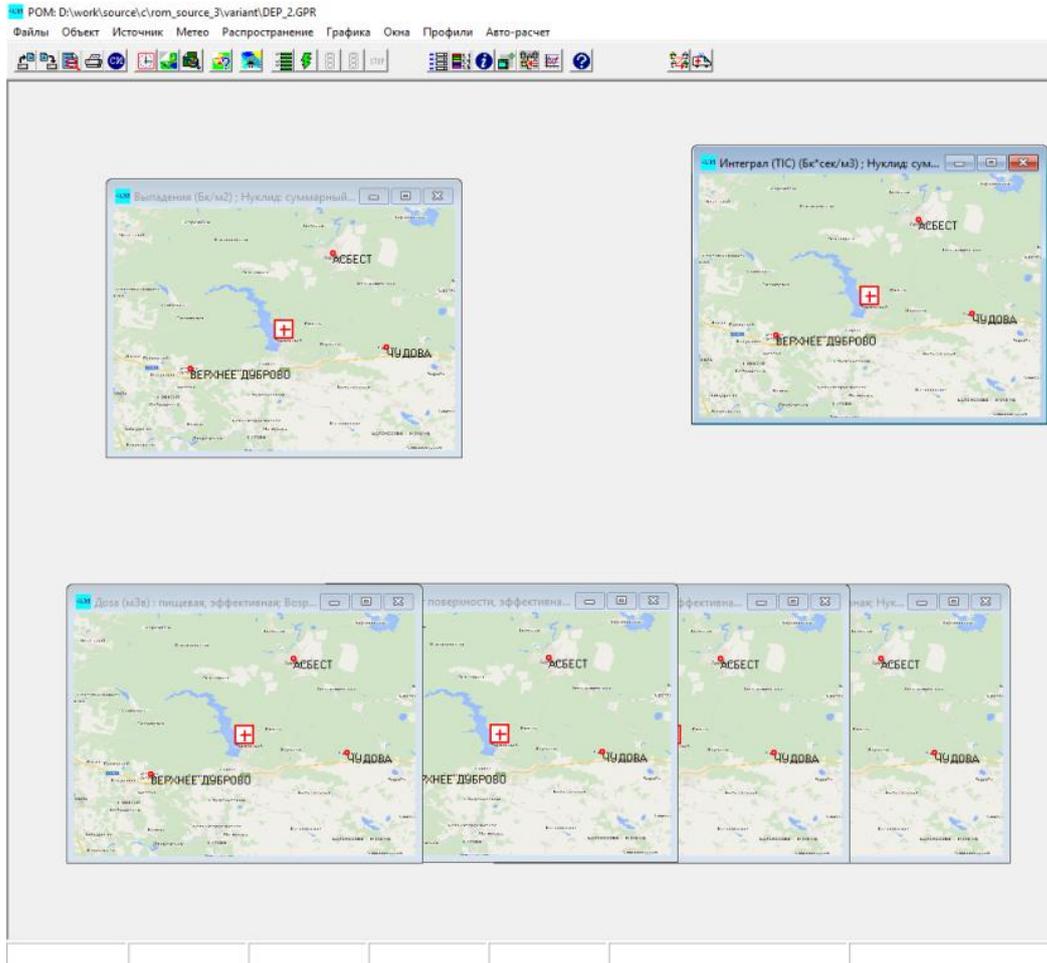


Рисунок 3.17. Вид главного меню ПК РОМ

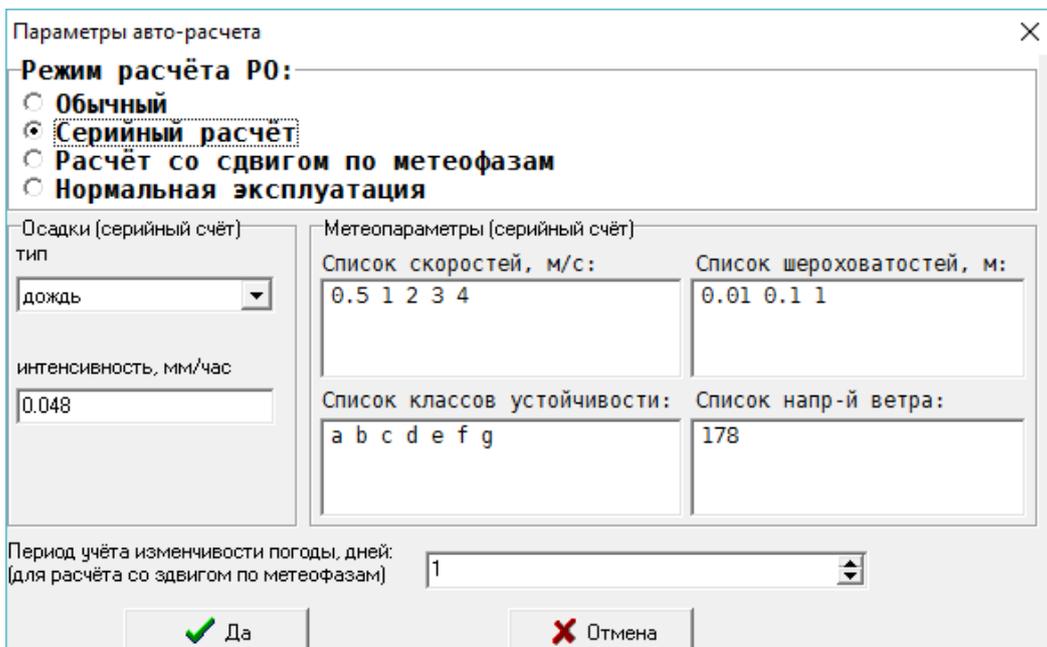


Рисунок 3.18. Вид окна «Параметры Авторасчета» для ввода совокупности варьируемых метеорологических параметров для режима серийного счёта для определения наиболее неблагоприятных условий

В этом окне (рисунок 3.18) задается также интенсивность и тип осадков для режима серийного счета (вторая опция). Эти два параметра будут считаться постоянными на протяжении расчета.

В модели переноса в коде РОМ предусмотрена зависимость коэффициентов турбулентной диффузии от времени года (сезона) при прочих равных условиях. В коде различаются два сезона — холодный и теплый. Варьирование по сезонам не производится автоматически. Сезон определяется датой выброса. Поэтому, для получения более точной консервативной оценки следует провести две серии расчетов: в холодное и теплое время года.

Значения варьируемых параметров вводятся в окнах виде списков чисел, разделенных пробелами. Во всех списках параметров, предназначенных для проведения вариантных расчетов, должно быть указано одно или несколько значений. Если не задано ни одного значения, расчет производится не будет. Если указано одно значение, расчеты будут производиться только с этим значением.

Если иницирован режим расчета с перебором входных параметров и определением максимальных параметров радиационной обстановки («Серийный расчет»), то в ячейках расчетной сетки (либо на заданных расстояниях, см. подраздел 2.5) будут рассчитаны максимальные по всему набору перебираемых параметров значения всех выбранных пользователем функций — параметров радиационной обстановки. Полученные таким образом результаты расчета визуализируются средствами кода РОМ в виде цветных карт, либо линий уровня на фоне географической карты района размещения объекта.

Если этот режим не выбран, то параметры, введенные в диалоговых окнах «Метеопараметры (серийный счет)» не используются. Используются введенные пользователем через меню «Метео» данные (в том числе реальные временные ряды и квази-сценарий для моделирования нормальной эксплуатации).

3.7.2. Ввод метеорологических данных для расчета радиационной обстановки от продолжительных выбросов с учетом реальной метеорологии из временных рядов ВМО

В этом режиме работы кода РОМ используются метеорологические данные временных метеорологических рядов за последние несколько лет.

Состав и структура исходной информации временных рядов представлена в верификационном отчете [1]. Эта информация предварительно преобразуется с помощью отдельно стоящего программного блока. В результате его работы из первичных данных формируется файл MPL, определенной структуры, который читается в коде РОМ.

Для работы кода в режиме использования метеоданных временных рядов необходимо сначала выбрать соответствующий режим расчета в окне «Параметры Авторасчета»: «Расчет со сдвигом по метеофазам». Далее в этом же окне следует указать «Период изменчивости погоды, дней». Этот параметр позволяет регулировать количество расчетов и соответственно сдвигов момента начала аварии. Чем больше это параметр, тем меньшее количество расчетов будет проведено. Как правило, этот параметр выбирается по порядку величин равным времени дрейфа частицы по расчетной области плюс длительность самой аварии. Подробности можно найти в отчете [1].

После этого нужно вызвать окно редактирования метеосценария («Ввод метеоданных»), вкладку «Метео» (см. рисунок 3.12).

На этой вкладке следует нажать кнопку «Из файла». В открывшемся окне для задания имени файла (рисунок 3.19) следует выбрать файл «*.MPL», в котором содержится необходимая преобразованная метеорологическая информация временных рядов. При этом в диалоговом окне, которое используется для ручного ввода метеоусловий (рисунок 3.12) будут в том же формате отображаться данные из временных рядов с выбранным временным интервалом, охватывающие всю продолжительность временных рядов. Пример окна с отображаемыми данными показано на рисунке 3.20.

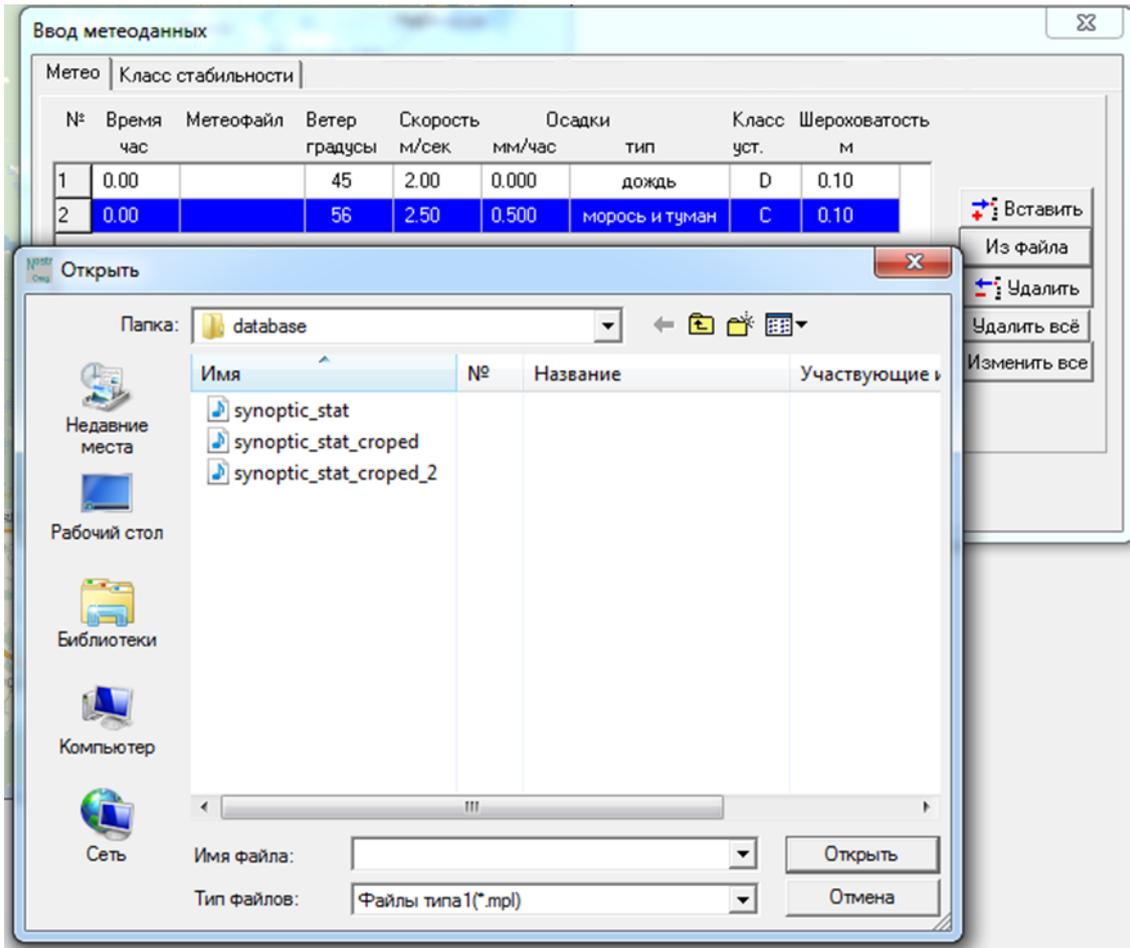


Рисунок 3.19. Диалоговое окно выбора файла с преобразованными данными временных рядов

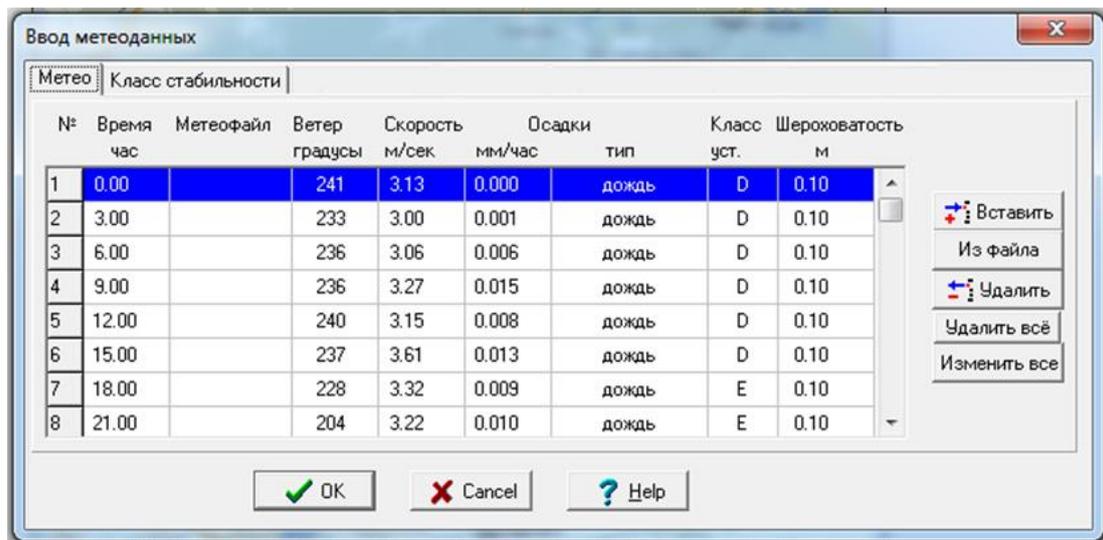


Рисунок 3.20. Отображение преобразованных метеорологических данных временных рядов

После задания метеосценария из файла «*.MPL» в окне «Ввод метеоданных» следует настроить дату начала аварий на начальное время ряда метеопараметров. После задания всех параметров нужно запустить расчет.

В режиме многовариантного счёта с использованием реальных временных рядов данных формат источника не может быть произвольным, а должен удовлетворять некоторым ограничениям. Несмотря на эти ограничения, допускается многовысотный выброс, а также площадной или объёмный источник.

Ограничения, накладываемые на источник, следующие. Время работы источника должно разбиваться на интервалы — фазы, длительность которых составляет ровно 3 часа (период записи данных с сети ВМО), а время начала должно совпадать с началом одного из интервалов. Выброс должен быть непрерывным, то есть конец одной фазы является началом следующей, и так далее. Если выброс многовысотный, то в таблице фаз источника все фазы на заданной высоте должны составлять непрерывный выброс. Другими словами, порядковые номера фаз выброса (см. подраздел 3.6) на некоторой высоте H должны полностью заполнять диапазон от $I(H)$ до $I(H)+N(H)$, где $I(H)$ — порядковый номер самой ранней фазы выброса на высоте H , а $N(H)$ — количество трехчасовых фаз выброса на высоте H .

Для выброса, который производится на фиксированной высоте, должны быть одинаковы наборы групп в каждой из фаз. Кроме того, для одной и той же группы двух разных фаз должны быть одинаковы наборы нуклидов. Относительные активности нуклидов могут быть разными.

3.7.3. Ввод метеорологических данных для расчета среднегодовых параметров радиационной обстановки при регулярном выбросе

Для расчета последствий постоянного годового выброса с помощью кода РОМ, необходимо сначала выбрать соответствующий режим («Нормальная эксплуатация») расчета в окне «Параметры Авторасчета», которое вызывается с помощью команды главного меню «Авторасчет». Далее необходимо, как и в случае многовариантного расчета с использованием реальных временных рядов данных, загрузить квази-сценарий изменчивости атмосферных параметров из подготовленного заранее файла «*.MPL».

Необходимо далее загрузить источник из файла «*.SF» в окне «Ввод параметров источника» (см. подраздел 3.6), после чего запустить счет.

3.8. Ввод параметров расчета

Для каждого конкретного моделирования атмосферного аварийного выброса следует задать служебные параметры расчета и некоторые другие параметры, которые описываются в данном подразделе.

Для вызова окна «Параметры счета» следует выполнить команду меню «Распространение→Ввод параметров» или нажать кнопку  на панели быстрого доступа.

Перед пользователем появится окно, все вкладки которого представлены на рисунках 3.21—3.23.

Разберем все вкладки по порядку. Начнем с вкладки «Модель-Сетка-Экран». В этой вкладке в панели модель можно задать следующие параметры: «Временной шаг, час» — шаг интегрирования по времени, который можно задать вручную, а можно, поставив галку около метки «авто», задействовать опцию автоматического выбора шага интегрирования по времени. При автоматическом выборе шага интегрирования по времени (опция активируется соответствующей галочкой возле поля ввода шага интегрирования по времени) он будет рассчитан исходя из размеров расчетных ячеек и скорости ветра в метеосценарии. При ручном задании временной шаг обычно выбирают таким образом, чтобы количество временных шагов лежало в пределах от 300 до 1000. Например, если продолжительность расчета составляет 10 часов, то временной шаг должен находиться в пределах от 0.01 до 0.03 часа. При выборе временного шага в этих пределах обеспечивается достаточно высокая скорость расчета при хорошей сходимости результатов. При выборе шага следует учитывать, что за один шаг пробная точка перемещается на расстояние $V \cdot \Delta t$. При

скорости ветра 2 м/сек и шаге 0.01 часа это расстояние — 72 м. Оно должно быть меньше характерных размеров области, где требуется разрешение профиля концентрации. При автоматическом выборе шага интегрирования по времени этот фактор принимается во внимание.

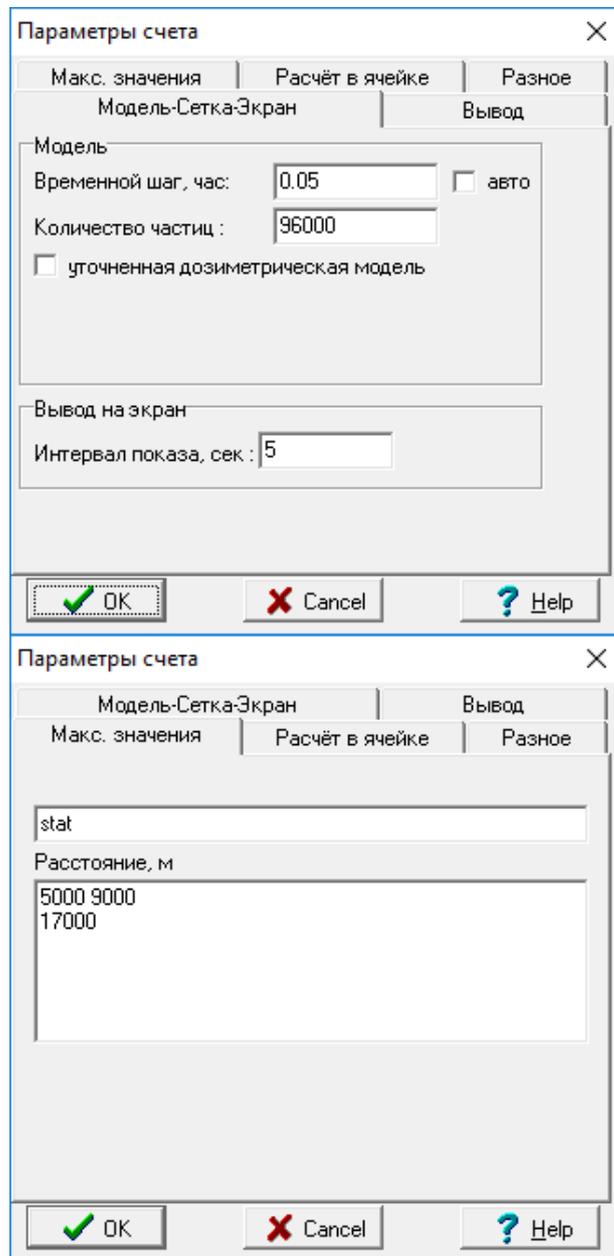


Рисунок 3.21. Вкладки «Модель-Сетка-Экран» и «Макс. значения» окна «Параметры счета»

Напротив метки «Количество частиц» приводится полное количество пробных частиц (облаков), на которое будет выброшено из источника. Для каждой временной фазы источника рассчитывается свое количество частиц, моделирующих выброс данной фазы, и это число пропорционально суммарному количеству частиц, которое вводится в данном поле. Количество частиц на фазу определяется из следующего соотношения:

$$N_p = N \frac{T_p}{\sum_p T_p}$$

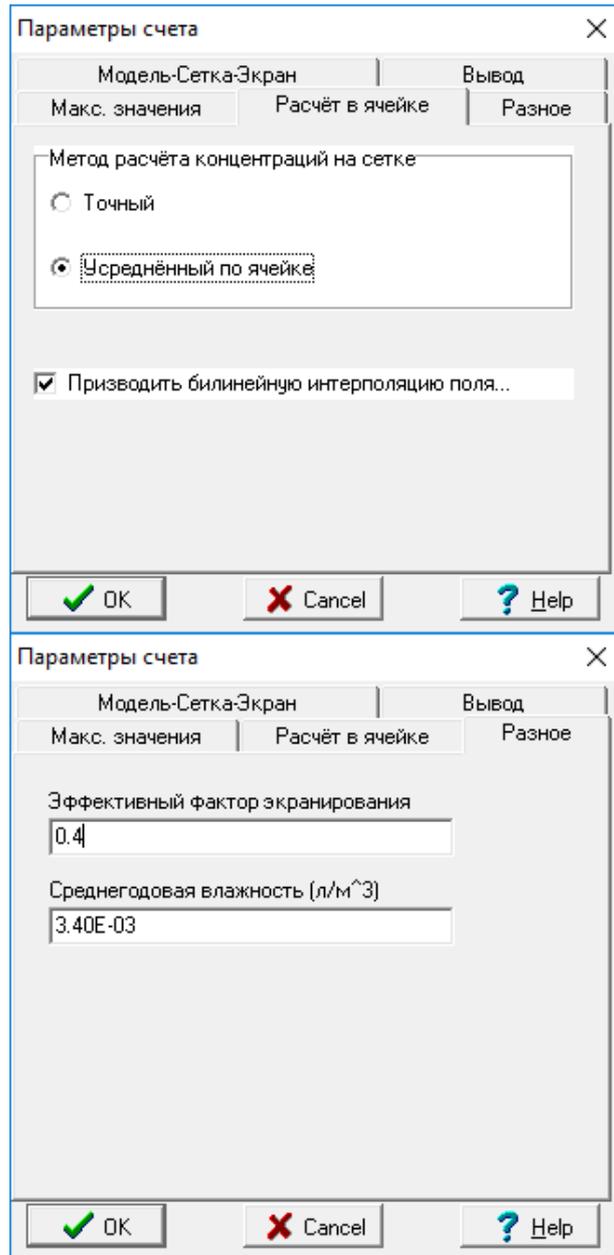


Рисунок 3.22. Вкладки «Расчет в ячейке» и «Разное» окна «Параметры счета»

Здесь N — суммарное количество частиц, T_p — длительность фазы под номером p , величина в знаменателе — суммарная длительность всех фаз (без учета возможных пересечений временных периодов).

Количество частиц на группу данной фазы равно отношению количества частиц на фазу, деленному на количество групп данной временной фазы источника.

Проставить галочку возле метки «уточненная дозиметрическая модель» следует в том случае, если требуется более точно рассчитывать мощность дозы и дозу облучения от облака вблизи источника, когда размер облака выброса мал (меньше длины поглощения гамма-квантов) и метод полубесконечного облака не работает.

В панели «Вывод на экран» возле метки «Интервал показа, сек» вводится периодичность показа текущих двумерных полей расчетных параметров в единицах реального (пользовательского времени). Чем меньше этот параметр, тем чаще будут обновляться цветные поля на фоне карт-подложек, и, как следствие, будет большая нагрузка на процессор и общее время счета может существенно повыситься. Этот параметр выбирается в зависимости от постановки конкретной задачи.

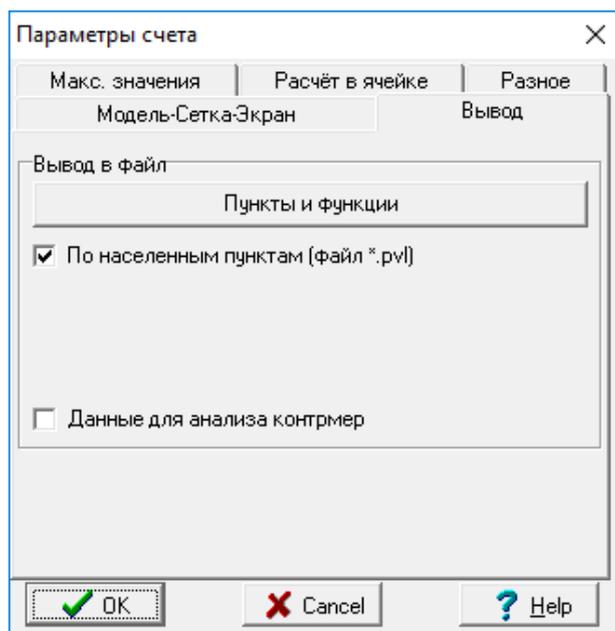


Рисунок 3.23. Вкладка «Вывод» окна «Параметры счета»

Во вкладке «Максимальные значения» задается имя файла и список расстояний, на которых будут рассчитываться максимальные значения доз по углу (при использовании как радиальной, так и декартовой сеток). Если задано имя файла (например «stat»), то в корневом каталоге по окончании расчета появятся файлы: «stat_00001.txt», «stat_00002.txt» и т. д., по одному файлу на каждое окно визуализации. В каждом файле приведен список расстояний, и значения функций, заказанных в окнах визуализации, на заданных расстояниях от источника. Значение на определенном расстоянии определяется перебором ячеек, приблизительно расположенных на этом расстоянии.

Данная опция доступна и правильно работает во всех режимах счета. Данные, заданные пользователем в данной вкладке, не сохраняются в GPR-файлах, и после перезапуска ПС ПОМ их придется вводить заново.

Вкладка «Расчет в ячейке» позволяет пользователю задать способ расчета приземных концентраций и выпадений на двумерной расчетной сетке, а также способ интерполяции данных при визуализации на фоне карты-подложки. При усредненном по ячейке методе, в каждой расчетной ячейке рассчитывается усредненная по площади ячейки концентрация и плотность выпадений. При «точном» методе, рассчитывается точная концентрация в центрах ячеек. Обычно используется усредненный способ.

Галка возле метки «Производить билинейную интерполяцию поля» позволяет задать способ перевода данных с расчетной сетки на графическую карту.

Визуализация двумерных полей производится следующим образом. Каждому пикселю графической канвы визуализации ставятся в соответствие координаты (долгота и широта). Для каждой такой координаты ищется значение поля по одной из двух методик. В одном случае, когда интерполяция не производится, определяется ячейка двумерной расчетной сетки, ближайшей к данной точке, и значение поля берется равным значению в ячейке. В другом случае производится билинейная интерполяция из четырех ближайших центров ячеек.

По найденному значению определяется цвет в соответствии с палитрой, которая задается для каждого окна визуализации.

Таким образом, нетрудно видеть, что если интерполяция не производится, то цвет поля в каждой ячейке будет однородным (область на канве визуализации, соответствующая данной ячейке, будет закрашена одним цветом). В другом случае цвет будет меняться в пределах одной расчетной ячейки.

Обычно интерполяция производится, так как она обеспечивает непрерывность значений концентраций и выпадений (а следовательно и остальных параметров), а также цвета визуализации.

Параметры из данной вкладки также не сохраняются в GPR-файлах, после перезагрузки ПС РОМ эти данные выставляются по умолчанию.

Во вкладке «Разное» показывается среднегодовая влажность воздуха ($л/м^3$), которая используется при вычислении годовой дозы от трития, а также фактов экранирования, который используется при расчете доз облучения от поверхности. Для городских условий обычно используется значение 0,4, которое используется по умолчанию, если пользователь не ввел иное значение. Для справочных целей в каталоге «database/» в текстовом файле «hum-vs-temp.dat» содержатся значения абсолютной влажности воздуха в зависимости от температуры окружающей среды (максимально возможное количество воды в газообразной фазе в кубометре воздуха). Заметим, что единица измерения в таблице — $г/м^3$. Для перевода данных в $л/м^3$ следует разделить значение из таблицы на 10^3 и вести его в поле «Среднегодовая влажность ($л/м^3$)».

Параметры данной вкладки сохраняются в GPR-файлы.

Во вкладке «Вывод» содержится индикатор для записи временной динамики в населенных пунктах. Если флажок возле метки «По населенным пунктам (файл *.pvl)» стоит, то будет записываться временная динамика в пунктах индикации. Кнопка «Пункты и функции» позволяет вызвать окно «Точки индикации для временной динамики», она становится активной, если проставлена галка возле метки «По населенным пунктам (файл *.pvl)».

Для того, чтобы изменения, сделанные пользователем в данном окне вступили в силу, следует нажать кнопку «ОК». В противном случае все изменения пропадут.

3.9. Выполнение программы. Расчет варианта

Управление расчетом в системе «РОМ» осуществляется в пункте меню «Распространение», которое, в свою очередь, содержит подменю, состоящее из следующих разделов:

- «Ввод параметров» (кнопка ).
- «Начать счет» (кнопка ).
- «Пауза» (кнопка ).
- «Продолжить счет» (кнопка ).
- «Стоп» (кнопка ).

Центральным пунктом является подменю «Ввод параметров», назначение остальных ясно без пояснений.

Окно «Параметры счета» описано в подразделе 3.8.

Перед запуском расчета на экран монитора можно вывести несколько окон для наблюдения за динамикой изменения интересующей нас функции во времени. Для этого необходимо выполнить команду меню «Окна→Создать окно», в открывающемся диалоговом окне «Задание расчетной функции» (рисунок 3.24) задать функцию. При нажатии кнопки «ОК» на экране появляется окно с картой, в котором будет отображаться заданная пользователем функция в процессе счета и по окончании счета.

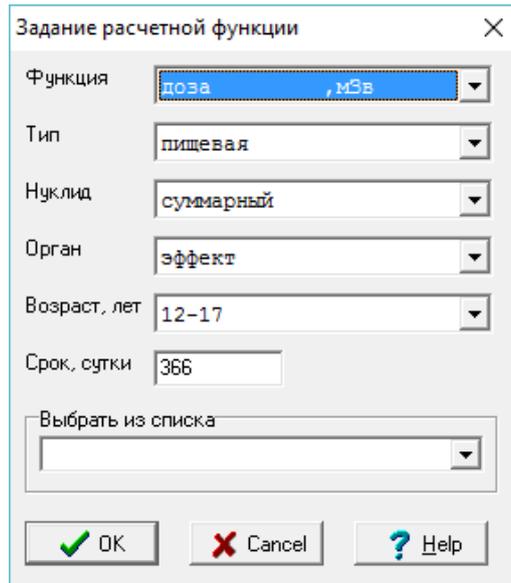


Рисунок 3.24. Окно «Задание расчетной функции»

Чтобы запустить расчет варианта необходимо просто запустить подменю «Начать счет».

В процессе счета в созданных нами окнах будет показана временная динамика заданных функций (рисунок 3.25).

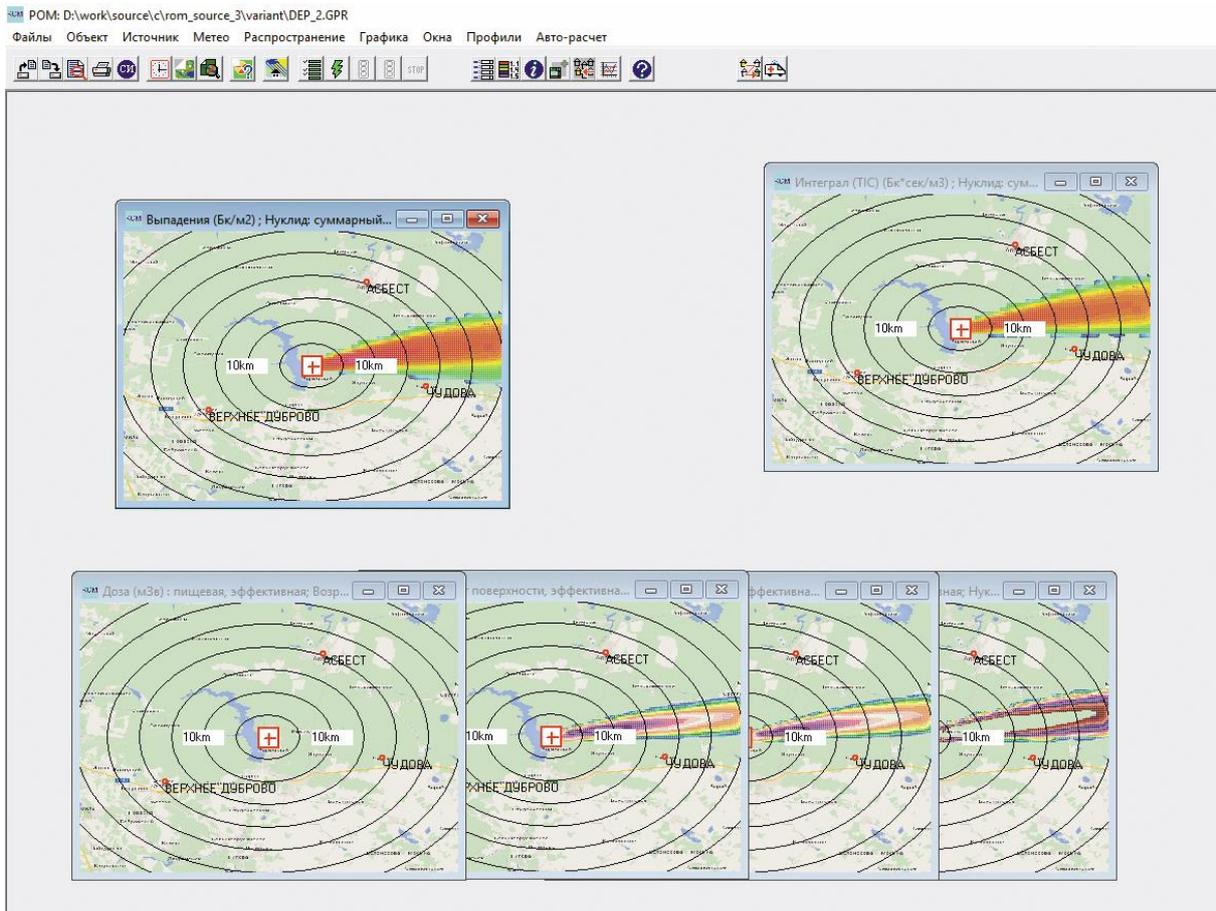


Рисунок 3.25. Вид ПС POM в процессе счета

Перед выполнением расчета необходимо открыть все окна, необходимые для анализа полученных результатов. Если окна будут открыты непосредственно в процессе расчета, то данные для этих окон вычисляются приближенно, причем погрешности возникают для нуклидов с малыми периодами полураспада.

В то же время необходимо помнить, что открытые окна требуют дополнительных вычислительных ресурсов.

Закрывать окна в процессе счета не рекомендуется.

Тип подстилающей поверхности определяется файлом, имя которого совпадает с именем карты анализируемого объекта, но имеет расширение «SHR». Этот файл содержит информацию о типе подстилающей поверхности, которая используется для вычисления коэффициента при скорости сухого осаждения в зависимости от типа поверхности местности в соответствии с таблицей 3.1. Если файл отсутствует, то коэффициент равен 1.

Таблица 3.1. Скорость сухого осаждения для разных типов подстилающей поверхности

Тип поверхности	Коэффициент скорости сухого осаждения	Описание поверхности
0	0,1	Водная поверхность
1	2,0	Вечнозеленый хвойный лес
2	2,0	Вечнозеленый лиственный лес
3	2,0	Опадающий хвойный лес
4	2,0	Опадающий лиственный лес
5	2,0	Смешанный лес
6	2,0	Лесистая местность
7	1,0	Лесостепь
8	1,0	Закрытый кустарник
9	1,0	Открытый кустарник
10	1,0	Пастбища
11	1,0	Пахотные земли
12	0,1	Открытая поверхность
13	0,1	Городская застройка

Если указанного файла «SHR» нет для заданной карты, то коэффициент изменения скорости сухого осаждения принимается равным 1.0.

Если пользователь не желает использовать файл «SHR», то данный файл необходимо или удалить из директории «MAP», или переименовать.

3.9.1. Проведение расчета при разных способах вычисления расчетных величин и записи результатов

Расчет в любом из режимов — в обычном режиме, при расчете для максимально неблагоприятных условий при кратковременных выбросах, в режиме расчета с использованием реальных данных — может быть проведен в двух вариантах.

В первом варианте расчет параметров радиационной обстановки производится в ячейках двумерной расчетной сетки, покрывающей расчетную область.

Во втором расчет параметров радиационной обстановки проводится, кроме того, еще на заданных расстояниях от источника, задаваемых пользователем. При этом точка на заданном расстоянии берется на оси следа, точнее, в точке, где данный параметр имеет максимальное значение на заданном расстоянии. Другими словами, для поиска максимума на определенном расстоянии перебираются значения в ячейках сетки, которые пересекает окружность заданного радиуса с центром в источнике.

При представлении результатов на расчетной сетке возможны два варианта вычисления расчетных величин, таких как концентрация активности, дозы, плотность выпадений: в первом эти величины усредняются по площади ячейки расчетной сетки, во втором рассчитываются точные значения величин, относящиеся к центрам ячеек.

Для выбора способа вычисления расчетных параметров и варианта записи результатов необходимо открыть окно «Параметры счета».

Для выбора опции расчета на заданных расстояниях используется вкладка «Макс. значения». Вид окна, открываемого по этой вкладке, показан на рисунке 3.21.

При вводе данных по расстояниям от источника, для которых требуется рассчитать параметры радиационной обстановки в этой опции, необходимо ввести эти расстояния в многострочном поле ввода (простейший имитатор текстового редактора) в метрах в произвольном порядке (не обязательно в порядке возрастания). В этом же окне задается имя файла, в который будут записаны результаты расчета параметров радиационной обстановки на заданных расстояниях.

Если эти данные заданы, будет произведен расчет максимальных значений на заданных расстояниях. Если данные (значения радиусов и имя файла) не заданы, проводится расчет только в ячейках расчетной сетки (расчет на заданных расстояниях не проводится).

Выбор способа вычисления расчетных величин производится в окне, открываемом по вкладке «Расчет в ячейке» (рисунок 3.22). Здесь необходимо выбрать способ расчета — с усреднением («Усредненный по ячейке») или без усреднения («Точный»).

3.9.2. Проведение расчета при кратковременных выбросах с выбором максимально неблагоприятных условий

Для запуска расчета с варьированием входных параметров необходимо использовать опцию «Серийный расчет» окна «Параметры Авторасчета» (рисунок 3.18). В этом окне задаются значения варьируемых входных параметров, включая метеорологические.

Расчет с варьированием входных параметров инициируется кнопкой начала расчета главного меню, либо выбором «Начать счет» в меню «Распространение». В этом случае будут рассчитываться максимальные по всему набору перебираемых начальных данных значения всех выбранных пользователем параметров радиационной обстановки, причем эти значения будут вычислены в ячейках расчетной сетки, и (если произведен выбор по вкладке «Макс. значения», рисунок 3.21) на заданных расстояниях от источника. Значения входных параметров, введенных через меню «Метео», не используются в расчете.

Если проведен выбор расстояний и задано имя файла для записи результата в меню «Параметры счета» (рисунок 3.21), то на заданных расстояниях от источника будут вычислены значения функций, максимальные по угловой координате (на оси следа). Результаты расчета будут записаны в виде таблицы в файл с префиксом, который пользователь выбрал в диалоговом окне (рисунок 3.21).

Кроме этого, результаты расчетов параметров радиационной обстановки в наиболее неблагоприятных условиях могут быть визуализированы в виде цветовых карт или линий уровня на фоне

географической карты района размещения объекта. Для этого необходимо открыть окно для соответствующего параметра. Для этого нужно выполнить команду меню «Окна→Создать окно». В открывшемся окне (рисунок 3.24) «Задание расчетной функции» необходимо задать параметры расчетной функции (объемная концентрация активности, мощность дозы, доза и другие). Вид линий уровня выбранного параметра на фоне карты будет представлен в открытом окне. Значение выбранного параметра в любой точке пространства может быть получено путем наведения курсора на эту точку. При этом значение параметра интерполируется с центров ячеек регулярной расчетной сетки и отображается в специальном окне в случае, если в окне «Параметры счета» во вкладке «Расчет в ячейке» проставлена галочка возле метки «Производить билинейную интерполяцию».

3.9.3. Проведение расчета при продолжительных выбросах в атмосферу с использованием математического алгоритма преобразования информации временных рядов ВМО

Для проведения расчета в этом режиме необходимо из главного меню выбрать соответствующую опцию в окне «Параметры Авторасчета»: «Расчет со сдвигом по метеофазам» (см. рисунок 3.18). В этом же окне необходимо задать «Период учета изменчивости погоды». Этот параметр определяет временной промежуток до конца временного ряда, когда требуется отключить работу источника, чтобы все пробные частицы успели за этот промежуток выйти за пределы расчетной области.

В окне «Ввод параметров источника», открываемом из меню «Источник», провести разделение временных фаз на интервалы необходимой длины (с помощью кнопки «Разделить»).

В окне «Ввод метеоданных», открываемом из меню «Метео», необходимо выбрать опцию «Из файла» (подпункт 3.7.2) и ввести имя файла, содержащего реальные метеорологические данные временных рядов. При этом произойдет загрузка этого файла, и система будет готова к запуску. Запуск счета инициируется кнопкой пуска на главном меню, либо выбором опции «Начать счет» в меню «Распространение».

3.9.4. Проведение расчета доз облучения населения за счет потребления загрязненных продуктов питания

Доза внутреннего облучения через пищевые цепочки в коде РОМ рассчитывается для каждой ячейки расчетной сетки, покрывающей расчетную область, в предположении, что на площади этой ячейки производятся все основные потребляемые людьми продукты питания, и что люди, проживающие на площади этой ячейки, потребляют только произведенные на этой площади местные продукты питания. Заметим, что это достаточно консервативные предположения.

Доза по пищевым цепочкам оценивается на основе расчетной плотности выпадений по каждому радионуклиду. Для оценки плотности выпадений необходимо задать исходные данные по источнику выброса и метеорологическим условиям.

Для оценки дозы облучения от потребления загрязненной пищи необходимо задать эту дозу как целевую функцию расчета.

Для этого необходимо выполнить команду меню «Окно→Создать окно» (рисунок 3.26). В открывшемся окне (рисунок 3.26) в меню «Функция» выбрать «Доза». Далее, в меню «Тип дозы» выбрать «пищевая».

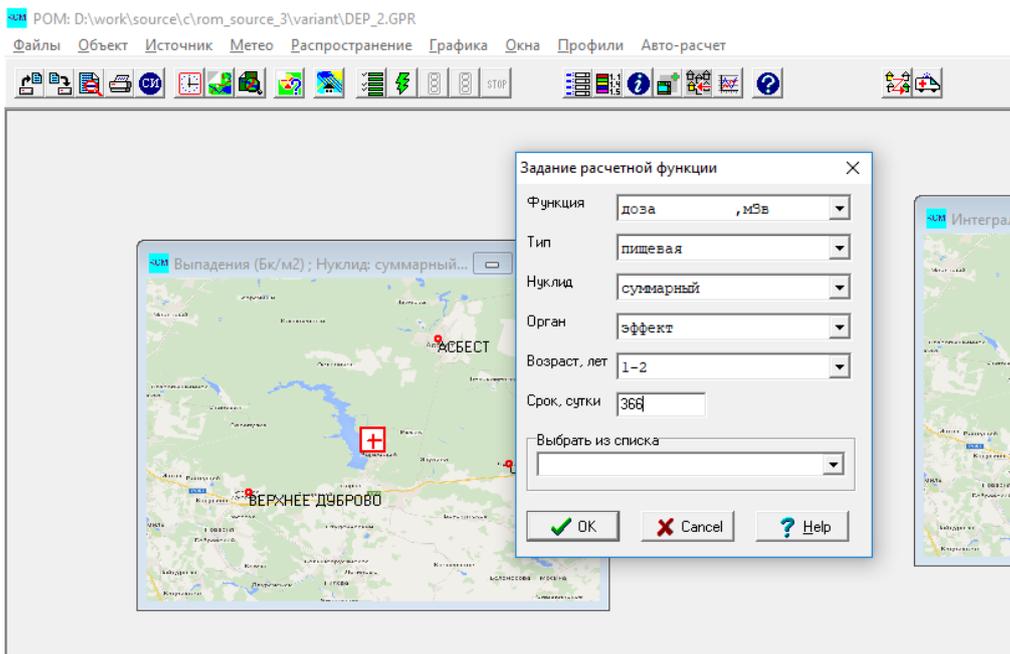


Рисунок 3.26. Диалоговое окно задания целевой функции расчета

В этом же окне в меню «нуклид» — выбрать нуклид, от которого требуется рассчитать дозу облучения. Если рассчитывается доза от всех выпавших нуклидов, выбирается «суммарный».

В том же окне в меню «орган» — выбрать орган тела человека, на который требуется рассчитать дозу. Если требуется эффективная доза, выбирается «эффективный» (рисунок 3.26).

В том же окне в меню «Возраст, лет» — указать возрастную группу, для которой требуется рассчитать дозу.

Пищевая доза существенно зависит от состава потребляемых в данной местности продуктов питания. Просмотр и редактирование данных по типичному рациону питания возможны средствами кода РОМ в диалоговом окне «Годовое потребление продуктов питания», которое открывается из главного меню — меню «Графика». Вид таблицы данных о потреблении основных продуктов питания приведен в верификационном отчете [1].

На рисунке 3.27 приведено окно задания параметров продуктов питания.

Годовое потребление продуктов питания

Потребление	Возрастная группа						Урожай		
	0-1 год	1-2 года	2-7 лет	7-12 лет	12-17 лет	взрослые	начало вегетации	начало сбора	конец сбора
Мясо	43	43	62	81	96	90	01.05.2000	01.07.2000	01.09.2000
Молоко	145	145	207	269	321	300	01.05.2000	01.07.2000	01.09.2000
Пшеница	19	19	28	36	43	40	01.05.2000	01.07.2000	01.09.2000
Огурцы	19	19	28	36	43	40	01.05.2000	01.07.2000	01.09.2000
Калуста	19	19	28	36	43	40	01.05.2000	01.07.2000	01.09.2000
Картошка	19	19	28	36	43	40	01.05.2000	01.07.2000	01.09.2000

Buttons: Сохранить изменения, Не сохранять, Только молоко, Исключить молоко, Все продукты

Рисунок 3.27. Окно «Годовое потребление продуктов питания»

В данном окне для каждого продукта питания можно ввести норму годового потребления для лиц каждой возрастной группы, дату начала вегетации, временной промежуток сбора урожая. Есть кнопки для быстрого исключения молочных продуктов, а также продуктов немолочного происхождения.

Кнопка «Сохранить изменения» позволяет записать информацию из данного окна в файл «FOOD2.NPR», который потом будет учитываться при расчете дозы облучения от пищевых цепочек.

Если перед началом расчета указанным выше способом создано окно для отображения дозы облучения по пищевым цепочкам, то в этом окне после окончания расчета будут представлены результаты расчета — значений дозы в каждой ячейке расчетной области. Эти значения отображаются в виде цветовой карты или линий уровня дозы на фоне географической карты района размещения объекта. Значение дозы в любой точке пространства может быть получено путем наведения курсора на эту точку. При этом значение дозы интерполируется с центров ячеек регулярной расчетной сетки и отображается в специальном окне. Полученное таким образом значение соответствует дозе облучения в предположении, что население, проживающее в окрестностях данной точки, потребляет только местные продукты питания, и в данной местности производится весь набор продуктов, входящих в рацион питания.

3.10. Анализ и представление результатов

Анализ и представление полученных результатов расчета можно провести с помощью следующих пунктов основного меню:

- «Графика→Выбор функции» — вывод распределения любой интересующей функции на момент окончания расчета в текущем окне. Однако всегда рекомендуется задавать пользовательские функции до начала счета.
- «Окна→Создать окно» — вывод распределения любой интересующей функции на момент окончания расчета в новом окне. Рекомендуется создать все окна до начала расчета.
- «Профили» — динамика заданной функции в населенных пунктах, профиль функции по заданному маршруту.

3.10.1. Графика→Выбор функции

С помощью этого меню для текущего окна можно настроить отображаемый параметр, в процессе счета и по его окончании, в этом окне будет выведено распределение заданной функции на момент окончания расчета (или на момент, заданный в окне задания расчетной функции). При выполнении этого пункта меню открывается окно «Задание расчетной функции» (рисунок 3.26). С помощью него пользователь может задать любую доступную функцию (будем называть ее целевой). При нажатии кнопки «ОК» этого окна последнее исчезает с экрана и в текущее окно привязывается к данной расчетной функции, поле которой будет отображаться в процессе счета.

3.10.2. Графика→Установка линий уровня

Для задания параметров отображения двумерного поля в окнах визуализации служит окно «Линии уровня». Чтобы вызвать это окно для конкретного отображаемого параметра, нужно выполнить команду меню «Графика→Установка линий уровня». На экране появится окно, изображенное на рисунке 3.28.

В верхней части окна показано название отображаемой в окне визуализации целевой функции, ее единица измерения, минимальное (обычно ноль) и максимальное значение целевой функции на двумерной сетке.

Возле метки «Число уровней» находится поле для ввода, позволяющее задать точное число цветов и соответствующих этим цветам значений, которые будут применяться при визуализации.

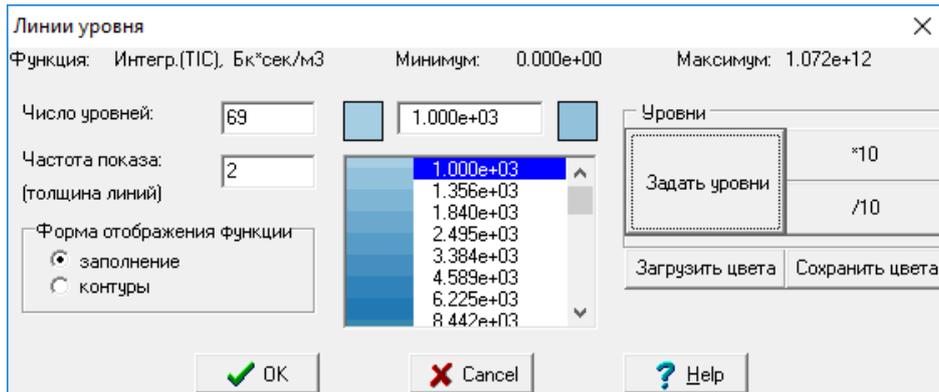


Рисунок 3.28. Окно «Линии уровня»

Напротив метки «Частота показа» можно задать количество пикселей (как по направлению X, так и по направлению Y), которое будет пропускаться при раскрашивании канвы на фоне карты-подложки а режиме отображения «заполнение» (см. ниже). Чем больше этот параметр, тем меньше линий для визуализации и тем менее заметным будет двумерное поле. Напротив, значение 1 соответствует полному закрасиванию. Однако в этом случае карты-подложки не будет видно вовсе. Рекомендуемое значение равно 2.

В панели «Форма отображения функции» можно задать способ визуализации двумерного поля. Режиме «заполнение» предполагает закрасивание каждого пикселя цветом в соответствии со значением функции в данной точке. В режим «контур» для каждого значения из палитры рисуется изолиния функции, вдоль которого значение функции постоянно.

Рекомендуется использовать режим «заполнение».

В центральной части окна «Линии уровня» приводится таблица цветов и значений. В режиме «контур» каждому цвету соответствует одно значение функции. В режиме «заполнение» каждому значению функции соответствует два цвета: верхний и нижний. Но верхний цвет одного значения функции соответствует нижнему цвету следующего значения. Таким образом, для каждого цвета (кроме первого и последнего) задается диапазон значений, которые будут закрасиваться данным цветом.

Для каждой строки можно задать значение уровня, а также нижний и верхний цвет.

В правой части окна содержатся кнопки для настройки палитры. Кнопка «Задать уровни» вызывает окно «Уровни», показанное на рисунке 3.29.

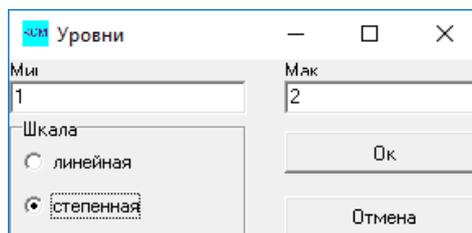


Рисунок 3.29. Окно «Уровни»

В этом окне можно оперативно задать значения уровней отображаемой целевой функции. Причем может использоваться как линейная, так и степенная шкала.

В случае, когда значение отображаемого параметра варьируется в пределах многих порядков, обычно используется степенная шкала, если отображаемый параметр варьируется в пределах одного-двух порядков, то обычно используется линейная шкала.

Минимальное и максимальное значения визуализируемой функции задают диапазон значений в цветовой палитре.

Кнопки «*10» и «/10» позволяют изменить порядок всех значений целевой функции в цветовой палитре одновременно соответственно в большую и меньшую сторону в 10 раз.

Кнопка «Загрузить цвета» позволяет пользователю выбрать текстовый файл с расширением «*rgblist*» в котором содержится таблица цветов и значений. В учебной версии кода РОМ такие файлы содержатся в каталоге «*palitr/*». Таких файлов там два: «*default.rgblist*» и «*clr.rgblist*».

Кнопка «Сохранить цвета» позволяет сохранить текущую палитру в файл «*rgblist*».

3.10.3. Окна→Создать окно

Этот пункт меню работает совершенно аналогично предыдущему. Отличие заключается только в том, что профиль заданной функции появляется в новом дополнительном окне.

Пункты меню «Графика→Выбор функции» и «Окна→Создать окно» служат для настройки и создания окон визуализации. Визуализация заказанной пользователем функции будет производиться в процессе счета и по его окончании.

Окно «Задание расчетной функции» содержит несколько параметров, которые определяют тип визуализируемой величины. Некоторые параметры несовместимы. Например, невозможно задать параметр «Срок, сутки» для дозы от облака или ингаляции. Однако его можно задать для дозы от поверхности и от пищевых цепочек.

Остановимся подробнее на возможных вариантах задания типа целевой функции. Характеристики целевой функции:

- «Функция».
- «Тип».
- «Нуклид».
- «Орган».
- «Возраст».
- «Срок, сутки».

В коде РОМ в качестве «Функций» могут быть следующие расчетные величины:

- «Доза» — интегральная доза облучения, Зв.
- «Концентрация» — приземная объемная концентрация, Бк/м³.
- «Интегр. (ТIC)...» — проинтегрированная по времени приземная концентрация, Бк·с/м³.
- «Выпадения...» — плотность выпадений на подстилающую поверхность, Бк/м².
- «Мощность дозы...» — мощность дозы облучения, Зв/с.
- «Частицы» — графическое представление гауссовых частиц в виде кругов, радиус которых (в метрах) равен горизонтальному размеру гауссовых частиц, а цвет окружности определяется высотой, на которой находится в данный момент частица.

Для параметра «Доза...» можно настроить тип дозы облучения:

- «облако» — доза облучения от нахождения в радиоактивном облаке;
- «поверхность» — доза облучения от выпавшей на подстилающую поверхность активности;
- «ингаляция» — доза облучения от вдыхаемой с воздухом активности;
- «внешняя» — сумма доз от облака и поверхности;
- «полная» — сумма внешней дозы и дозы от ингаляции;
- «пищевая» — доза от пищевых цепочек.

Для доз всех типов можно настроить «Нуклид» и «Орган». В качестве нуклида выбирается либо конкретный нуклид, участвующий в выбросе, либо сумма по всем нуклидам. Выпадающий

список справа от метки «Орган» позволяет задать тип рассчитываемой дозы облучения: эффективная на всё тело («эффект.» в выпадающем списке) или эквивалентная на один из следующих органов: гонады, ... кожа.

Дозы считаются для следующих органов:

- Эффект (эффективная доза).
- Гонады.
- Красный костный мозг.
- Легкие.
- Щитовидная железа.
- Толстая кишка.
- Кожа.

Для ингаляционной и пищевой дозы (и, как следствие, от полной дозы) можно задать возрастную группу «Возраст, лет».

Для дозы от поверхности и пищевых цепочек (и, как следствие, от внешней и полной дозы), можно задать время, спустя которое после окончания расчета следует выводить дозу. Это время задается напротив метки «Срок, сутки». Касательно дозы от пищевых цепочек следует сделать ремарку. Если окончание выпадения радиоактивных веществ произошло раньше периода возможного сбора урожая, то промежуток времени от окончания выпадения до сбора урожая (который, в свою очередь определяется из консервативных предположений — см. пункт 2.8.5) не учитывается при расчете годового потребления. Как следствие, этот период не учитывается и при расчете дозы, так как она прямо пропорциональна потреблению. Предполагается, что в этот период потребляются не загрязненные радионуклидами продукты питания. Если нужна консервативная оценка, следует изменить время прогноза на соответствующую величину, чтобы время потребления загрязненных продуктов питания было равно 1 году.

Для целевой функции типа «концентрация», «интеграл» и «выпадения» доступен только один настроечный параметр — «Нуклид». Для целевой функции «мощность дозы» доступны те же сочетания настроечных параметров, что и для «дозы». Для целевой функции «частицы» нет доступных настроечных параметров.

Для создания или изменения отображаемой целевой функции следует нажать кнопку «ОК».

3.10.4. Профили

Меню «Профили» управляет выводом на экран временных зависимостей целевых функций, заданных пользователем. По своей сути этот режим является визуализатором файла «WRK.PVL», в котором и хранятся все эти временные зависимости.

Меню содержит команды:

- «Пункты индикации» — обеспечивает вывод временной зависимости основных параметров радиоактивного заражения для заданного набора пунктов индикации;
- «Радиальный сектор» — вывод временной зависимости основных параметров радиоактивного заражения для ряда точек радиального сектора, равномерно разбросанных по углу на заданных расстояниях от источника. В учебной версии недоступно;
- «Сечение» — вывод временной зависимости заданной функции по заданному маршруту.

Пункты индикации

При выполнении этого пункта меню открывается окно с графиком зависимости заданной функции во времени для конкретного населенного пункта (рисунок 3.30).

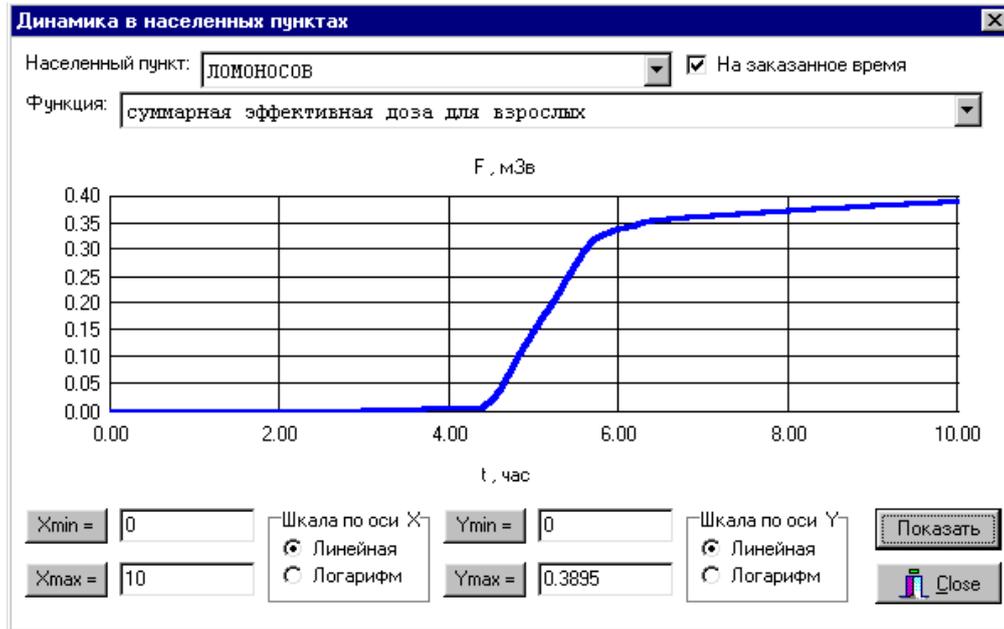


Рисунок 3.30. Окно временных зависимостей функций для заданного пункта индикации

В верхней части окна можно выбрать населенный пункт, список которых был ранее задан с помощью окна «Точки индикации для временной динамики». Галочка возле метки «На заказанное время» позволяет показать временную динамику от начала аварии до заказанного для целевой функции срока (см. пункт 3.10.3). Если галочка не стоит, то функция будет показана на момент окончания счета, который обычно совпадает со временем ухода облака за пределы расчетной области.

В выпадающем списке «Функция» можно выбрать целевую функцию, профиль которой будет показан в центральной части окна. В нижней части окна можно настроить пределы по осям X и Y, а также тип шкалы, независимо по обеим осям. Кнопка «Показать» позволяет применить параметры, введенные слева, после чего производится визуализация. Кнопка «Close» закрывает окно.

Сечение

Этот пункт меню используется для вывода и анализа графика распределения заданной функции в заданном сечении. При его выполнении открывается диалоговое окно «Профили по маршруту» (рисунок 3.31), позволяющее задать маршрут (сечение). При этом значения функции вдоль маршрута будут отображены для активного в текущий момент окна визуализации.

Маршрут, вдоль которого определяется распределение заданной функции, задается с помощью левой клавиши «мышки». Маршрут при этом отмечается красными реперными точками, соединенными красными линиями.

Для очистки уже обозначенного сечения используется кнопка «Очистить». Вывод графика распределения заданной функции вдоль определенного маршрута осуществляется с помощью кнопки «Показать профили». При этом в диалоговом окне «Профили по маршруту» открывается дополнительное окно с графиком распределения заданной функции (рисунок 3.32).

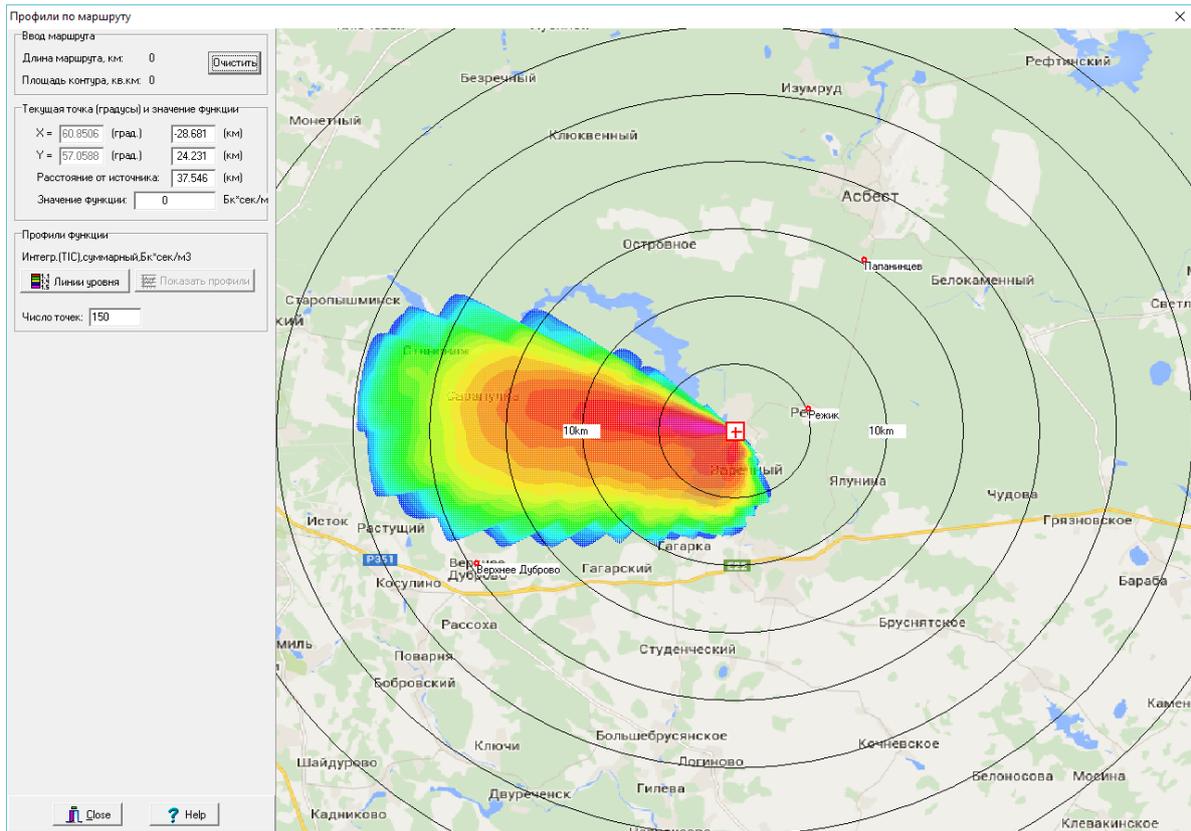


Рисунок 3.31. Диалоговое окно «Профили по маршруту»

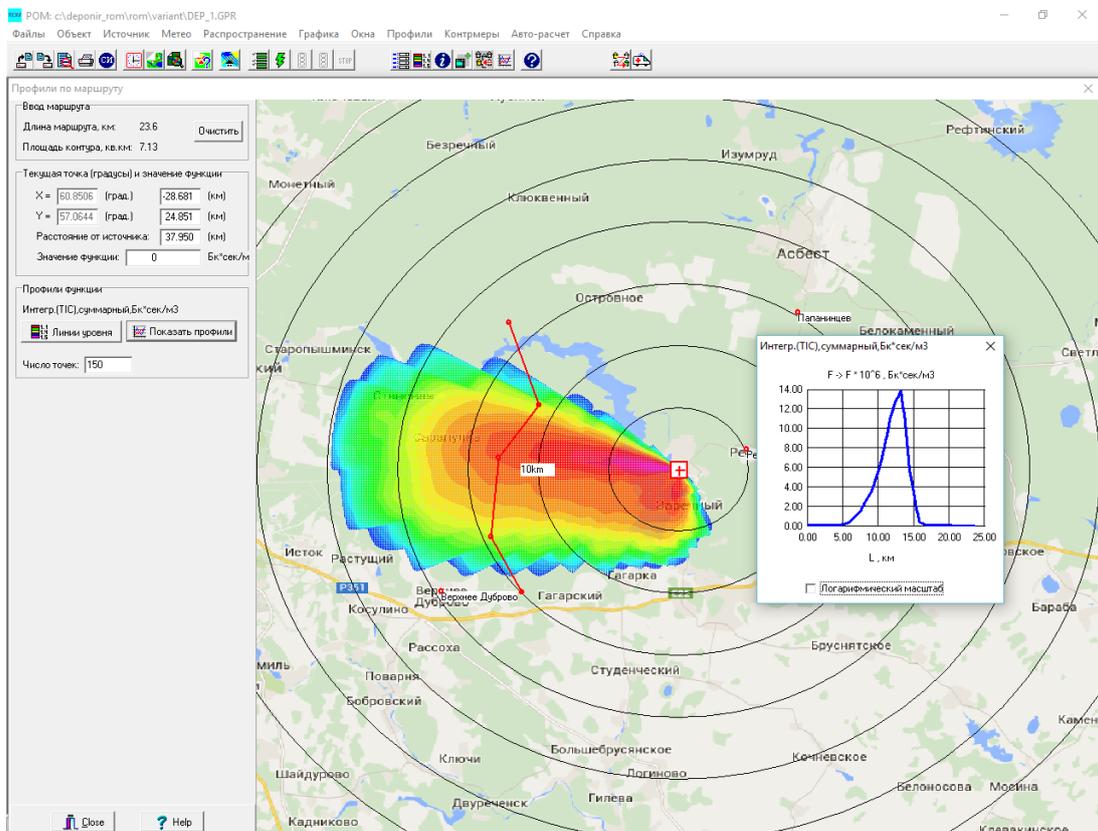


Рисунок 3.32. Вывод графика распределения заданной функции по определенному маршруту

3.10.5. Контрмеры

Этот пункт меню является наиболее информативным с точки зрения анализа результатов расчета и принятия решений по устранению последствий радиоактивного выброса.

Блок «Контрмеры» разработан на основании критериев для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии, изложенных в НРБ-99 и приведенных в таблице 3.2.

Таблица 3.2. Критерии для принятия неотложных решений в начальном периоде радиационной аварии

Меры защиты	Предотвращаемая доза за первые 10 суток, мГр			
	На все тело		Щитовидная железа, легкие, кожа	
	Уровень А	Уровень Б	Уровень А	Уровень Б
Укрытие	5	50	50	500
Йодная профилактика:				
	взрослые	—	—	250*
дети	—	—	100*	1000*
Эвакуация	50	500	500	5000
*Только для щитовидной железы				

Блок вырабатывает рекомендации по применению контрмер только на ранней стадии аварии. К таким мерам относятся:

- Укрытие.
- Йодная профилактика (взрослые, дети).
- Эвакуация.

Принятие решений о мерах защиты населения в случае крупной радиационной аварии с радиоактивным загрязнением территории проводится на основании сравнения прогнозируемой дозы, предотвращаемой защитным мероприятием, с уровнями А и Б, приведенными в таблице 3.2.

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, не превосходит уровень А, нет необходимости в выполнении мер защиты, связанных с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, а также хозяйственного и социального функционирования территории.

Если предотвращаемое защитным мероприятием облучение превосходит уровень А, но не достигает уровня Б, решение о выполнении мер защиты принимается по принципам обоснования и оптимизации с учетом конкретной обстановки и местных условий.

Если уровень облучения, предотвращаемого защитным мероприятием, достигает и превосходит уровень Б, необходимо выполнение соответствующих мер защиты, даже если они связаны с нарушением нормальной жизнедеятельности населения, хозяйственного и социального функционирования территории.

Выбор рекомендуемых контрмер может происходить в двух режимах:

- Применение контрмер с параметрами по умолчанию.
- Ввод параметров контрмер индивидуально для каждого пункта.

При выборе любой из опций производится перерасчет доз с учетом применения контрмер, и представляются данные по предотвращенным дозам и рекомендуемым контрмерам.

Первая опция выбирается в пункте меню «Рекомендуемые контрмеры». Эта опция дает экспресс-анализ радиационной обстановки и эффективности контрмер. При выборе первой опции предполагается, что контрмеры применяются ко всем населенным пунктам со следующими параметрами:

- Начало эвакуации — до прихода облака в данный пункт (предотвращаемая доза = прогнозируемой).
- Укрытие — на протяжении всего времени прохождения облака через данный пункт.
- Йодная профилактика может быть начата за 2 часа до предполагаемого подхода радиоактивного облака.

Вторая опция выбирается в пункте меню «Анализ контрмер». Эта опция дает возможность оптимизации контрмер и детального анализа их эффективности путем выбора параметров. При выборе второй опции должна быть предоставлена возможность выбора населенного пункта из первой таблицы и ввода параметров контрмер для этого пункта:

- Время начала и окончания нахождения в укрытии (абсолютное или с момента начала выброса).
- Время начала приема йодных таблеток.
- Количество таблеток.
- Время начала и окончания эвакуации.

Рекомендуемые контрмеры

При выполнении этого пункта меню открывается стандартный отчет по рекомендуемым контрмерам для всех населенных пунктов, для которых эти контрмеры необходимы. При выводе этого отчета проверяются все населенные пункты, находящиеся в базе данных для выбранной карты.

Результаты выдаются в виде таблицы (рисунок 3.33), где в качестве столбцов для каждого населенного пункта указаны следующие параметры:

- Доза прогнозируемая — суммарная прогнозируемая доза облучения, мЗв.
- Доза предотвращаемая — предотвращаемая доза радиоактивного заражения в результате выполнения рекомендуемых контрмер.
- Уровень — уровень предотвращаемой дозы (А или В).
- Рекомендуемая контрмера (эвакуация, укрытие, йодная профилактика).

На основании этих данных принимаются решения о целесообразности тех или иных контрмер для каждого населенного пункта, входящего в зону радиоактивного загрязнения.

Пункт меню «Анализ контрмер»

Этот пункт меню дает возможность проанализировать влияние выбранной контрмеры на величину предотвращаемой дозы для любого выбранного из списка населенного пункта. При выполнении этого пункта открывается диалоговое окно «Анализ контрмер» (рисунок 3.34).

При открытии этого окна в панели «Доза» для текущего населенного пункта указана предотвращенная доза в результате применения рекомендуемой контрмеры. Рекомендуемые контрмеры (контрмера) отмечены флажками в панели «Контрмеры».

Здесь мы можем изменить параметры контрмер в панели «Контрмеры» для выбранного населенного пункта и, нажав кнопку «Анализ», определить предотвращаемую дозу для этих параметров.

Вариант: LEN_100KM.GPR

Рекомендуемые контрмеры по населенным пунктам

Объект: Ленинградская АЭС, 100км

Авария: Авария 5, уровень 1, ПП_1_МЗ

Комментарий:

Разрыв одного паропровода в машинном зале на отметках 1,8 и 12 м.
Две фазы аварии.

Не учтен выброс через венттрубу - нет данных по составу выброса.

Активность выброса для этого варианта принята в 2 раза меньше, чем активность выброса при разрыве 2-х паропроводов.

Выброс:

Суммарная активность: 1.28e+18 Бк (3.45946e+07 Ки)

Дата и время начала выброса: 27.08.02 13:41:14

Продолжительность: 3 час 0 мин

Погода:

Ветер: 2.00 м/сек, 270.00 град. Осадки: 3.00 мм/час Класс устойчивости: E

Результаты:

Населенный пункт/ Тип дозы	Доза (мЗв) прогнозиру.	Доза (мЗв) предотвращ.	Уровень	Контрмеры рекомендуемые
СОЙКИНО				йод
эффективная, 10 суток	15.20	0.00		
инг., щит.жел., дети	105.37	100.10	A	
инг., щит.жел., взрослые	46.92	44.58		
инг., легкие, дети	0.14	0.00		
инг., легкие, взрослые	0.25	0.00		
инг., ксжа, дети	0.00	0.00		
инг., ксжа, взрослые	0.00	0.00		
ТАМЕНГОРТ				эвакуация
эффективная, 10 суток	199.62	199.62	A	
инг., щит.жел., дети	1280.64	1280.64	A	
инг., щит.жел., взрослые	572.11	572.11	A	
инг., легкие, дети	1.84	1.84		
инг., легкие, взрослые	3.03	3.03		
инг., ксжа, дети	0.00	0.00		
инг., ксжа, взрослые	0.00	0.00		
УСКУЛЯ				укрытие+йод
эффективная, 10 суток	43.53	7.25	A	
инг., щит.жел., дети	297.57	285.17	A	
инг., щит.жел., взрослые	132.60	127.07		
инг., легкие, дети	0.39	0.07		

Рисунок 3.33. Отчет по рекомендуемым контрмерам

Для примера возьмем населенный пункт Коваши. Для него рекомендуемая по умолчанию контрмера — эвакуация, а прогнозируемая и предотвращенная суммарная дозы равны и составляют — 1531,29 мЗв, то есть соответствует уровню — «В» (см. рисунок 3.35).

Предположим, что решение об эвакуации принято не в 13:41, а на два часа позже, в 15:41. Пусть время начала эвакуации — 15:41. Дата начала эвакуации и продолжительность эвакуации такие же. После нажатия кнопки «Анализ» можно проанализировать полученные значения предотвращенных доз (см. рисунок 3.35). Суммарная предотвращенная доза для данного населенного пункта составила 1268,8 мЗв. Этого явно недостаточно. Решение об эвакуации должно быть принято раньше на 2 часа и проведено не позже 13:40.

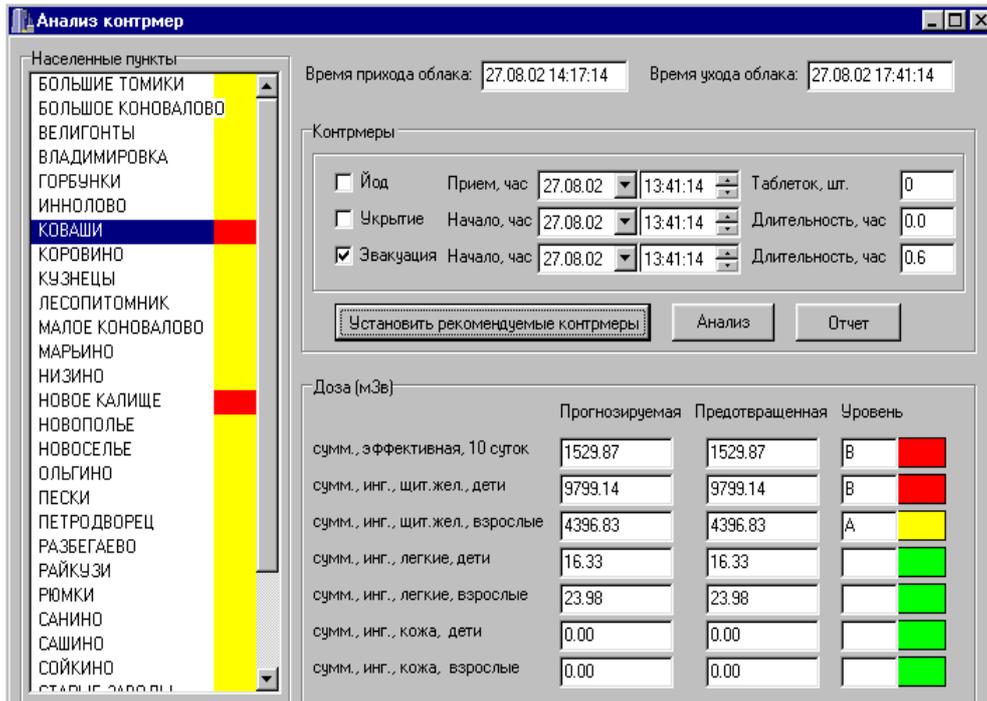


Рисунок 3.34. Диалоговое окно «Анализ контрмер»

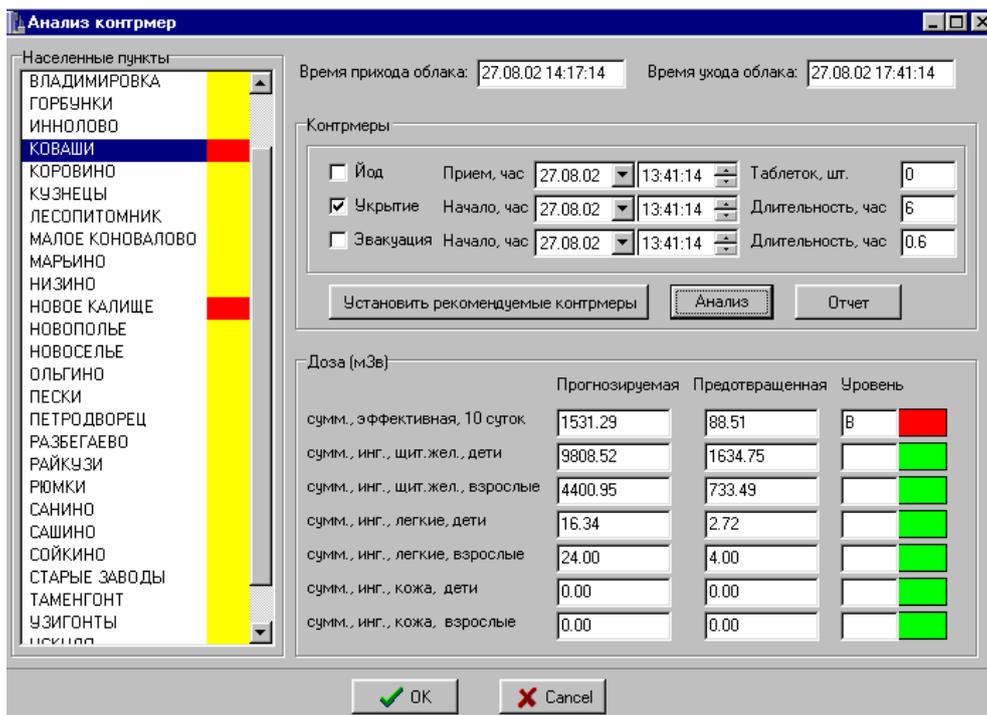


Рисунок 3.35. Пример анализа контрмер (для населенного пункта Коваши)

3.11. Работа с ПС СОНА

Программный блок СОНА предназначен для оценки скорости гравитационного осаждения аэрозолей продуктов горения натрия во влажной атмосфере. Блок позволяет рассчитать скорость осаждения одновременно для нескольких групп частиц, отличающихся размерами. При этом предполагается, что частицы имеют логнормальное распределение размеров.

Рабочий каталог кода СОНА располагается в корневом каталоге с кодом РОМ и запускается автономно, путем запуска на исполнение файла СОНА.exe.

При запуске блока появляется окно меню интерактивного ввода исходных данных. Вид этого окна представлен на рисунке 3.36.

Параметр	Значение
Плотность аэрозоля [кг/м ³]	0.000638
Средний диаметр сухих частиц NaOH в эксперименте [м]	1.65e-6
Количество разбиений в распределении частиц по диаметрам	10
Геометрическое стандартное отклонение логнормального распределения [м]	0.34
Минимальный диаметр аэрозольных частиц	1.65e-7
Максимальный диаметр аэрозольных частиц	1.65e-5
Относительная влажность воздуха (0:1)	0.6
Температура воздуха [K]	300
Начальная плотность оксида натрия [г/см ³]	2.13

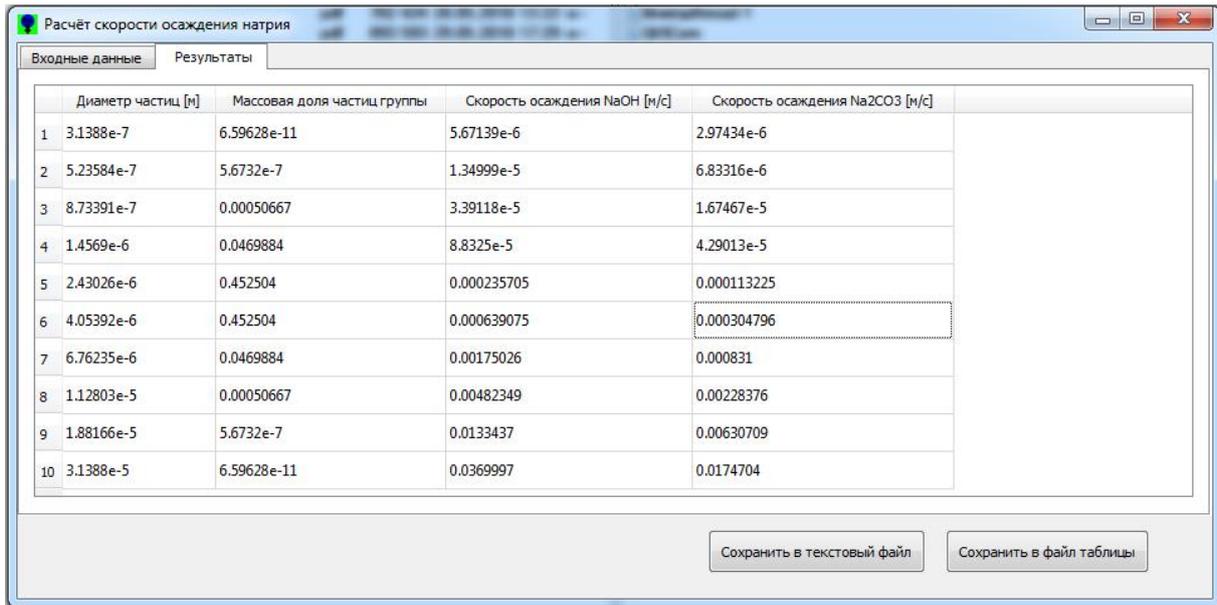
Рисунок 3.36. Вид окна меню ввода исходных данных программного блока СОНА

В соответствующих окнах меню необходимо задать следующие исходные данные, по которым рассчитывается скорость осаждения для каждой группы:

- Счетная концентрация частиц.
- Массовая плотность аэрозоля (сухих частиц).
- Начальная плотность сухих частиц оксида натрия.
- Массовый медианный диаметр частиц (параметр логнормального распределения).
- Геометрическое стандартное отклонение (параметр логнормального распределения).
- Количество дискретных групп в распределении частиц.
- Минимальный и максимальный размеры частиц в распределении.
- Относительная влажность воздуха.
- Температура воздуха.

Для проведения расчета скорости осаждения необходимо нажать кнопку «Результат». При этом появится окно представления результатов расчета, вид которого показан на рисунке 3.37. В этом окне представлены результаты расчета скорости осаждения в виде таблицы. В ней для каждой группы частиц даются:

- средний диаметр частиц в группе;
- массовая доля частиц в ней (эти данные относятся к сухим частицам);
- скорость осаждения для NaOH;
- скорость осаждения для Na₂CO₃.



	Диаметр частиц [м]	Массовая доля частиц группы	Скорость осаждения NaOH [м/с]	Скорость осаждения Na2CO3 [м/с]
1	3.1388e-7	6.59628e-11	5.67139e-6	2.97434e-6
2	5.23584e-7	5.6732e-7	1.34999e-5	6.83316e-6
3	8.73391e-7	0.00050667	3.39118e-5	1.67467e-5
4	1.4569e-6	0.0469884	8.8325e-5	4.29013e-5
5	2.43026e-6	0.452504	0.000235705	0.000113225
6	4.05392e-6	0.452504	0.000639075	0.000304796
7	6.76235e-6	0.0469884	0.00175026	0.000831
8	1.12803e-5	0.00050667	0.00482349	0.00228376
9	1.88166e-5	5.6732e-7	0.0133437	0.00630709
10	3.1388e-5	6.59628e-11	0.0369997	0.0174704

Рисунок 3.37. Вид окна представления результатов расчета скорости гравитационного осаждения для групп частиц с разными размерами

Эти данные должны использоваться в коде РОМ при задании параметров осаждения групп аэрозолей для расчета переноса и осаждения частиц продуктов горения натрия.

4. ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ ЗАДАЧ С ПОМОЩЬЮ ПРОГРАММНОГО СРЕДСТВА

В данном разделе приводятся три типа задач, на примере которых демонстрируются возможности кода РОМ и его отличительные особенности от гауссовых моделей.

Во-первых, подробно разбирается пример моделирования кратковременного выброса с помощью режима серийного расчета. Особенность данного подхода заключается в том, что в каждой точке расчетной области вычисляется максимально возможное значение функционала (например, дозы). Максимум значения в данной точке наблюдается при определенном возможном сочетании метеопараметров, поэтому для каждой точки эти условия и значения максимумов ищутся независимо.

Данная методика, однако, подходит лишь для кратковременных выбросов. Поэтому в коде РОМ была реализована еще одна возможность — моделирование продолжительных выбросов с использованием реальных многолетних рядов метеопараметров. Под продолжительными выбросами следует понимать выбросы, в течение которых метеопараметры не могут быть постоянными. Это выбросы длительностью сутки и более.

Для того, чтобы промоделировать изменение погодных условий при продолжительных выбросах, естественно использовать реальные метеоданные за прошлые годы (временные ряды). Однако здесь остается неопределенность в выборе времени начала выброса. Поэтому, для того чтобы использовать временной ряд для поиска наилучших условий распространения в каждой точке расчетной сетки независимо, необходимо, как и в случае серийного счета с постоянными метеопараметрами, производить множество расчетов. Варьируемым параметром в таком случае будет дата и время начала выброса. Для каждого момента начала выброса, вообще говоря, реализуется уникальный сценарий изменчивости погодных условий. А для нахождения наилучших условий, при которых можно ожидать самых больших значений параметров радиационной обстановки в данной точке расчетной области, необходимо произвести множество расчетов с различными моментами начала выброса.

Заметим, что хотя в каждой точке расчетной области независимо от других точек выбирается максимальное значение, полученная таким образом оценка, вместе с тем является реалистичной, так как получена на основе реальных (а не консервативных) данных об изменчивости погодных условий.

Кроме того, в данном разделе будет описан пример решения задачи оценки радиационных последствий годового выброса (нормальная эксплуатация).

4.1. Серийный расчет

В данном подразделе рассмотрим гипотетическую аварию на реакторе БН-600 (Белоярская АЭС) «Полное обесточивание с отказом органов СУЗ». В таблице 4.1 представлен условный выброс нуклидов через венттрубу за полчаса.

Таблица 4.1. Условный суммарный выброс нуклидов через венттрубу за полчаса

Нуклид	Выброс в атмосферу
^{137}Cs	$5,11 \cdot 10^{12}$
^{134}Cs	$3,50 \cdot 10^{12}$
^{131}I	$2,93 \cdot 10^{12}$

Окончание табл. 4.1.

Нуклид	Выброс в атмосферу
^{132}I	$3,83 \cdot 10^{10}$
^{133}Xe	$1,51 \cdot 10^{17}$
^{135}Xe	$5,65 \cdot 10^{16}$
$^{85}\text{Kr-m}$	$5,65 \cdot 10^{15}$
^{88}Kr	$2,53 \cdot 10^{15}$
^{87}Kr	$1,90 \cdot 10^{14}$
^{85}Kr	$1,00 \cdot 10^{15}$
^{24}Na	$7,26 \cdot 10^{11}$
^{22}Na	$9,70 \cdot 10^7$

4.1.1. Авария

Запустите код POM на исполнение. Откройте сценарий «VOID-BEL-30-KM.GPR». С помощью команды меню «Объект→Авария» вызовите окно редактирования информации об аварии. В вкладке «Дата» проставьте дату: 1 августа 2018 года, 12:00. Максимальную продолжительность прогноза поставьте равной 10 часам. Во вкладке «Описание» введите псевдоним аварии «bn-600-accident-1», а также Описание аварии: «Полное обесточивание с отказом органов СУЗ». Вид окна «Авария» представлен на рисунке 4.1.

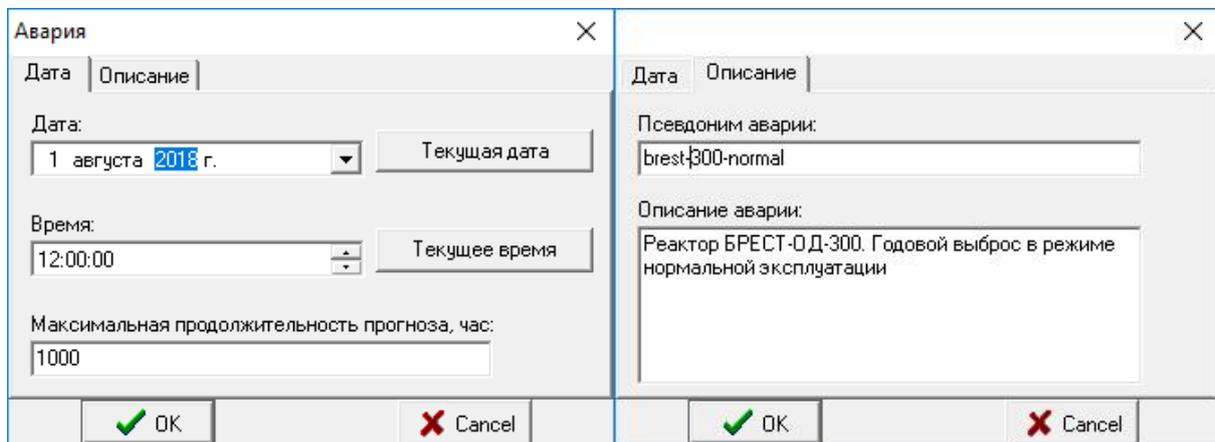


Рисунок 4.1. Вид окна «Авария» после сделанных изменений

Нажмите кнопку «OK».

4.1.2. Местоположение объекта

Далее выполните команду меню «Объект→Местоположение объекта». Появится окно «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки». Первым делом в панели «Карта» справа от метки «Файл *.BMP» в ниспадающем списке выберите карту «bel30km.bmp».

4.1.3. Местоположение объекта

Далее выполните команду меню «Объект→Местоположение объекта». Появится окно «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки». Первым делом в панели «Карта» справа от метки «Файл *.BMP» в выпадающем списке выберите карту «bel30km.bmp».

В панели «Расчетная область» справа от метки «Изменить размер» несколько раз нажмите на кнопку «*10» для того, что бы расчетная область была отождествлена с область, охватываемой картой-подложкой «bel30km.bmp».

В панели «Объект» напротив метки «Название» введите «BelNPP». Задайте долготу и широту станции — местоположение объекта и аварии:

- долгота — 65,54°;
- широта — 60,54°.

Убедитесь, что размер расчетной области примерно 54×60 км. И последнее: задайте размерности расчетной стеки, 54 по оси X и 60 по оси Y. Соотношения размеров расчетной области и количества ячеек вдоль долготы (по оси X) и вдоль широты (по оси Y) означают, что горизонтальные размеры расчетных ячеек равны 1 км x 1 км.

Вид окна «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки» после всех изменений приведен на рисунке 4.2.

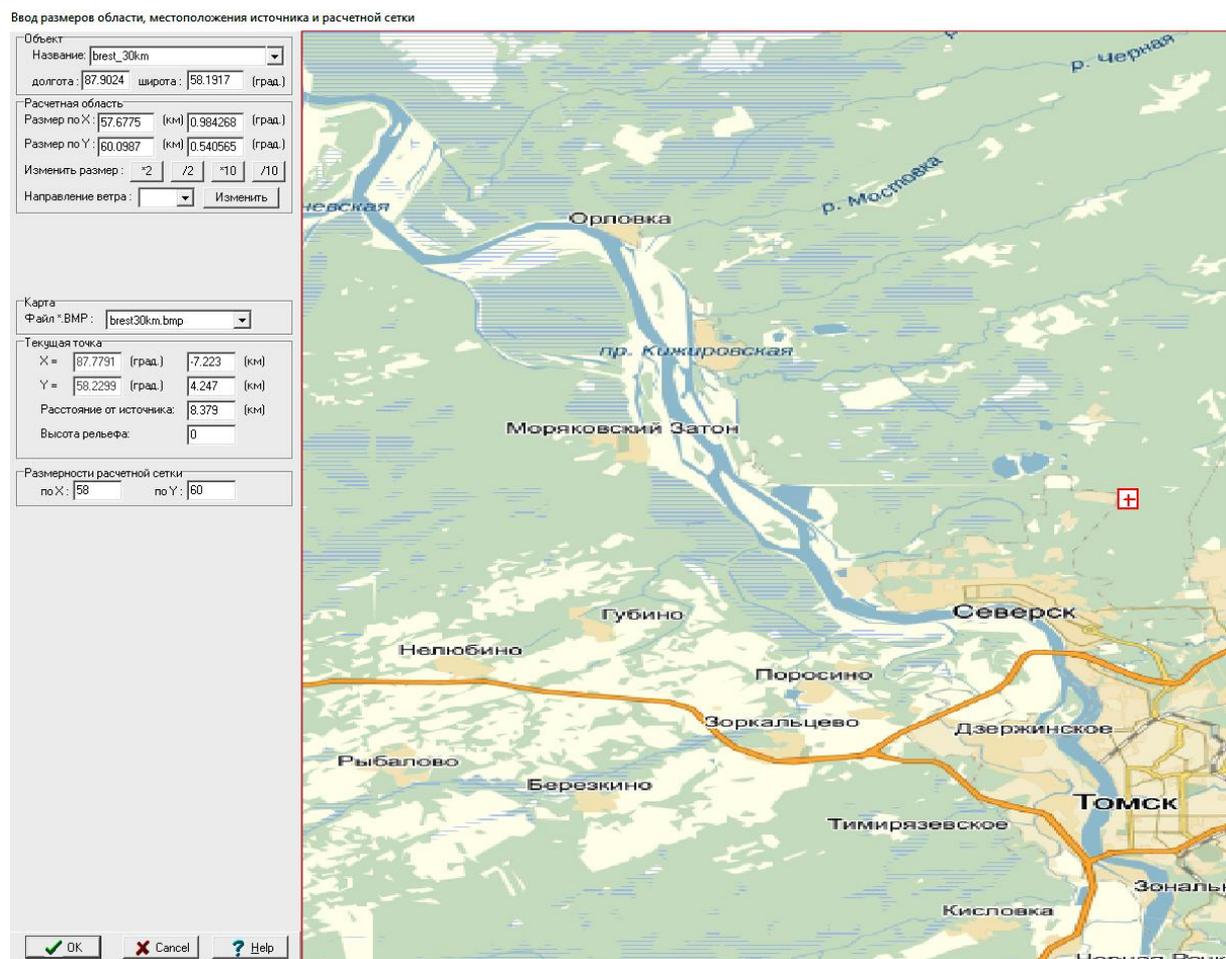


Рисунок 4.2. Вид окна «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки» после сделанных изменений

После всех изменений нажмите на кнопку «ОК». В главном меню выполните команду «Файл→Запись» для записи сделанных изменений в GPR-файл «VOID-BEL-30-KM.GPR».

4.1.4. Источник

Далее выполните команду меню «Источник→Редактирование». Нажмите кнопку «Удалить все» для удаления всех фаз (кроме первой) источника. В таблице фаз источника выброса задайте параметры фазы:

- время начала в столбце «начало» — 0 часов;
- продолжительность фазы «диапазон» — 0,5 часов.
- высота — 100 м.

Далее нажмите кнопку «Группы». В открывшемся окне «Группы» удалите все группы, кроме последней (если их несколько). Введите название единственной группы: «аево» (аэрозоли). Задайте скорость сухого осаждения 0,008 м/с, а постоянную вымывания осадками $2,6 \cdot 10^{-5}$ час/мм/с. Скорость гравитационного осаждения задайте нулевой. Нажмите кнопку «Нуклиды» и в открывшемся одноименном окне задайте список нуклидов, распространяющихся в аэрозольной форме и их активности.

Задайте следующие нуклиды и их активности:

- ^{22}Na — $9,7 \cdot 10^7$ Бк;
- ^{24}Na — $7,3 \cdot 10^{11}$ Бк;
- ^{134}Cs — $3,5 \cdot 10^{12}$ Бк;
- ^{137}Cs — $5,1 \cdot 10^{12}$ Бк.

Окно со списком нуклидов для группы «аево» будет выглядеть, как показано на рисунке 4.3.

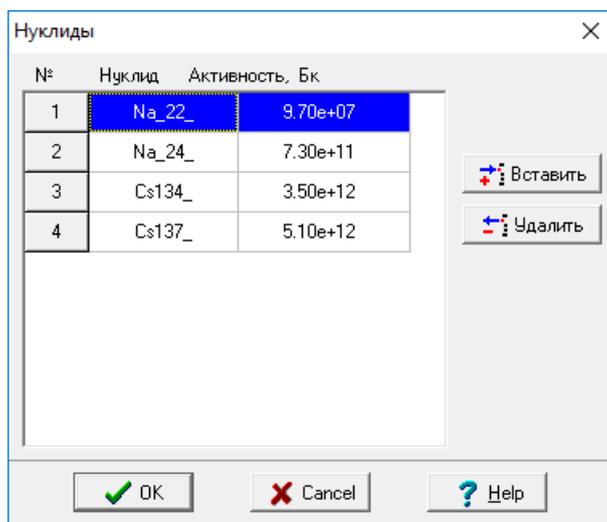


Рисунок 4.3. Окно «Нуклиды» со списком нуклидов группы «аево»

Нажмите кнопку «OK» для сохранения результатов редактирования.

Во вновь активном окне «Группы» нажмите кнопку «Вставить», после чего создастся клон группы «аево». Введите название этой группы «molecular-i» (йод в молекулярной форме). Задайте скорость сухого осаждения 0,02 м/с, а постоянную вымывания $1,3 \cdot 10^{-4}$ час/мм/с. Далее нажмите кнопку «Нуклиды» и в одноименном окне задайте таблицу из двух нуклидов:

- ^{131}I — $2,9 \cdot 10^{12}$ Бк;
- ^{132}I — $3,8 \cdot 10^{10}$ Бк;

Вид окна нуклиды для группы «molecular-i» представлен на рисунке 4.4.

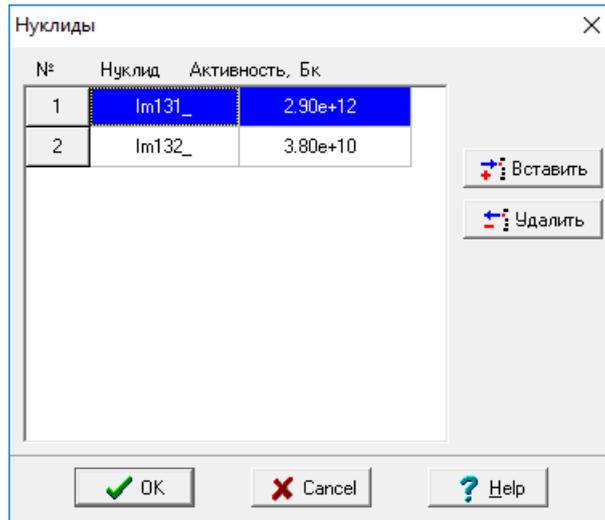


Рисунок 4.4. Окно «Нуклиды» со списком нуклидов группы «molecular-i»

Нажмите кнопку «OK» для записи результатов редактирования нуклидного состава группы «molecular-i».

Создайте последнюю группу для инертных радиоактивных газов. Задайте ей имя «irg», (радиоактивные благородные газы) скорость сухого осаждения и постоянную вымывания задайте равными нулю. Список нуклидов данной группы следующий:

- ^{85}Kr — 10^{15} Бк;
- $^{85}\text{Kr-m}$ — $5,65 \cdot 10^{15}$ Бк;
- ^{87}Kr — $1,9 \cdot 10^{14}$ Бк;
- ^{88}Kr — $2,5 \cdot 10^{15}$ Бк;
- ^{133}Xe — $1,5 \cdot 10^{17}$ Бк;
- ^{135}Xe — $5,65 \cdot 10^{16}$ Бк.

Окно со списком нуклидов группы «irg» показано на рисунке 4.5.

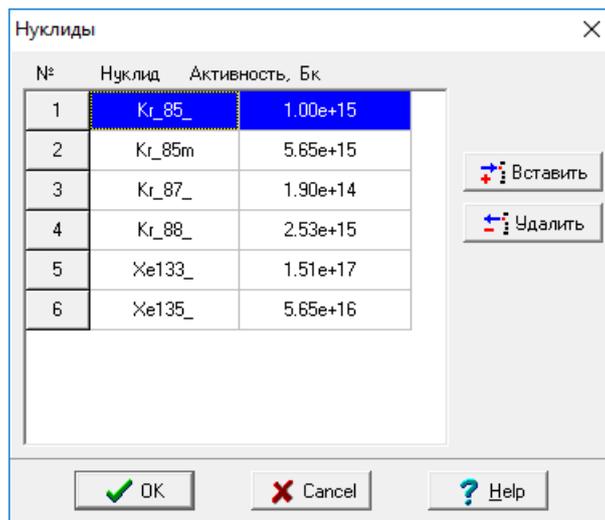


Рисунок 4.5. Окно «Нуклиды» со списком нуклидов группы «irg»

Нажмите кнопку «OK». Окно «Группы» после создания всех трех групп будет выглядеть, как показано на рисунке 4.6.

№	Группа	Активность Бк	Грав.скор. м/сек	Сух.осажд. м/сек	Вымывание час/мм²сек
1	аеро	9.33e+12	0.00e+00	8.00e-03	2.60e-05
2	molecular-i	2.94e+12	0.00e+00	2.00e-02	1.30e-04
3	irg	2.17e+17	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00

Рисунок 4.6. Окно «Группы» со списком групп аварии

Для сохранения результатов необходимо нажать кнопку «ОК» в окне «Группы».

После этого на фоне окна «Ввод параметров источника» появится предупреждающее окно со списком нуклидов, которые участвуют в цепочках распада, но которые не были добавлены в группы фазы.

В данном случае список нуклидов следующий:

- ^{88}Rb ;
- $^{131}\text{Xe-m}$;
- $^{137}\text{Ba-m}$.

Если не добавить эти нуклиды в источник, то доза от них не будет учитываться. Поэтому следует нажать кнопку «ОК» и снова вызвать окно «Группы» для редактирования группового состава.

В группу «аеро» следует добавить нуклиды ^{88}Rb и $^{137}\text{Ba-m}$. Активность этих нуклидов должна быть не значительна, например, 1 Бк. В группу «irg» следует добавить нуклид $^{131}\text{Xe-m}$.

После этого возвращаемся в окно «Ввод параметров источника» и нажимаем кнопку «ОК». Далее стоит записать отредактированные параметры источника в GPR-файл (команда меню «Файл→Записать»).

4.1.5. Параметры счета

Далее введите параметры расчета, вызвав окно «Параметры счета» с помощью команды меню «Распространение→Ввод параметров».

В открывшемся окне во вкладке «Модель-Сетка-Экран» в панели «Модель» задайте шаг интегрирования уравнений по времени — 0,05 часа, а также количество лагранжевых частиц 32,000. В панели «Вывод на экран» задайте периодичность вывода результатов в окнах визуализации — 10 с.

Далее во вкладке «Расчет в ячейке» в панели «Метод расчета концентраций на сетке» выберите вариант «Усредненный по ячейке», а также установите галочку возле метки «Производить билинейную интерполяцию поля...». Далее перейдите во вкладку «Макс. значения» и в верхнем поле введите префикс текстовых файлов, в которых будет рассчитываться зависимость целевых функций от расстояния — «stat».

В многострочном поле для ввода ниже «Расстояние, м» введите несколько расстояний, на которых будут рассчитываться максимальные по углу значения целевых функций: 6000, 12000, 18000 и 24000.

Во вкладке «Разное» введите эффективный фактор экранирования 0,7. Этот фактор будет использован как множитель в формуле расчета доз облучения от загрязненной поверхности. Для сельской местности рекомендуемое значение этого фактора равно 0,7, а для городских условий — 0,4.

Далее нажмите кнопку «ОК» и выполните команду меню «Файл→Запись» для фиксации изменений в текущем GPR-файле.

4.1.6. Задание целевых функций

Далее настраивается множество целевых функций.

Для этого выполните команду меню «Окно→Создать окно» и в появившемся окне «Задание расчетной функции» настройте создаваемое окно на отображение проинтегрированной по времени приземной концентрации всех нуклидов. Такое окно будет выглядеть, как показано на рисунке 4.7.

Рисунок 4.7. Окно «Задание расчетной функции» для проинтегрированной по времени концентрации

Рисунок 4.8. Окно «Задание расчетной функции» для выпадений

Нажмите «ОК» и на фоне основного окна кода РОМ появится дополнительное окно с заголовком «Интеграл (TIC)...». Можно откорректировать размер окна с помощью «мыши».

Далее создайте окно для визуализации выпадений всех нуклидов на момент окончания расчета (выхода всех частиц за пределы расчетной области). Окно «Задание расчетной функции» будет иметь вид, представленный на рисунке 4.8.

Далее создайте окно для визуализации эффективной дозы облучения от облака от всех нуклидов. Окно «Задание расчетной функции» будет иметь вид, представленный на рисунке 4.9.

Создайте окно для визуализации дозы от поверхности от всех нуклидов в выбросе через 10 суток после выхода всех частиц за пределы расчетной области (рисунок 4.10).

Рисунок 4.9. Окно «Задание расчетной функции» для эффективной дозы от облака

Рисунок 4.10. Окно «Задание расчетной функции» для эффективной дозы от поверхности через 10 суток после ухода радиоактивного облака за пределы расчетной области

Рисунок 4.11. Окно «Задание расчетной функции» для эффективной дозы от ингаляции от всех нуклидов для лиц в возрасте от 2 до 7 лет

Рисунок 4.12. Окно «Задание расчетной функции» для годовой эффективной дозы от пищевых цепочек от всех нуклидов для взрослых

Создайте окно для визуализации эффективной дозы от ингаляции, от всех нуклидов, для лиц в возрасте от 2 до 7 лет (рисунок 4.11).

Далее создайте окно для визуализации эффективной дозы от пищевых цепочек от всех нуклидов для взрослых за 1 год потребления продуктов питания, выращенных на загрязненной территории (рисунок 4.12).

Главное окно кода ROM будет иметь вид, представленный на рисунке 4.13

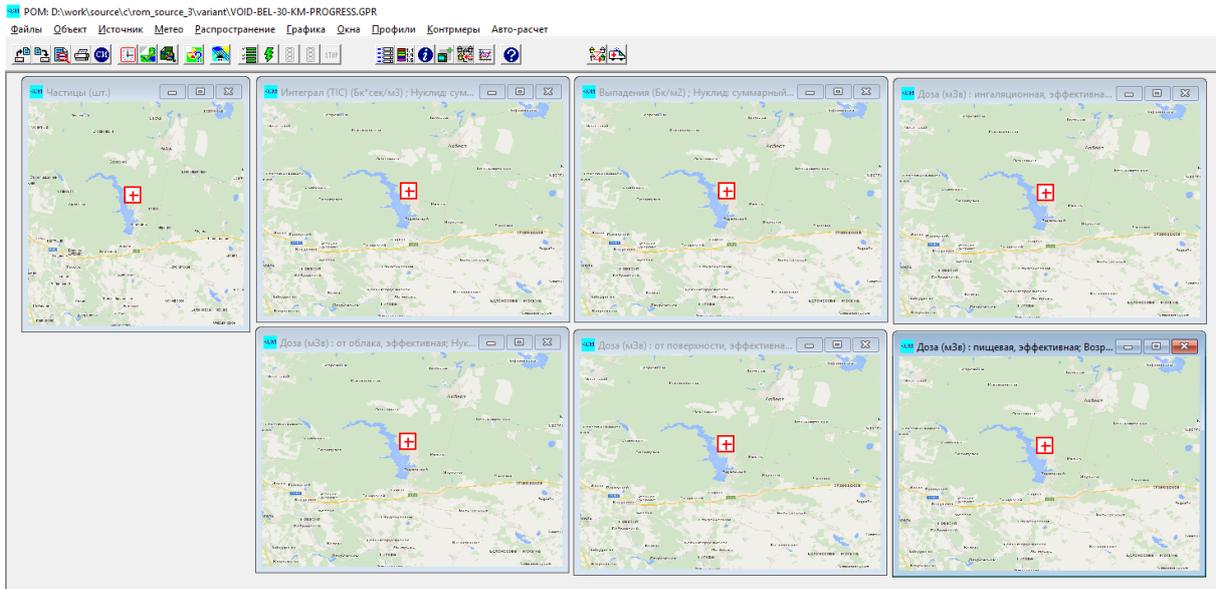


Рисунок 4.13. Вид главного окна кода ROM после создания целевых функций

На этом создание расчетных функций заканчивается.

4.1.7. Параметры Авторасчета

На следующем шаге задайте режим расчета и его параметры. Для этого выполните команду меню «Авторасчет». Появится окно «Параметры Авторасчета». В верхней части окна нужно выбрать «Серийный расчет».

В панели «Осадки (серийный расчет)» введите интенсивность осадков 1 мм/час, а тип осадков — «ливень».

Перейдите в панель «Метеопараметры (серийный расчет)». В список скоростей вставьте четыре значения: 0,5; 1; 2; 3. В список шероховатостей вставьте одно значение — 0,1 м. В список классов устойчивости вставьте все возможные классы устойчивости: A, B, C, D, E, F, G. Направление ветра не варьируется, поэтому задайте его одним числом, равным 137°.

После всех введенных данных окно «Параметры Авторасчета» будет иметь вид, показанный на рисунке 4.14.

После всех изменений нужно нажать кнопку «Да».

4.1.8. Запуск на счет и получение результатов

После этого программа готова к запуску. Для запуска на счет нажмите кнопку . Длительность счета составит несколько минут. Полное количество расчетов 28.

Далее требуется настроить палитру для отображения двумерных полей в окнах визуализации. Выберите окно «Интеграл...» и выполните команду меню «Графика→Установка линий уровня». Появится окно настройки палитры «Линии уровня».

В этом окне нажмите кнопку «Загрузить цвета» и в открывшемся стандартном диалоге выбора файла выберите файл «clr.rgblist» и нажмите «ОК».

Параметры авто-расчета

Режим расчёта P0:

Обычный

Серийный расчёт

Расчёт со сдвигом по метеофазам

Нормальная эксплуатация

Осадки (серийный счёт)

тип: ливень

интенсивность, мм/час: 1

Метеопараметры (серийный счёт)

Список скоростей, м/с: 0.5 1 2 3

Список шероховатостей, м: 0.1

Список классов устойчивости: a b c d e f g

Список напр-й ветра: 137

Период учёта изменчивости погоды, дней: (для расчёта со сдвигом по метеофазам) 1

Да Отмена

Рисунок 4.14. Окно «Параметры Авторасчета» с введенными параметрами Авторасчета

Далее нажмите кнопку «Задать уровни». Появится окно «Уровни». В этом окне введите минимальное отображаемое значение «1000», а максимальное « $1e+12$ » в соответствии с максимальным значением проинтегрированной по времени концентрации. Тип шкалы (здесь и далее везде) выберите степенной.

Окно «Линии уровня» после сделанных изменений приведено на рисунке 4.15.

Линии уровня

Функция: Интегр.(TIC), Бк*сек/м3 Минимум: 0.000e+00 Максимум: 1.072e+12

Число уровней: 69 1.000e+03

Частота показа: 2

(толщина линий)

Форма отображения функции

заполнение

контуры

Уровни

Задать уровни: *10 /10

Загрузить цвета Сохранить цвета

OK Cancel Help

Рисунок 4.15. Окно «Линии уровня» для окна визуализации «Интеграл...»

После нажатия на кнопку «OK» двумерное поле целевой функции «Интеграл...» должно иметь вид, представленный на рисунке 4.16.

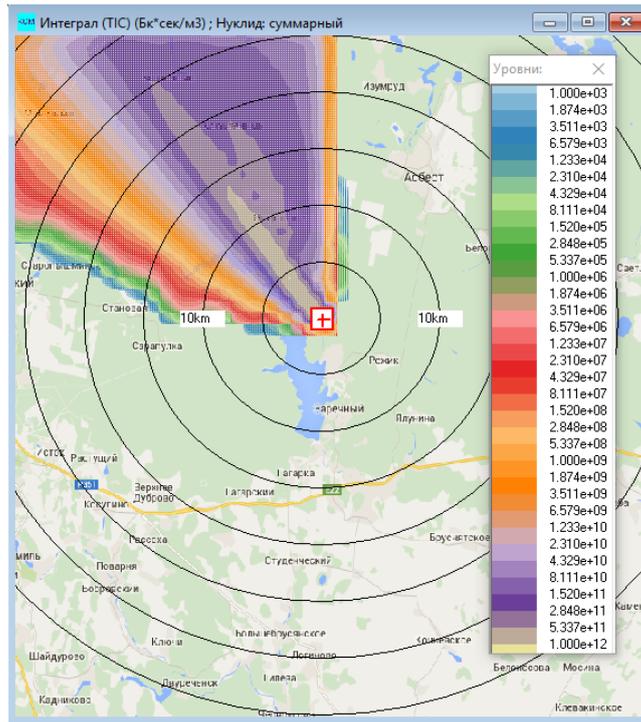


Рисунок 4.16. Окно визуализации проинтегрированной по времени концентрации всех нуклидов

Сделайте активным окно «Выпадения...» и настройте линии уровня для этого окна визуализации. Для этого вызовите окно «Линии уровня» и загрузите ту же цветовую схему, что и для проинтегрированной по времени концентрации.

Вызовите окно «Уровни», в котором введите минимальное отображаемое значение «100», а максимальное «1e+8» в соответствии с максимальным значением выпадений всех нуклидов.

Вид окна с выпадениями всех нуклидов источника в аэрозольной форме представлен на рисунке 4.17.

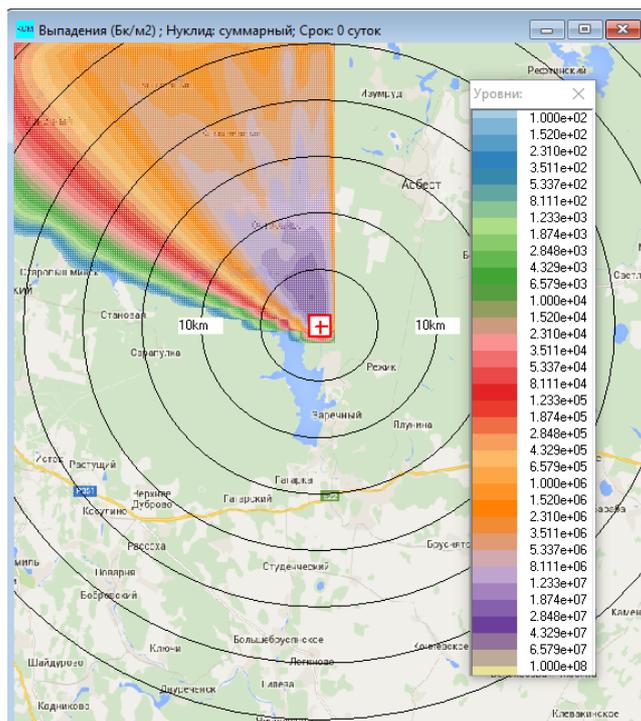


Рисунок 4.17. Окно визуализации выпадений всех нуклидов

Далее активируйте окно с ингаляционной дозой и вызовите для него окно «Линии уровня». Загрузите ту же палитру и настройте шкалу: минимальное значение задайте равным « $1e-4$ », максимальное — « $2e-1$ » (мЗв).

Вид окна с дозой от ингаляции приведен на рисунке 4.18.

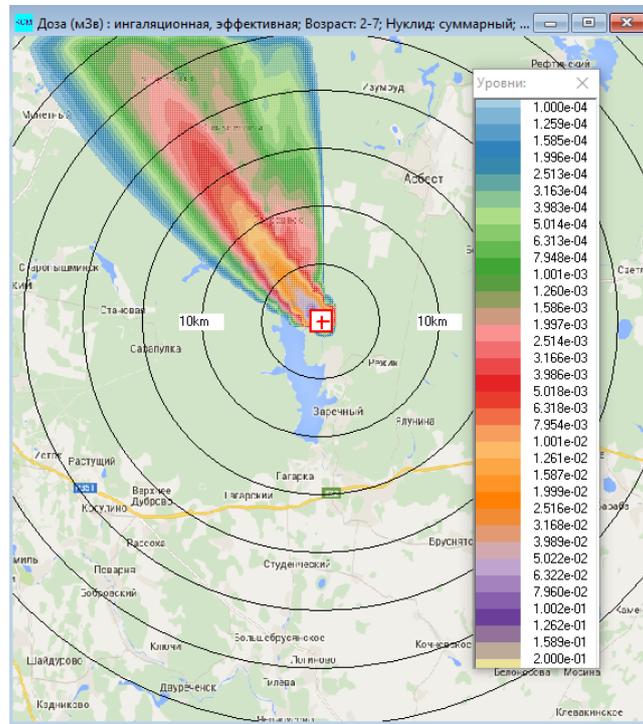


Рисунок 4.18. Окно визуализации дозы от ингаляции

Активируйте окно с дозой от облака и настройте линии уровня: загрузите палитру из файла «clr.rgblist». Настройте минимальное и максимальное значение: « $1e-3$ » и «6» (мЗв) (рисунок 4.19).

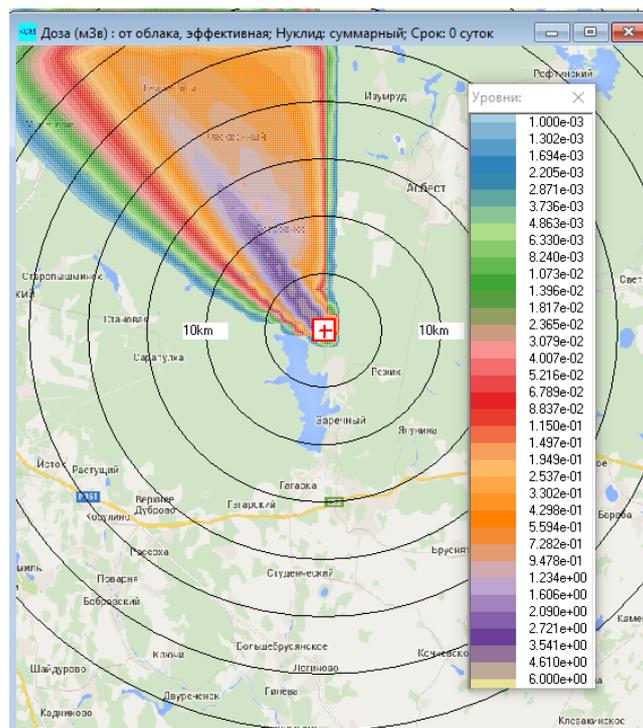


Рисунок 4.19. Окно визуализации дозы от облака

Активируйте окно с дозой от поверхности через 10 суток после ухода облака. Загрузите цветовую палитру из файла «clr.rgblist» и задайте минимальное и максимальные значения: «1e-3» и «2» (мЗв).

Окно с полем дозы от поверхности спустя 10 суток представлено на рисунке 4.20.

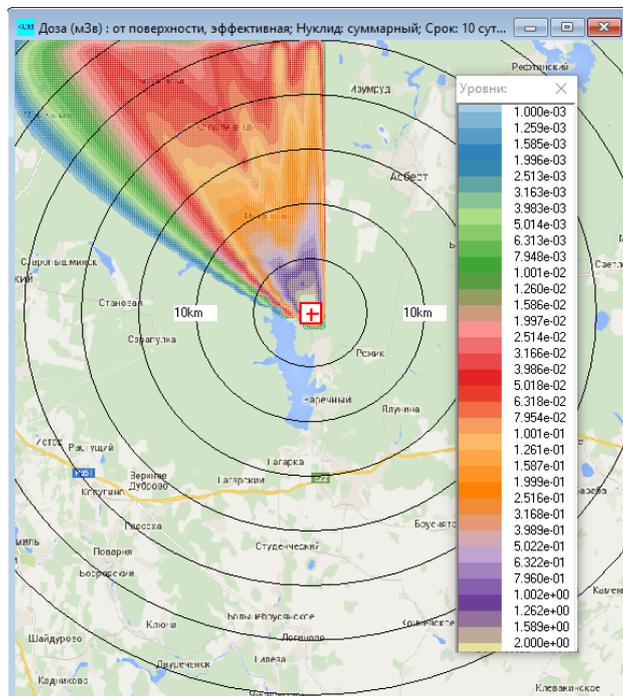


Рисунок 4.20. Окно визуализации дозы от поверхности

Активируйте окно с пищевой дозой и настройте линии уровня. Загрузите цветовую палитру из файла «clr.rgblist», после чего задайте минимальное и максимальные значения: «1» и «700» (мЗв).

Вид окна пищевой дозы представлен на рисунке 4.21.

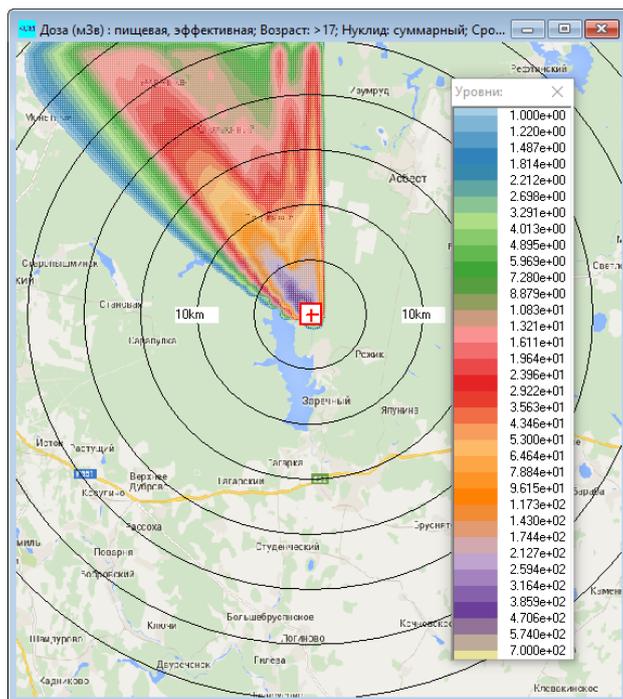


Рисунок 4.21. Окно визуализации пищевой дозы

4.1.9. Зависимость максимальных значений целевых функций от расстояния

Теперь проанализируем числовые данные. В корневом каталоге с кодом РОМ были созданы файлы «stat_*.txt». Поочередно откройте эти файлы и просмотрите их содержимое. На рисунке 4.22 представлено совокупное содержание всех созданных файлов.

# Интеграл (ТIC) (Бк*сек/м3) ; Нуклид: суммарный					
6000.0	0.50	E	0.10000	137.0	7.68111e+11
12000.0	0.50	E	0.10000	137.0	7.23226e+11
18000.0	0.50	E	0.10000	137.0	3.99810e+11
24000.0	0.50	E	0.10000	137.0	2.92337e+11
# Выпадения (Бк/м2) ; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток					
6000.0	2.00	F	0.10000	137.0	4.52954e+07
12000.0	2.00	F	0.10000	137.0	2.33134e+07
18000.0	3.00	G	0.10000	137.0	1.87057e+07
24000.0	2.00	G	0.10000	137.0	9.97129e+06
# Доза (Зв) : от облака, эффективная; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток					
6000.0	0.50	E	0.10000	137.0	3.28723e-03
12000.0	0.50	E	0.10000	137.0	2.66716e-03
18000.0	0.50	E	0.10000	137.0	1.30710e-03
24000.0	0.50	E	0.10000	137.0	8.43879e-04
# Доза (Зв) : ингаляционная, эффективная; Возраст: 2-7; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток					
6000.0	2.00	D	0.10000	137.0	4.94363e-05
12000.0	2.00	E	0.10000	137.0	1.91276e-05
18000.0	3.00	E	0.10000	137.0	1.49114e-05
24000.0	3.00	E	0.10000	137.0	3.46075e-06
# Доза (Зв) : от поверхности, эффективная; Нуклид: суммарный; Срок: 10 суток					
6000.0	0.50	G	0.10000	137.0	7.15393e-04
12000.0	2.00	G	0.10000	137.0	3.07818e-04
18000.0	2.00	G	0.10000	137.0	1.79743e-04
24000.0	2.00	G	0.10000	137.0	1.09398e-04
# Доза (Зв) : пищевая, эффективная; Возраст: >17; Нуклид: суммарный; Срок: 366 суток					
6000.0	2.00	D	0.10000	137.0	2.28603e-01
12000.0	2.00	E	0.10000	137.0	1.03147e-01
18000.0	3.00	E	0.10000	137.0	8.13705e-02
24000.0	2.00	G	0.10000	137.0	3.35230e-02

Рисунок 4.22. Совокупное содержание всех файлов «stat*.txt»

В первой строчке каждого файла содержится описание целевой функции и единиц измерения. Заметим, что вывод зависимости целевых функций от расстояния осуществляется в системе единиц СИ.

В первом столбце содержится расстояние, во втором, третьем, четвертом и пятом представлены значения скорости ветра, класса стабильности атмосферы, шероховатости и направления ветра соответственно, при которых достигается наибольшее значение целевой функции на заданном расстоянии от источника.

4.2. Многовариантный расчет с использованием реальных временных метеорологических рядов

Рассмотрим условную аварию на реакторе БН-600 «Перекрытие проходного сечения одной ТВС» длительностью трое суток.

Условный суммарный выброс за трое суток через венттрубу приведен в таблице 4.2.

Таблица 4.2. Условный суммарный выброс нуклидов через венттрубу за трое суток

Нуклид	Выброс в атмосферу, Бк
^{137}Cs	$3,90 \cdot 10^8$
^{134}Cs	$2,40 \cdot 10^8$

Окончание табл. 4.2.

Нуклид	Выброс в атмосферу, Бк
^{131}I	$7,10 \cdot 10^7$
^{132}I	$7,60 \cdot 10^6$
^{133}Xe	$1,35 \cdot 10^{14}$
^{135}Xe	$4,30 \cdot 10^{13}$
$^{85}\text{Kr-m}$	$3,20 \cdot 10^{12}$
^{88}Kr	$5,40 \cdot 10^{12}$
^{87}Kr	$1,80 \cdot 10^{12}$
^{85}Kr	$5,10 \cdot 10^{11}$
^{24}Na	$1,20 \cdot 10^9$
^{22}Na	$2,50 \cdot 10^5$

4.2.1. Авария

После выполнения теста «VOID-BEL-30-KM.GPR» выйдите из кода POM и запустите его снова. Настоятельно рекомендуется после решения каждого варианта перезапускать код POM.

Сохраните текущий вариант под именем «ACCIDENT1-BEL.GPR», после чего сохраните этот вариант под именем «ACCIDENT2-BEL.GPR».

С помощью команды меню «Объект→Авария» вызовите окно редактирования информации об аварии. Во вкладке «Дата» проставьте дату: 15 июля 2012 года, 06:00. Максимальную продолжительность прогноза поставьте равной 1000 часов. Во вкладке «Описание» введите псевдоним аварии «bn-600-assident-2», а также «Описание аварии»: «Перекрытие проходного сечения одной ТВС». Вид окна «Авария» представлен на рисунке 4.23.

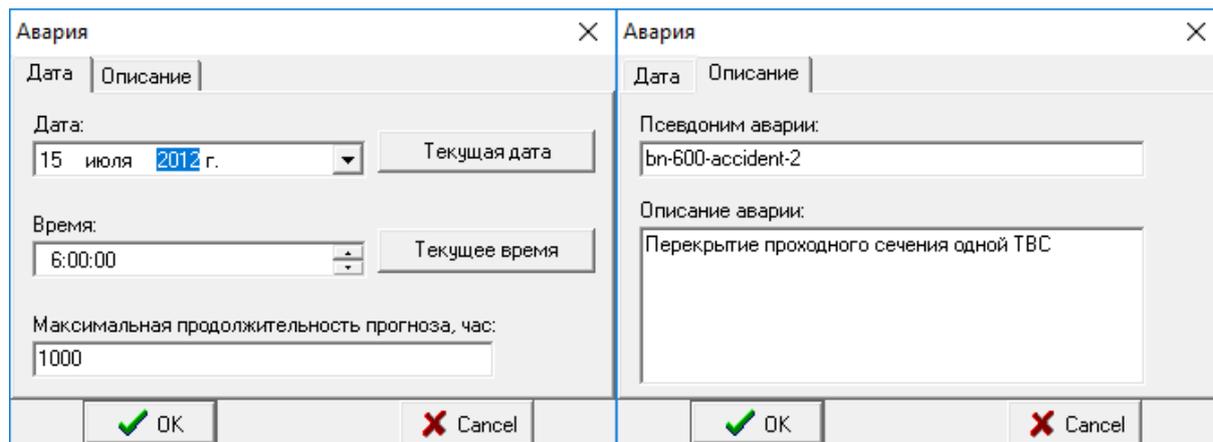


Рисунок 4.23. Вид окна «Авария» после сделанных изменений

Нажмите кнопку «ОК».

4.2.2. Местоположение объекта

Местоположение объекта, расчетная область, расчетная сетка и карта-подложка в данной задаче такие же, как и в предыдущей задаче (см. подраздел 4.1), поэтому вызывать окно «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки» не будем.

4.2.3. Источник

Настроим параметры источника. Выполните команду меню «Источник→Редактирование». В таблице фаз источника выброса задайте параметры фазы:

- время начала в столбце «начало» — 0 часов;
- продолжительность фазы «диапазон» — 72 часа;
- высота — 100 м.

Далее нажмите кнопку «Группы». В открывшемся окне «Группы» групповой состав не меняем, так как он такой же, как и в предыдущем варианте (см. подраздел 4.1). Активируйте группу «аево» и нажмите кнопку «Нуклиды» и в открывшемся одноименном окне отредактируйте суммарные активности нуклидов, распространяющихся в аэрозольной форме. Для имеющихся нуклидов задайте следующие активности:

- ^{22}Na — $2,5 \cdot 10^5$ Бк;
- ^{24}Na — $1,2 \cdot 10^9$ Бк;
- ^{134}Cs — $2,4 \cdot 10^8$ Бк;
- ^{137}Cs — $3,9 \cdot 10^8$ Бк.

Нуклиды — продукты распада оставьте без изменений. Окно со списком нуклидов для группы «аево» будет выглядеть, как показано на рисунке 4.24.

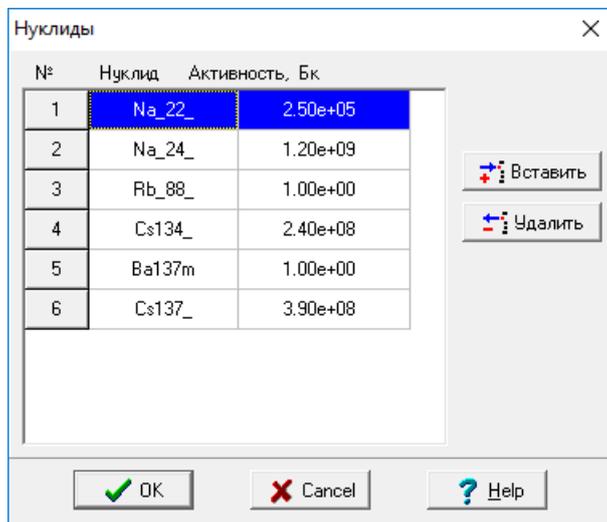


Рисунок 4.24. Окно «Нуклиды» со списком нуклидов группы «аево»

Нажмите кнопку «ОК» для сохранения результатов редактирования.

Во вновь активном окне «Группы» выберите группу «molecular-i» и нажмите кнопку «Нуклиды». В одноименном окне задайте активности двух йодов:

- $^{131}\text{I}_m$ — $2,9 \cdot 10^{12}$ Бк;
- $^{132}\text{I}_m$ — $3,8 \cdot 10^{10}$ Бк;

Вид окна нуклиды для группы «molecular-i» представлен на рисунке 4.25.

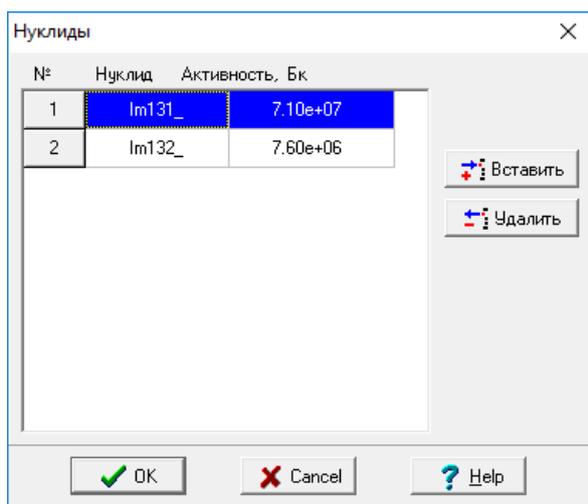


Рисунок 4.25. Окно «Нуклиды» со списком нуклидов группы «molecular-i»

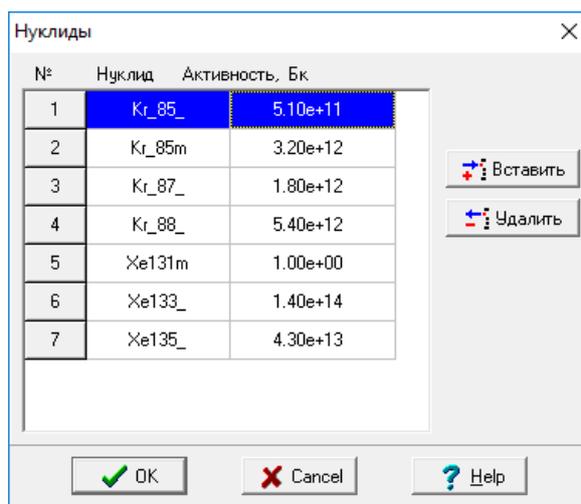


Рисунок 4.26. Окно «Нуклиды» со списком нуклидов группы «irg»

Нажмите кнопку «OK» для записи результатов редактирования нуклидного состава группы «molecular-i».

Активируйте группу «irg» и задайте активности нуклидов в этой группе:

- ^{85}Kr — $5,1 \cdot 10^{11}$ Бк;
- $^{85}\text{Kr-m}$ — $3,2 \cdot 10^{12}$ Бк;
- ^{87}Kr — $1,8 \cdot 10^{12}$ Бк;
- ^{88}Kr — $5,4 \cdot 10^{12}$ Бк;
- ^{133}Xe — $1,4 \cdot 10^{14}$ Бк;
- ^{135}Xe — $4,3 \cdot 10^{13}$ Бк.

Дочерние нуклиды оставляем неизменными. Окно со списком нуклидов группы «irg» показано на рисунке 4.26.

Нажмите кнопку «OK». Окно «Группы» после создания всех трех групп будет выглядеть, как показано на рисунке 4.27.

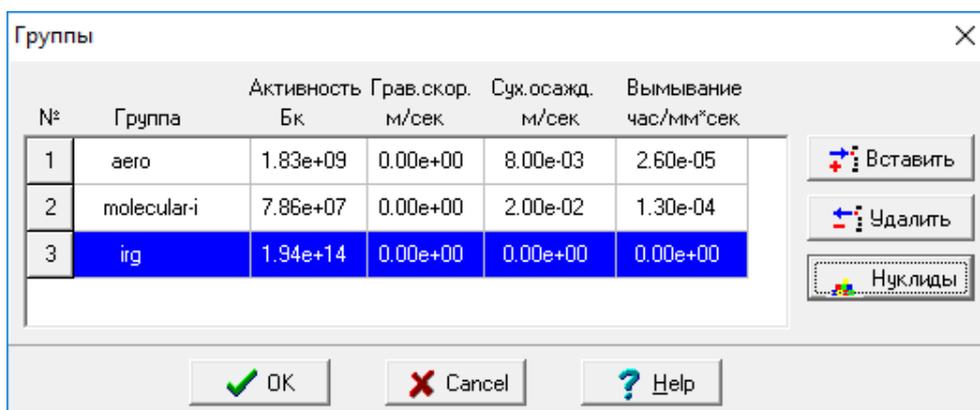


Рисунок 4.27. Окно «Группы» со списком групп аварии

Для сохранения результатов необходимо нажать кнопку «OK» в окне «Группы».

Как видим, наш источник состоит из одной временной ступеньки, длительность которой равна 72 часам. В данном упражнении мы пытаемся освоить проведение расчета с использованием реальных временных рядов метеопараметров. Такого типа расчеты предполагают проведение множества расчетов со смещением момента начала аварии. В таком режиме расчета для экономии вычислительных ресурсов применяется так называемая методика «исключения повторных вычислений», в которой предполагается, что источник состоит из последовательных идущих друг за другом трехчасовых ступенек с одинаковыми групповыми составами (см. пункт 3.9.3). Деление источника на трехчасовые интервалы обуславливается трехчасовым периодом записи метеопараметров.

Поэтому выполним разделение источника на 24 трехчасовых интервала. Делается это с помощью кнопки «Разделить» окна «Ввод параметров источника» (рисунок 4.28).

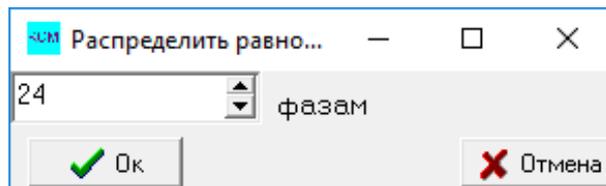


Рисунок 4.28. Окно «Распределить равномерно»

В поле слева от метки «фазам» введите «24» и нажмите кнопку «ОК». Тогда в окне «Ввод параметров источника» отобразится временной сценарий, в котором весь выброс разделен на 24 одинаковых фазы длительностью три часа. На рисунке 4.29 представлено окно «Ввод параметров источника» после нажатия на кнопку «ОК» окна «Распределить равномерно».

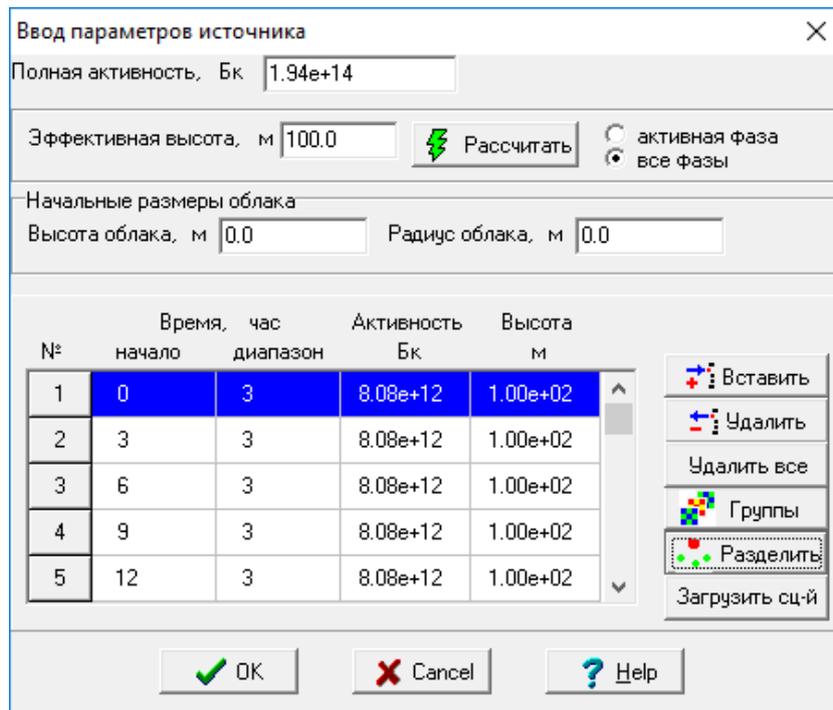


Рисунок 4.29. Окно «Ввод параметров источника»

После этого возвращаемся в окно «Ввод параметров источника» и нажимаем кнопку «ОК». Далее стоит записать отредактированные параметры источника в GPR-файл (команда меню «Файл→Записать»).

4.2.4. Параметры счета

Далее введем параметры расчета, вызвав окно «Параметры счет» с помощью команды меню «Распространение→Ввод параметров».

В открывшемся окне во вкладке «Модель-Сетка-Экран» в панели «Модель» зададим шаг интегрирования уравнений по времени — 0,05 часа, а также количество лагранжевых частиц 288,000 (по 12,000 частиц на каждый трехчасовой интервал источника).

Далее во вкладке «Расчет в ячейке» в панели «Метод расчета концентраций на сетке» выставим вариант «Усредненный по ячейке», а также выставим галочку возле метки «Производить билинейную интерполяцию поля...». Далее перейдем во вкладку «Макс. значения» и в верхнем поле введем префикс текстовых файлов, в которых будет рассчитываться зависимость целевых функций от расстояния — «stat».

В многострочном поле для ввода ниже «Расстояние, м» введем несколько расстояний, на которых будут рассчитываться максимальные по углу значения целевых функций: 6000, 12000, 18000 и 24000.

Во вкладке «Разное» введем эффективный фактор экранирования 0,7. Этот фактор будет использован как множитель в формуле расчета доз облучения от загрязненной поверхности. Для сельской местности рекомендуемое значение этого фактора равно 0,7. А для городских условий — 0,4.

Далее нажимаем кнопку «ОК» и выполняем команду меню «Файл→Запись» для фиксации изменений в текущем GPR-файле.

4.2.5. Задание целевых функций

Целевые функции уже были заданы в предыдущем варианте, описанном в пункте 4.1.6, и сохранились в текущем GPR-файле «ACCIDENT2-BEL.GPR», так как он является копией файла «ACCIDENT1-BEL.GPR» за исключением уже проделанных изменений.

4.2.6. Параметры Авторасчета

На следующем шаге зададим режим расчета и его параметры. Для этого выполним команду меню «Авторасчет». Появится окно «Параметры Авторасчета». В верхней части окна нужно выбрать «Расчет со сдвигом по метеофазам».

В нижней части окна зададим единственный параметр, который требуется задать в этом окне в данном режиме счета: «Период учета изменчивости, дней». Зададим этот параметр равным 3 дням. Далее нажмем кнопку «Да».

4.2.7. Ввод метеоданных

Последнее, что нужно сделать для корректного проведения многовариантного расчета со сдвигом момента начала выброса, — это задание реального сценария изменчивости. Выполните команду меню «Метео→Локальная погода». В открывшемся окне «Ввод метеоданных» нажмите кнопку «Из файла» и в открывшемся диалоге выбора файла загрузите файл «database/bel-assident2.mpl». Вид окна «Ввод метеоданных» после загрузки метеосценария показан на рисунке 4.30.

С помощью текстового редактора откройте файл «database/synoptic.mpl», начало файла представлено на рисунке 4.31.

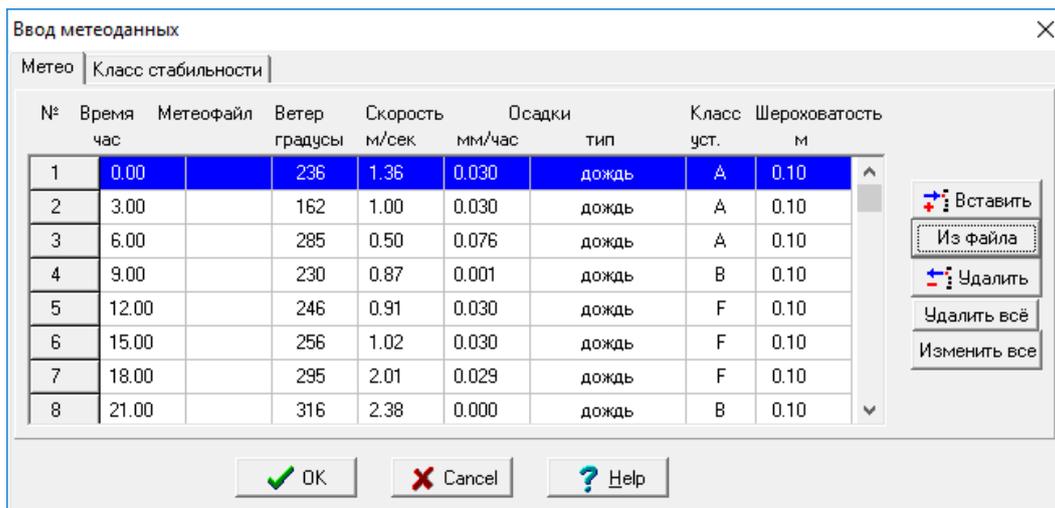


Рисунок 4.30. Окно «Ввод метеоданных» после загрузки метеосценария

Файл, показанный на рисунке 4.31 и загруженный в качестве метеосценария для расчета, состоит из 64 трехчасовых отрезков. Начинаются отрезки с 15.07.2012 09:00. Обратите внимание, что дата начала выброса, заданная нами в окне «Авария», — 15.07.2012 06:00. Это связано с тем, что на метеостанциях каждые три часа дается набор метеопараметров за прошедший трехчасовой интервал. Таким образом, момент начала выброса должен быть на три часа раньше начальной даты данных в файле MPL.

В описываемом режиме расчета параметров радиационной обстановки производится множество расчетов, поэтому момент начала аварии, заданный в окне «Авария», является настоящим моментом начала выброса только для первого расчета. В последующих расчетах дата начала выброса будет смещаться на три часа вперед относительно предыдущего расчета. Соответственно начальная фаза метеосценария, с которой стартует расчет, также будет смещаться вперед на три часа.

Для записи результатов редактирования метеопараметров нажмите кнопку «ОК».

```

# PREC_TTYPE:
# simple_rain
# thunderstorm
# snow_and_rain
# shower
# simple_snow
# fog_or_drizzle
# STAB_CLASS:
# A, B,...G
# DATE          REL_HOUR      WIND_MAG      WIND_DIR      PREC_RATE      PREC_TYPE      STAB_CLASS     ROUHG
15.07.2012 09:00  30993         1.36          236            0.030          simple_rain    A             0.10
15.07.2012 12:00  30996         1.00          162            0.030          simple_rain    A             0.10
15.07.2012 15:00  30999         0.50          285            0.076          simple_rain    A             0.10
15.07.2012 18:00  31002         0.87          230            0.001          simple_rain    B             0.10
15.07.2012 21:00  31005         0.91          246            0.030          simple_rain    F             0.10
16.07.2012 00:00  31008         1.02          256            0.030          simple_rain    F             0.10
16.07.2012 03:00  31011         2.01          295            0.029          simple_rain    F             0.10
16.07.2012 06:00  31014         2.38          316            0.000          simple_rain    B             0.10
16.07.2012 09:00  31017         2.94          307            0.000          simple_rain    B             0.10
16.07.2012 12:00  31020         2.01          327            0.000          simple_rain    A             0.10
16.07.2012 15:00  31023         1.08          12             0.000          simple_rain    A             0.10
16.07.2012 18:00  31026         0.50          133            0.000          simple_rain    B             0.10
16.07.2012 21:00  31029         1.35          140            0.000          simple_rain    F             0.10
17.07.2012 00:00  31032         0.91          103            0.000          simple_rain    G             0.10
17.07.2012 03:00  31035         1.12          136            0.002          simple_rain    G             0.10
17.07.2012 06:00  31038         1.42          178            0.306          simple_rain    B             0.10
17.07.2012 09:00  31041         2.72          196            0.116          simple_rain    A             0.10
17.07.2012 12:00  31044         0.71          51             0.315          simple_rain    B             0.10
17.07.2012 15:00  31047         0.86          43             0.129          simple_rain    B             0.10
17.07.2012 18:00  31050         0.93          71             0.210          simple_rain    C             0.10
17.07.2012 21:00  31053         1.20          113            0.114          simple_rain    D             0.10
18.07.2012 00:00  31056         0.50          168            0.089          simple_rain    G             0.10
18.07.2012 03:00  31059         1.10          131            0.071          simple_rain    F             0.10
18.07.2012 06:00  31062         2.14          182            0.103          simple_rain    B             0.10
18.07.2012 09:00  31065         3.09          170            0.106          simple_rain    B             0.10
18.07.2012 12:00  31068         4.02          179            0.141          simple_rain    B             0.10
18.07.2012 15:00  31071         1.55          198            0.132          simple_rain    B             0.10
18.07.2012 18:00  31074         1.80          185            0.193          simple_rain    C             0.10
18.07.2012 21:00  31077         0.75          191            0.024          simple_rain    F             0.10

```

Рисунок 4.31. Текстовый файл «synoptic.mpl»

Запишите данные в GPR-файл, выполнив команду меню «Файл→Запись».

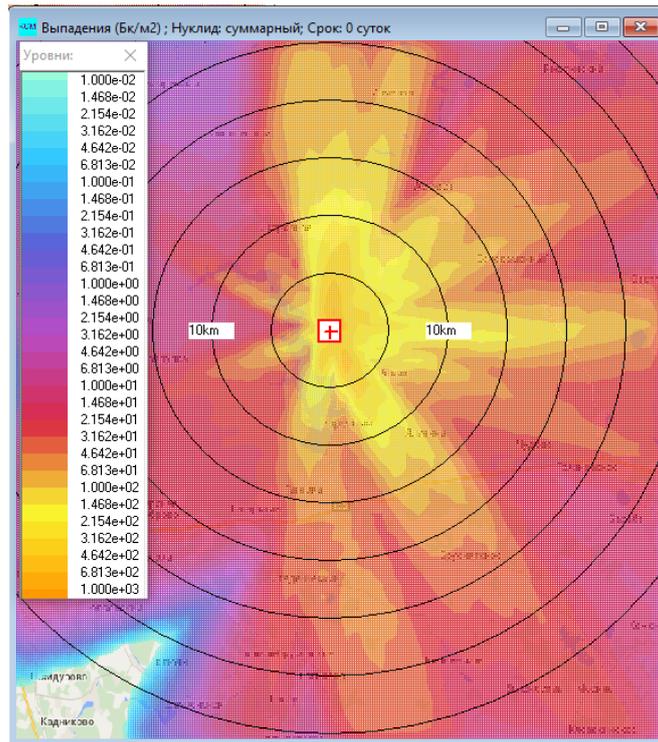


Рисунок 4.33. Окно визуализации выпадений всех нуклидов

Далее активируйте окно с ингаляционной дозой и вызовите для него окно «Линии уровня». Загрузите палитру из файла «palitra/default.rgblist». Минимальное значение задайте равным «1e-9», максимальное — «6e-6» (мЗв). Вид окна с дозой от ингаляции приведен на рисунке 4.34.

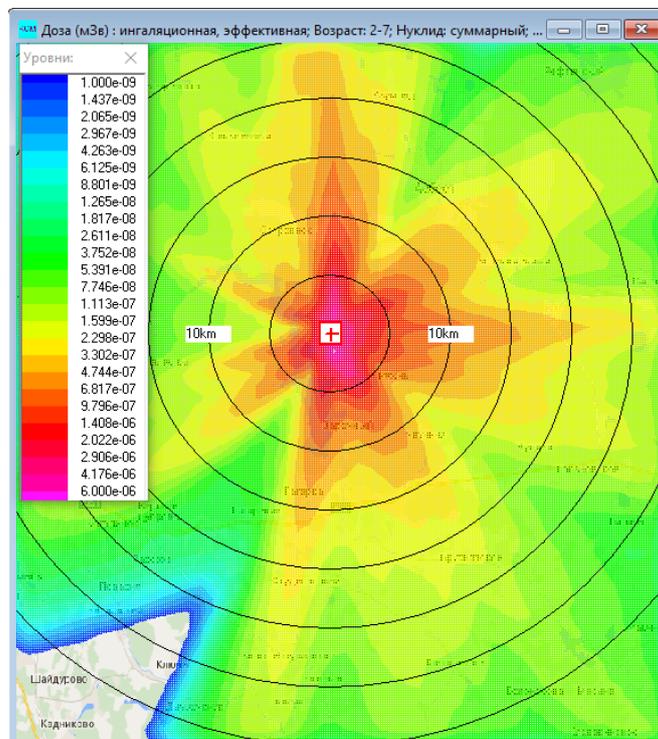


Рисунок 4.34. Окно визуализации дозы от ингаляции

Активируйте окно с дозой от облака и настройте линии уровня. Загрузите палитру «palitra/cloud.rgblist». Задайте минимальное и максимальное значение: « $1e-7$ » и « $4e-4$ » (мЗв). Окно с дозой от облака представлено на рисунке 4.35.

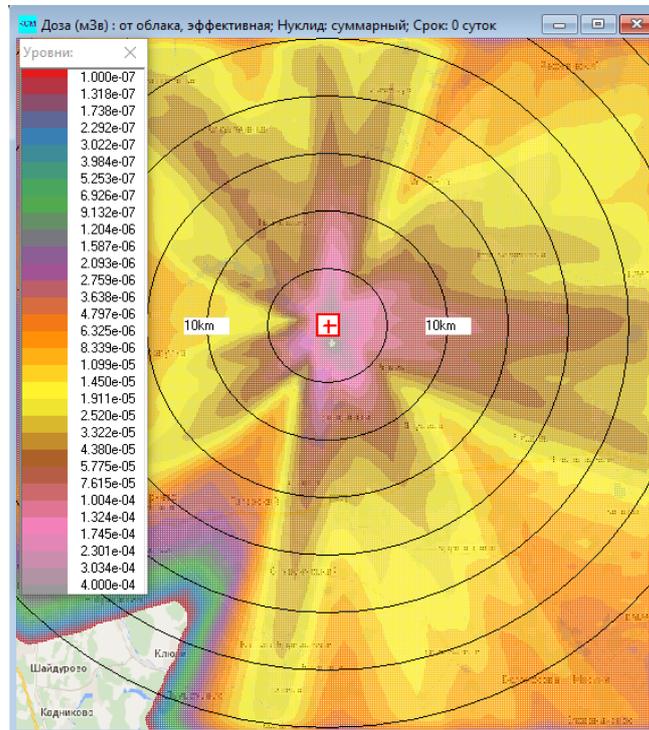


Рисунок 4.35. Окно визуализации дозы от облака

Активируйте окно с дозой от поверхности через 10 суток после ухода облака. Загрузите палитру «palitra/dsurf.rgblist». Задайте минимальное и максимальное значение: « $5e-9$ » и « $1.1e-4$ » (мЗв). Окно с полем дозы от поверхности спустя 10 суток представлено на рисунке 4.36.

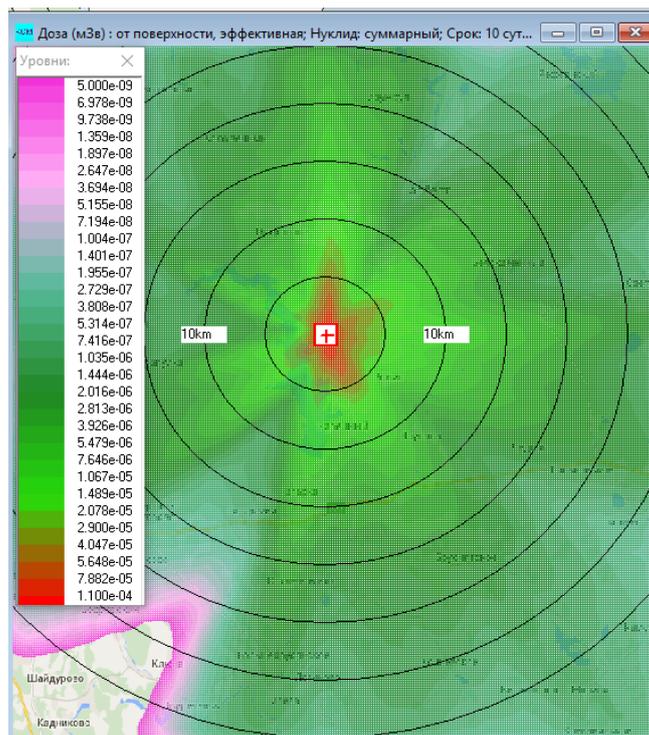


Рисунок 4.36. Окно визуализации дозы от поверхности

Активируйте окно с пищевой дозой и настройте линии уровня. Загрузите палитру «palitra/clr.rgblist». Задайте минимальное и максимальное значения: « $8e-7$ » и « $4e-3$ » (мЗв). Вид окна пищевой дозы представлен на рисунке 4.37.

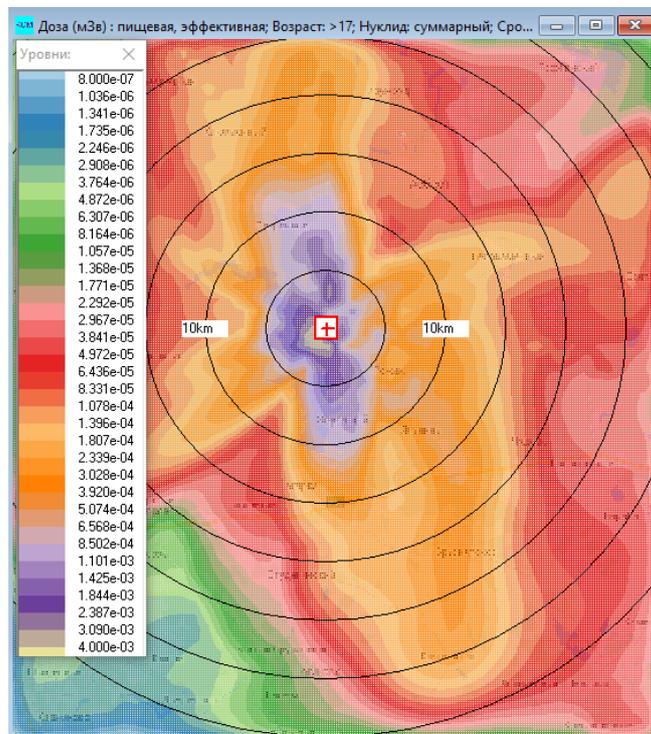


Рисунок 4.37. Окно визуализации пищевой дозы

4.2.9. Зависимость максимальных значений целевых функций от расстояния

Теперь проанализируем числовые данные. В корневом каталоге с кодом РОМ были созданы файлы «stat_*.txt». Поочередно откройте эти файлы и просмотрите их содержимое. На рисунке 4.38 представлено совокупное содержание всех созданных файлов.

В первой строчке каждого файла содержится описание целевой функции и единиц измерения. Заметим, что вывод зависимости целевых функций от расстояния осуществляется в системе единиц СИ.

В первом столбце содержится расстояние, в пятом представлены значения целевых функций.

4.3. Расчет в режиме нормальной эксплуатации

Помимо аварийных выбросов в коде РОМ могут рассчитываться годовые выбросы. Однако такие выбросы рассчитываются не напрямую, а в упрощенном виде — с применением статистических данных о метеорологической обстановке в районе размещения данного ОИАЭ (см. 2.7).

Закройте программу РОМ и запустите ее заново. Откроется сценарий, с которым мы только что закончили работу: «ACCIDENT2-BEL.GPR». Сохраните текущий GPR-файл под названием «NORMAL-BREST.GPR».

```

# Интеграл (ТIC) (Бк*сек/м3) ; Нуклид: суммарный
6000.0 4.56815e+07
12000.0 2.19551e+07
18000.0 9.86647e+06
24000.0 9.68612e+06
# Выпадения (Бк/м2) ; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток
6000.0 2.84832e+02
12000.0 1.27323e+02
18000.0 8.04417e+01
24000.0 6.69909e+01
# Доза (Зв) : от облака, эффективная; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток
6000.0 2.21731e-07
12000.0 9.34550e-08
18000.0 4.28229e-08
24000.0 4.15012e-08
# Доза (Зв) : ингаляционная, эффективная; Возраст: 2-7; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток
6000.0 2.75588e-09
12000.0 1.15398e-09
18000.0 5.22181e-10
24000.0 4.34908e-10
# Доза (Зв) : от поверхности, эффективная; Нуклид: суммарный; Срок: 10 суток
6000.0 4.11349e-08
12000.0 1.98262e-08
18000.0 7.68499e-09
24000.0 5.42938e-09
# Доза (Зв) : пищевая, эффективная; Возраст: >17; Нуклид: суммарный; Срок: 366 суток
6000.0 1.74591e-06
12000.0 8.32544e-07
18000.0 3.86933e-07
24000.0 3.34520e-07
    
```

Рисунок 4.38. Совокупное содержание всех файлов «stat*.txt»

Рассмотрим прогнозируемые среднегодовые параметры радиационной обстановки при регулярных выбросах при работе АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300. Для моделирования выбросов в режиме нормальной эксплуатации необходима исходная информация по источнику, т. е., фактически о годовом выбросе радионуклидов в атмосферу. Для реактора БРЕСТ-ОД-300 воспользуемся следующими условными данными (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Условный годовой выброс нуклидов АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300

Нуклид	КТ	Нуклид	КТ	Нуклид	КТ	Нуклид	КТ
³ H	1,6E+13	⁸⁸ Kr	1,5E+07	¹³⁸ Xe	2,7E+04	¹³⁵ I	1,1E+03
⁴¹ Ar	2,8E+08	¹³³ Xe	2,8E+11	¹³¹ I	2,6E+06	¹³⁴ Cs	5,5E+05
⁸⁵ Kr	1,5E+10	¹³³ Xe-m	2,6E+09	¹³² I	5,0E+02	¹³⁷ Cs	7,6E+05
⁸⁵ Kr-m	2,5E+07	¹³⁵ Xe	6,8E+09	¹³³ I	2,5E+04	¹³⁸ Cs	2,0E+02
⁸⁷ Kr	1,7E+06	¹³⁵ Xe-m	1,1E+06	¹³⁴ I	6,7E+00	²¹⁰ Po	5,1E+00

Откройте файл «perm/src-brest.in» и отредактируйте годовые выбросы нуклидов в соответствии с таблицей 4.3. Форма йода — аэрозольная. Активности продуктов распада (¹³¹Xe-m, ⁸⁸Rb и ¹³⁷Ba-m) оставляем нулевыми.

После задания активностей всех нуклидов файл будет выглядеть, как показано на рисунке 4.39.

Заметим, что во входном файле годового выброса «perm/src-brest.in» имена нуклидов должны соответствовать именам, принятым в коде РОМ. В противном случае они не будут распознаны.

```

H___3_ 1.6e+13
Ar_41_ 2.8e+08
Kr_85_ 1.5e+10
Kr_85m 2.5e+07
Kr_87_ 1.7e+06
Kr_88_ 1.5e+07
Xe131m 0.0e+00
Xe133_ 2.8e+11
Xe133m 2.6e+09
Xe135_ 6.8e+09
Xe135m 1.1e+06
Xe138_ 2.7e+04
Rb_88_ 0.0e+00
Ia131_ 2.6e+06
Ia132_ 5.0e+02
Ia133_ 2.5E+04
Ia134_ 6.7e+00
Ia135_ 1.1e+03
Cs134_ 5.5e+05
Cs137_ 7.6e+05
Cs138_ 2.0e+02
Po210_ 5.1e+00
Ba137m 0.0e+00
    
```

Рисунок 4.39. Файл «perm/src-brest.in» после сделанных изменений

Далее необходимо задать файл с данными о повторяемости различных метеопараметров. Эти данные рассчитываются на основе метеорологических временных рядов за последние несколько лет. Входной файл должен содержать эмпирическую вероятность определенного сочетания метеопараметров: класс стабильности, скорость ветра (включая штиль), направление ветра. Данные должны быть записаны в текстовый файл для последующей обработки.

Например, для района размещения АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300 матрица повторяемостей будет выглядеть следующим образом (содержимое файла «perm/meteo.in», рисунок 4.40).

```

# define wind direction
# N = 0.0
# NNE = 22.5
# NE = 45.0
# ENE = 67.5
# E = 90.0
# ESE = 112.5
# SE = 135.0
# SSE = 157.5
# S = 180.0
# SSW = 202.5
# SW = 225.0
# WSW = 247.5
# W = 270.0
# WNW = 292.5
# NW = 315.0
# NNW = 337.5

~ 0.0 22.5 45.0 67.5 90.0 112.5 135.0 157.5 180.0 202.5 225.0 247.5 270.0 292.5 315.0 337.5

A 0.45 0.45 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015 0.015
A 1.0 1.0 0.080 0.340 0.260 0.190 0.080 0.080 0.080 0.190 0.600 0.340 0.380 0.230 0.230 0.080 0.000 0.080
A 2.0 3.0 0.040 0.080 0.080 0.040 0.040 0.000 0.000 0.110 0.040 0.000 0.110 0.080 0.080 0.000 0.080 0.040
A 4.0 5.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
A 6.0 7.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
A 8.0 15.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
A 15.0 50.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000

B 0.35 0.35 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033 0.033
B 1.0 1.0 0.150 0.190 0.490 0.110 0.110 0.190 0.110 0.450 0.530 0.490 0.300 0.450 0.040 0.190 0.080
B 2.0 3.0 0.0340 0.0710 0.230 0.190 0.000 0.040 0.000 0.260 0.340 0.260 0.260 0.190 0.490 0.230 0.260 0.300
B 4.0 5.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
B 6.0 7.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
B 8.0 15.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
B 15.0 50.0 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000 0.000
    
```

Рисунок 4.40. Фрагмент файла «perm/meteo.in», матрица повторяемостей метеопараметров

В шапке файла содержится наименования направлений ветра и соответствующие значения в градусах. После знака «~» приводится список значений направлений ветра. Ниже для каждого класса устойчивости приводится матрица повторяемости сочетания скорости ветра и его направления.

В первом столбце таблицы приводится значение класса устойчивости, во втором и третьем — диапазон наблюдаемой скорости ветра. В последующих столбцах — значения повторяемости для каждого направления ветра.

Другие исходные данные для АЭС С РУ реактора БРЕСТ-ОД-300 таковы.

Высота выброса без учета эффективной высоты выброса — 95 м; шероховатость — 0,1 м; среднегодовая интенсивность осадков в холодное и теплое время — 180 и 395 мм/год соответственно.

При рассмотрении штилевых условий (которые имеют заметную частоту повторяемости), когда в исходных статистических данных скорость ветра задается равной 0 (фактически меньше 1 м/с), в расчетах скорость ветра предполагалась отличной от 0. Это соответствует учету порывистости ветра. Характерная скорость ветра в этих условиях зависит от класса устойчивости:

- А класс — 0,45 м/с;
- В класс — 0,35 м/с;
- С класс — 0,30 м/с;
- D класс — 0,23 м/с;
- Е класс — 0,15 м/с;
- F класс — 0,10 м/с;
- G класс — 0,10 м/с.

Направление ветра в этих условиях с равной вероятностью попадало в любой из угловых интервалов (рисунок 4.40).

Для того, чтобы сформировать файл источника и файл метеосценария, которые смогут быть далее загружены в код ПОМ необходимо запустить PREL-скрипт «perm/readsynstat.pl» с параметрами «meteo.in» и «src-brest.in». Для этого в командной строке WINDOWS нужно выполнить следующую команду: «perl readsynstat.pl meteo.in src-brest.in 1>scen.mpl 2>scen.sf». Тогда в файл «scen.mpl» будет записан квази-метеосценарий, а в файл «scen.sf» — сценарий выброса. Оба файла создадутся в каталоге «perm/».

Откройте сначала файл «perm/scen.mpl» с квази-метеосценарием. Он должен выглядеть, как представлено на рисунке 4.41. В каждом из столбцов содержится полезная информация для формирования фазы квази-метеосценария: относительное время начала фазы, величина и направление скорости ветра, интенсивность осадков (постоянная), класс устойчивости и шероховатость (постоянная).

Далее рассмотрим файл источника «perm/scen.sf». Часть файла представлена на рисунке 4.42. В этом файле представлена следующая информация: количество нуклидов в выбросе. Список фаз источника, для каждой из которых содержится следующая информация: время начала действия фазы, длительность действия фазы, высота выброса, активности нуклидов в фазе.

```

# PREC_TYEP:
# simple_rain
# thunderstorm
# snow_and_rain
# shower
# simple_snow
# fog_or_drizzle
# STAB_CLASS:
# A, B,....G
# DATE
REL_HOUR      WIND_MAG      WIND_DIR      PREC_RATE      PREC_TYPE      STAB_CLASS      ROUHG
??..??..???? ??:?? 0          0.45          0.0           0.045         simple_rain     A              0.10
??..??..???? ??:?? 3          1.00          0.0           0.045         simple_rain     A              0.10
??..??..???? ??:?? 6          2.50          0.0           0.045         simple_rain     A              0.10
??..??..???? ??:?? 9          0.35          0.0           0.045         simple_rain     B              0.10
??..??..???? ??:?? 12         1.00          0.0           0.045         simple_rain     B              0.10
??..??..???? ??:?? 15         2.50          0.0           0.045         simple_rain     B              0.10
??..??..???? ??:?? 18         0.30          0.0           0.045         simple_rain     C              0.10
??..??..???? ??:?? 21         1.00          0.0           0.045         simple_rain     C              0.10
??..??..???? ??:?? 24         2.50          0.0           0.045         simple_rain     C              0.10
??..??..???? ??:?? 27         0.23          0.0           0.045         simple_rain     D              0.10
??..??..???? ??:?? 30         1.00          0.0           0.045         simple_rain     D              0.10
??..??..???? ??:?? 33         2.50          0.0           0.045         simple_rain     D              0.10
??..??..???? ??:?? 36         4.50          0.0           0.045         simple_rain     D              0.10
??..??..???? ??:?? 39         2.50          0.0           0.045         simple_rain     E              0.10
??..??..???? ??:?? 42         0.10          0.0           0.045         simple_rain     F              0.10
??..??..???? ??:?? 45         1.00          0.0           0.045         simple_rain     F              0.10
??..??..???? ??:?? 48         2.50          0.0           0.045         simple_rain     F              0.10
??..??..???? ??:?? 51         0.10          0.0           0.045         simple_rain     G              0.10
??..??..???? ??:?? 54         1.00          0.0           0.045         simple_rain     G              0.10
??..??..???? ??:?? 57         0.45          22.5         0.045         simple_rain     A              0.10
??..??..???? ??:?? 60         1.00          22.5         0.045         simple_rain     A              0.10
??..??..???? ??:?? 63         2.50          22.5         0.045         simple_rain     A              0.10
??..??..???? ??:?? 66         0.35          22.5         0.045         simple_rain     B              0.10
??..??..???? ??:?? 69         1.00          22.5         0.045         simple_rain     B              0.10
??..??..???? ??:?? 72         2.50          22.5         0.045         simple_rain     B              0.10
??..??..???? ??:?? 75         0.30          22.5         0.045         simple_rain     C              0.10
??..??..???? ??:?? 78         1.00          22.5         0.045         simple_rain     C              0.10
??..??..???? ??:?? 81         2.50          22.5         0.045         simple_rain     C              0.10
??..??..???? ??:?? 84         4.50          22.5         0.045         simple_rain     C              0.10
??..??..???? ??:?? 87         0.23          22.5         0.045         simple_rain     D              0.10
??..??..???? ??:?? 90         1.00          22.5         0.045         simple_rain     D              0.10
??..??..???? ??:?? 93         2.50          22.5         0.045         simple_rain     D              0.10
??..??..???? ??:?? 96         4.50          22.5         0.045         simple_rain     D              0.10
??..??..???? ??:?? 99         2.50          22.5         0.045         simple_rain     E              0.10
??..??..???? ??:?? 102        0.10          22.5         0.045         simple_rain     F              0.10
??..??..???? ??:?? 105        1.00          22.5         0.045         simple_rain     F              0.10
??..??..???? ??:?? 108        2.50          22.5         0.045         simple_rain     F              0.10
??..??..???? ??:?? 111        0.10          22.5         0.045         simple_rain     G              0.10
??..??..???? ??:?? 114        1.00          22.5         0.045         simple_rain     G              0.10
??..??..???? ??:?? 117        2.50          22.5         0.045         simple_rain     G              0.10
??..??..???? ??:?? 120        0.45          45.0         0.045         simple_rain     A              0.10

```

Рисунок 4.41. Содержимое файла «perm/scen.mpl»

```

# summ act of all nuclides = 1.63e+013
# nuclides count
23
# nuclides name
H___3_      Ar_41_      Kr_85_      Kr_85m
# BEGIN_HOUR  DURATION_HOUR  ELEVATION_METER  H___3_      Kr_85m
0          0.1           95             2.40000e+009
3          0.1           95             1.28000e+010
6          0.1           95             6.40000e+009
9          0.1           95             5.28000e+009
12         0.1           95             2.40000e+010
15         0.1           95             5.44000e+010
18         0.1           95             3.02400e+010
21         0.1           95             9.60000e+010
24         0.1           95             8.96000e+010
27         0.1           95             1.42400e+010
30         0.1           95             2.40000e+010
33         0.1           95             2.40000e+010
36         0.1           95             1.28000e+010
39         0.1           95             1.28000e+010
42         0.1           95             5.04000e+010
45         0.1           95             1.76000e+010
48         0.1           95             2.40000e+010
51         0.1           95             5.29600e+010
54         0.1           95             6.40000e+009
57         0.1           95             2.40000e+009
60         0.1           95             5.44000e+010
63         0.1           95             1.28000e+010
66         0.1           95             5.28000e+009
69         0.1           95             3.04000e+010
72         0.1           95             1.13600e+011
75         0.1           95             3.02400e+010

```

Рисунок 4.42. Содержимое файла «perm/scen.sf»

В данном варианте скрипта не учитывается эффективная высота выброса (ограничение учебной версии), данные по осадкам, характерным для каждого сочетания скорости, направления и класса устойчивости для района размещения АЭС с РУ БРЕСТ-ОД-300 отсутствуют, поэтому используется среднегодовая интенсивность осадков для каждого сочетания. Не учитывается сезонность (теплый или холодный). В данном тесте в качестве сезона выберем теплый сезон, поэтому среднегодовая интенсивность осадков будет равна $395/365/24=0,045$ мм/час.

Методология может быть усовершенствована при наличии более детальной входной информации.

4.3.1. Авария

С помощью команды меню «Объект→Авария» вызовите окно редактирования информации об аварии. Во вкладке «Дата» проставьте дату: 15 июля 2018 года, 12:00. Максимальную продолжительность прогноза поставьте равной 9000 часам. Во вкладке «Описание» введите псевдоним аварии «brest-300-normal», а также «Описание аварии»: «Реактор БРЕСТ-ОД-300. Годовой выброс в режиме нормальной эксплуатации». Вид окна «Авария» представлен на рисунке 4.43.

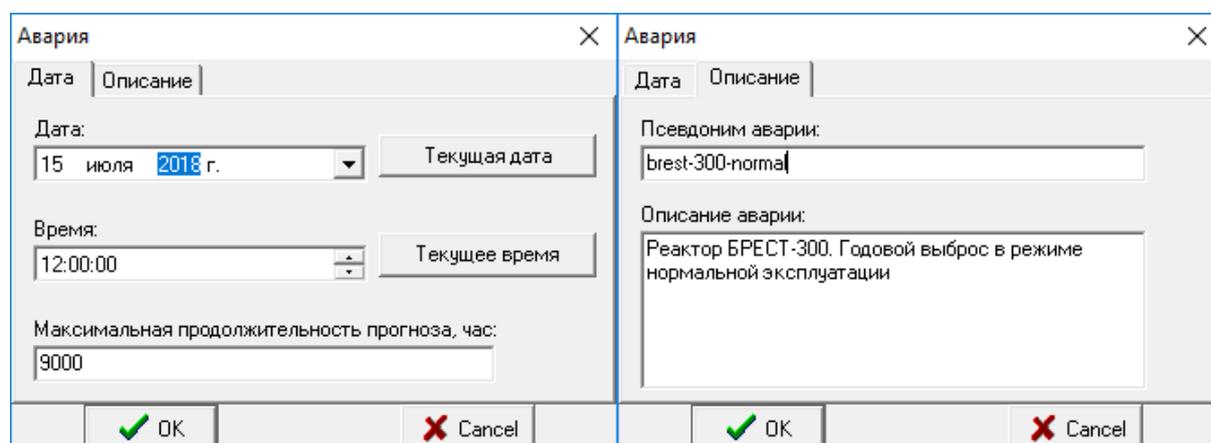


Рисунок 4.43. Вид окна «Авария» после сделанных изменений

Нажмите кнопку «ОК».

4.3.2. Местоположение объекта

Далее выполните команду меню «Объект→Местоположение объекта». Появится окно «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки». Первым делом в панели «Карта» справа от метки «Файл *.BMP» в выпадающем списке выберите карту «brest30km».

В панели «Расчетная область» справа от метки «Изменить размер» несколько раз нажмите на кнопку «*10» для того, чтобы расчетная область была отождествлена с областью, охватываемой картой-подложкой «bel30km.bmp».

В панели «Объект» напротив метки «Название» введите «BRESTNPP». Задайте долготу и широту станции — местоположение объекта и аварии:

- долгота — 87,86°;
- широта — 58,22°.

Убедитесь, что размер расчетной области примерно 58×60 км². И последнее: задайте размерности расчетной сетки, 58 по оси X и 60 по оси Y. Соотношения размеров расчетной области и количества ячеек вдоль долготы (по оси X) и вдоль широты (по оси Y) означают, что горизонтальные размеры расчетных ячеек равны 1 км².

Вид окна «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки» после всех изменений приведен на рисунке 4.44.

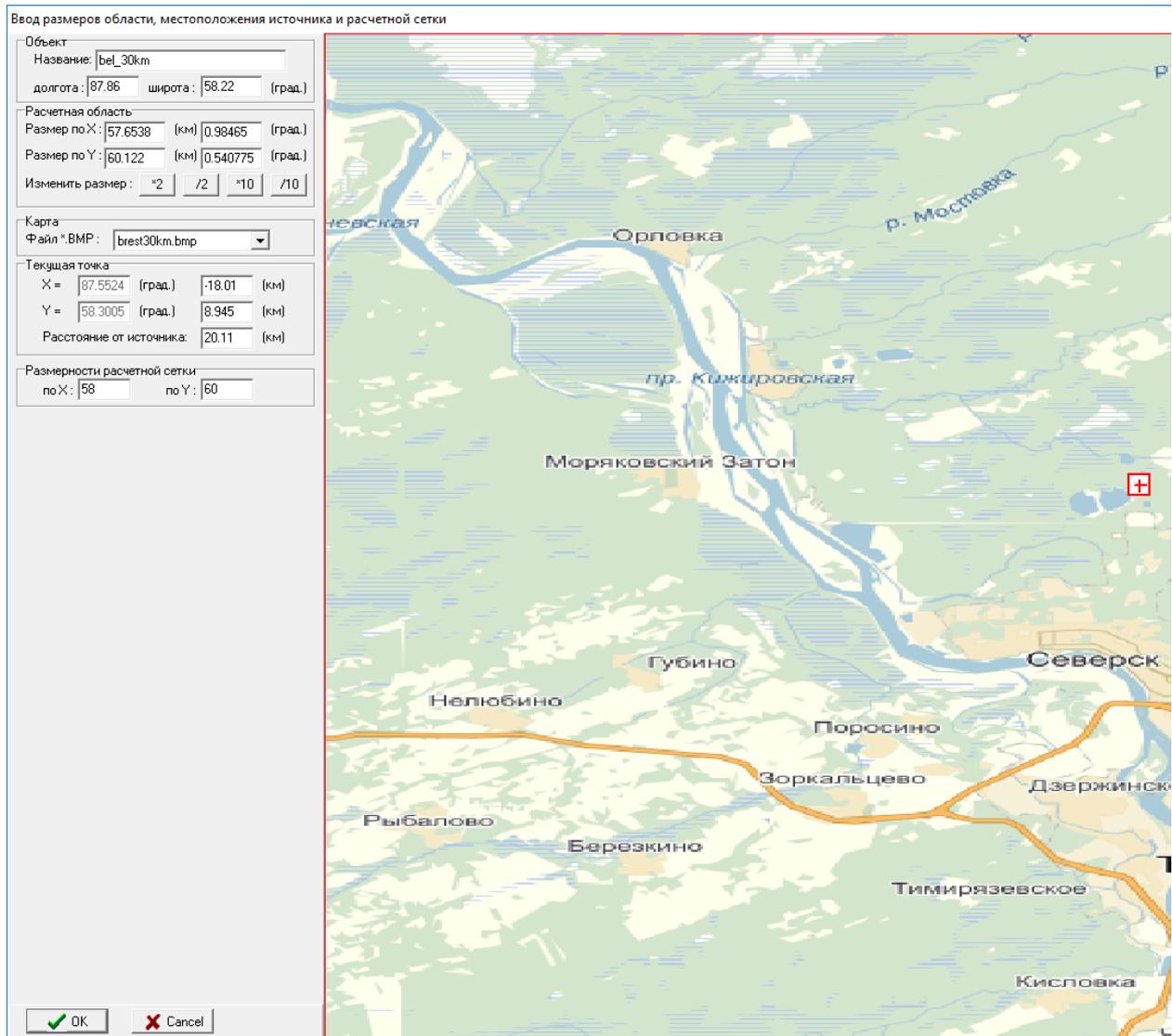


Рисунок 4.44. Вид окна «Ввод размеров области, местоположения источника и расчетной сетки» после сделанных изменений

После всех изменений нажмите на кнопку «ОК». В главном меню выполните команду «Файл→Запись» для записи сделанных изменений в GPR-файл «NORMAL-BREST.GPR».

4.3.3. Источник

Настроим параметры источника. Выполните команду меню «Источник→Редактирование». Нажмите кнопку «Удалить все», потом нажмите кнопку «Загрузить сц-й» и в открывшемся стандартном окне выбора файла выберите файл «perm/scen.sf».

Вид окна «Ввод параметров источника» будет таким, как показано на рисунке 4.45. В нем отобразится временной сценарий, в котором весь выброс разделен на 24 одинаковые фазы длительностью три часа.

№	Время, час		Активность, Бк	Высота, м
	начало	диапазон		
1	0	0.1	2.45e+09	9.50e+01
2	3	0.1	1.30e+10	9.50e+01
3	6	0.1	6.52e+09	9.50e+01
4	9	0.1	5.38e+09	9.50e+01
5	12	0.1	2.45e+10	9.50e+01

Рисунок 4.45. Окно «Ввод параметров источника»

Выберите, например, третью фазу и нажмите кнопку «Группы». Появится одноименное окно с групповым составом третьей фазы (рисунок 4.46).

№	Группа	Активность, Бк	Грав. скор. м/сек	Сух. осажд. м/сек	Вымывание час/мм³сек
1	aerosole	1.58e+03	0.00e+00	8.00e-03	2.60e-05
2	inert_rad_gas	6.54e+09	0.00e+00	0.00e+00	0.00e+00

Рисунок 4.46. Окно «Группы»

Обратите внимание, что все нуклиды автоматически распределились по группам (в данном случае двум). Убедитесь, что активности нуклидов такие же, как и в третьей строчке сценария источника в файле «regm/scen.sf», а также что количество фаз источника равно 319. Закройте окно «Группы» и в окне «Ввод параметров источника» нажмите «ОК». Запишите данные в GPR-файл (команда «Файл→Записать»).

4.3.4. Параметры счета

Далее введем параметры расчета вызвав окно «Параметры счет» с помощью команды меню «Распространение→Ввод параметров».

В открывшемся окне во вкладке «Модель-Сетка-Экран» в панели «Модель» зададим шаг интегрирования уравнений по времени — 0,05 часа, а также количество лагранжевых частиц 3,828,000 (по 12,000 частиц на каждый трехчасовой интервал источника).

Далее во вкладке «Расчет в ячейке» в панели «Метод расчета концентраций на сетке» выставим вариант «Усредненный по ячейке», а также поставим галочку возле метки «Производить билинейную интерполяцию поля...». Далее перейдем во вкладку «Макс. значения» и в верхнем поле введем префикс текстовых файлов, в которых будет рассчитываться зависимость целевых функций от расстояния — «stat».

В многострочном поле для ввода ниже «Расстояние, м» введем те же расстояния, что и в предыдущих тестах (6000, 12000, 18000, 24000). Во вкладке «Разное» эффективный фактор экранирования зададим равным 0,7 (сельская местность). Среднегодовую влажность не меняем (будет использовано значение по умолчанию). Нажимаем кнопку «ОК» и выполняем команду меню «Файл→Запись».

4.3.5. Задание целевых функций

Целевые функции были заданы в предыдущих тестах. Однако, в данном тесте требуется небольшое изменение. Обычно при расчете радиационных последствий при нормальной эксплуатации требуется определить (наряду с годовой дозой от облака и ингаляции) годовую дозу облучения от поверхности и пищевых цепочек. Могут быть также интересны годовые выпадения. Вспомним, что в окне «Задание расчетной функции», вызываемом по команде меню «Графика→Выбор функции», для дозы от поверхности и пищевых цепочек, а также для выпадений, есть параметр «Срок, сутки». Вспомним также, что это время, по прошествии которого после ухода облака за пределы расчетной области, будет рассчитываться интегральная доза (или выпадения).

Поясним это на следующем примере. Рассмотрим аварийный выброс длительностью 1 час. Пусть облако уходит за пределы 30-километровой зоны через час после окончания действия источника. Временной период между уходом облака и началом действия источника равен 2 часам. Тогда, чтобы рассчитать дозу облучения от поверхности через сутки после начала выброса, необходимо задать срок, равный 22 часам (0,917 суток). Это значение следует задать справа от метки «Срок, сутки» в окне «Задание расчетной функции» для окна визуализации дозы от поверхности.

Таким образом, для расчета годовой дозы от поверхности необходимо задать срок, равный одному году минус длительность квази-сценария источника выброса, который в нашем случае составляет 957 часов или около сорока суток. Значит, для правильного задания периода облучения от поверхности нужно задать срок для окна визуализации дозы от поверхности $366 - 40 = 326$ суток. Время прогноза для дозы от пищевых цепочек равна одному году, так как время, пока продолжается выброс, не входит в период облучения (в отличие от ситуации с дозой от поверхности). Такая поправка важна, так как длительность квази-сценария существенна.

Аналогичным образом поступим с окном визуализации выпадений.

4.3.6. Параметры Авторасчета

На следующем шаге зададим режим расчета и его параметры. Для этого выполним команду меню «Авторасчет». Появится окно «Параметры Авторасчета». В верхней части окна нужно выбрать «Нормальная эксплуатация».

Далее нажмем кнопку «Да».

4.3.7. Ввод метеоданных

Последнее, что нужно сделать для проведения расчета нормальной эксплуатации, это задание квази-сценария изменчивости метеопараметров. Выполните команду меню «Метео→Локальная погода». В открывшемся окне «Ввод метеоданных» нажмите кнопку «Из файла» и в открывшемся диалоге выбора файла загрузите файл «perm/scen.mpl». Вид окна «Ввод метеоданных» после загрузки метеосценария показан на рисунке 4.47.

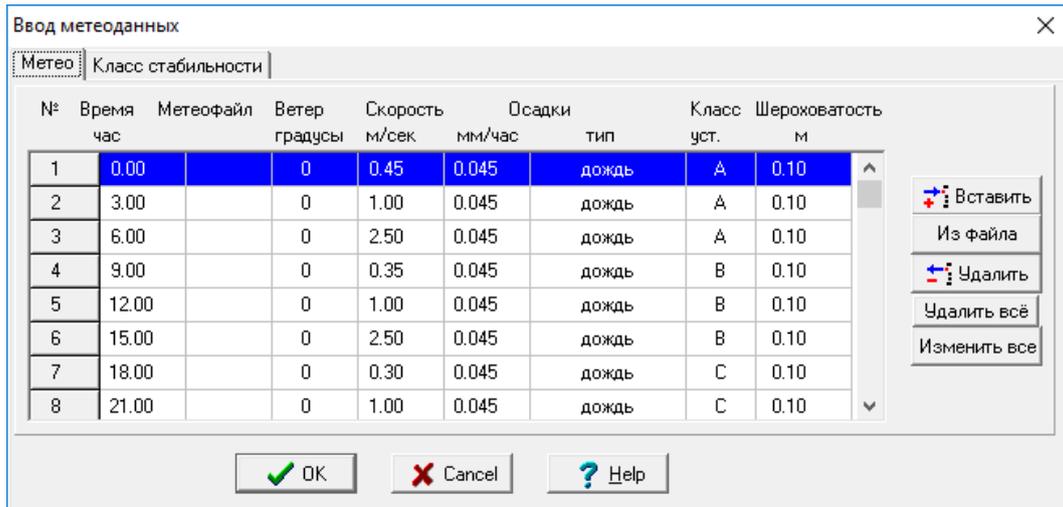


Рисунок 4.47. Окно «Ввод метеоданных» после загрузки метеосценария

Нажмите кнопку «OK» и запишите данные в GPR-файл, выполнив команду меню «Файл→Запись».

4.3.8. Запуск на счет и получение результатов

После всех изменений программа готова к запуску. Для запуска на расчет нажмите кнопку . Длительность счета составит примерно полчаса.

Как и в предыдущих примерах, настроим палитру для каждого из окон визуализации.

Выберем сначала окно «Интеграл» и настроим для его отображения максимальное и минимальное значения: « $1e+4$ » и « $4e+6$ » (Бк·с/м³).

Тогда двумерное поле целевой функции «Интеграл...» будет иметь вид, представленный на рисунке 4.48.

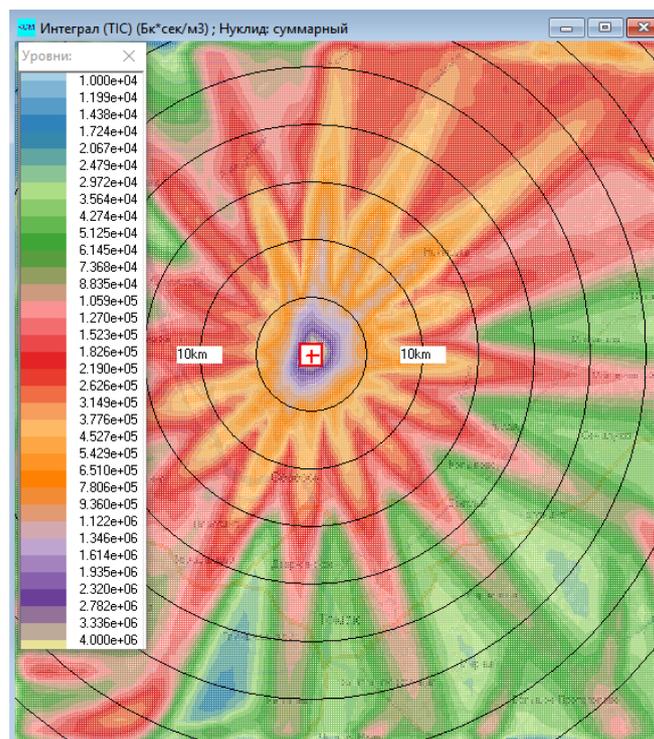


Рисунок 4.48. Окно визуализации проинтегрированной по времени концентрации всех нуклидов

Сделайте активным окно «Выпадения...» и настройте минимальное и максимальное значения для легенды: « $3e-6$ » и « $3e-3$ » (Бк/м²). Вид окна с выпадениями всех нуклидов представлен на рисунке 4.49.

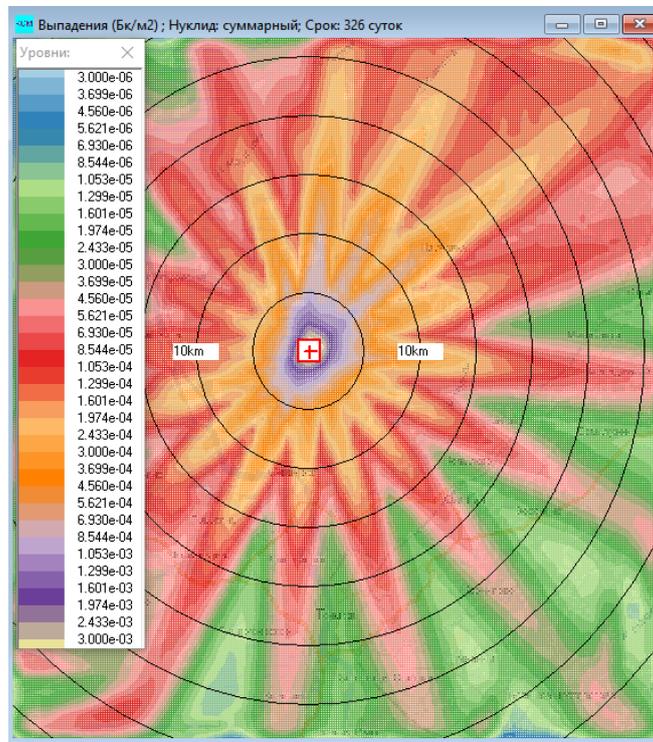


Рисунок 4.49. Окно визуализации выпадений всех нуклидов

Далее активируйте окно с ингаляционной дозой и задайте минимальное и максимальное значения: « $1e-9$ » и « $6e-6$ » (мЗв). Вид окна с дозой от ингаляции приведен на рисунке 4.50.

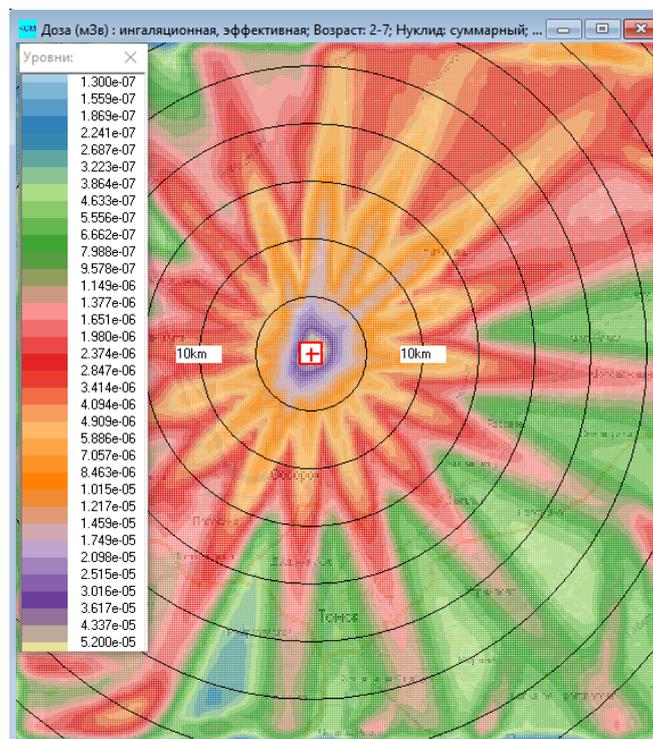


Рисунок 4.50. Окно визуализации дозы от ингаляции

Активируйте окно с дозой от облака и настройте линии уровня. Задайте минимальное и максимальное значение: « $3\text{e}-10$ » и « $1\text{e}-7$ » (мЗв). Окно с дозой от облака представлено на рисунке 4.51.

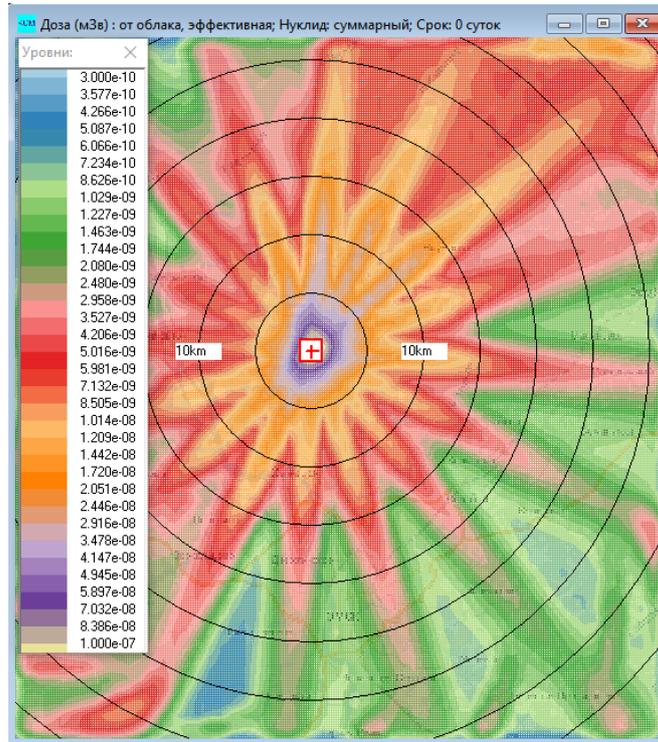


Рисунок 4.51. Окно визуализации дозы от облака

Активируйте окно с дозой от поверхности через 326 суток после ухода облака. Задайте минимальное и максимальное значения: « $4\text{e}-11$ » и « $4\text{e}-8$ » (мЗв). Окно с полем дозы от поверхности представлено на рисунке 4.52.

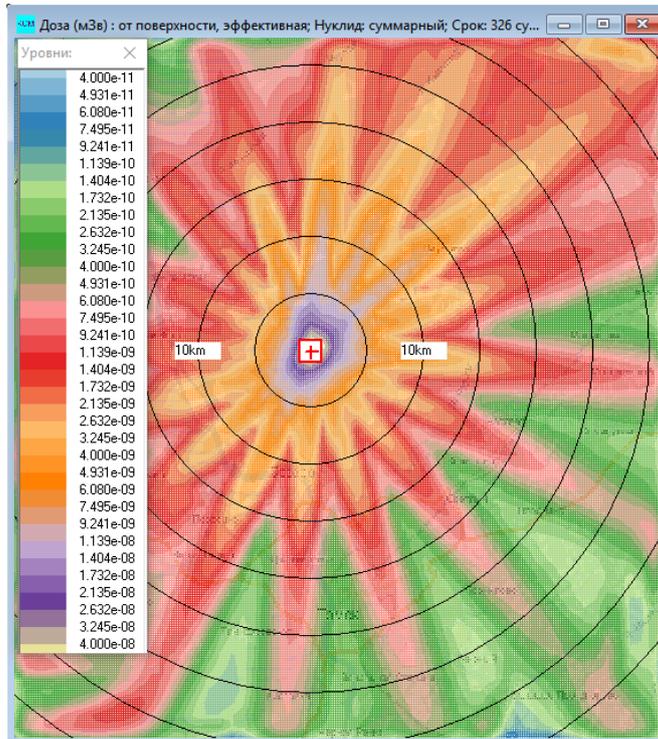


Рисунок 4.52. Окно визуализации дозы от поверхности

Активируйте окно с пищевой дозой и настройте линии уровня. Задайте минимальное и максимальное значения: « $8e-7$ » и « $4e-3$ » (мЗв). Вид окна пищевой дозы представлен на рисунке 4.53.

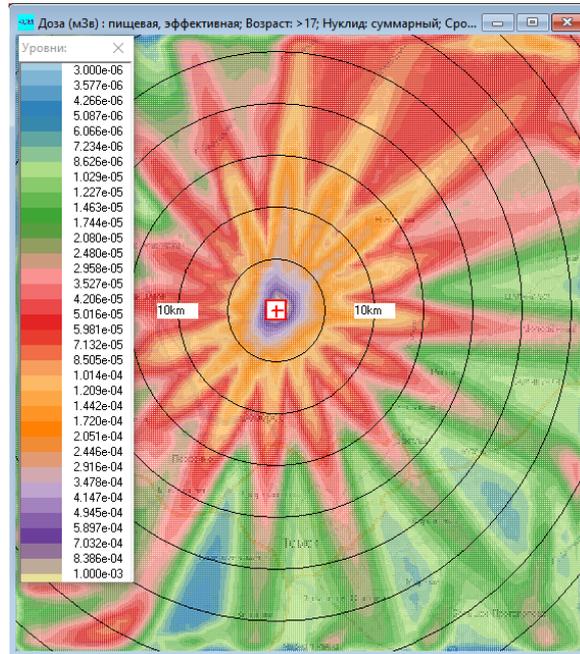


Рисунок 4.53. Окно визуализации пищевой дозы

4.3.9. Зависимость максимальных значений целевых функций от расстояния

Теперь проанализируем числовые данные. В корневом каталоге с кодом ROM были созданы файлы «stat_*.txt». Поочередно откройте эти файлы и просмотрите их содержимое. На рисунке 4.54 представлено совокупное содержание всех созданных файлов.

```
# Интеграл (ТIC) (Бк*сек/м3) ; Нуклид: суммарный
6000.0      4.56815e+07
12000.0     2.19551e+07
18000.0     9.86647e+06
24000.0     9.68612e+06

# Выпадения (Бк/м2) ; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток
6000.0      2.84832e+02
12000.0     1.27323e+02
18000.0     8.04417e+01
24000.0     6.69909e+01

# Доза (Зв) : от облака, эффективная; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток
6000.0      2.21731e-07
12000.0     9.34550e-08
18000.0     4.28229e-08
24000.0     4.15012e-08

# Доза (Зв) : ингаляционная, эффективная; Возраст: 2-7; Нуклид: суммарный; Срок: 0 суток
6000.0      2.75588e-09
12000.0     1.15398e-09
18000.0     5.22181e-10
24000.0     4.34908e-10

# Доза (Зв) : от поверхности, эффективная; Нуклид: суммарный; Срок: 10 суток
6000.0      4.11349e-08
12000.0     1.98262e-08
18000.0     7.68499e-09
24000.0     5.42938e-09

# Доза (Зв) : пищевая, эффективная; Возраст: >17; Нуклид: суммарный; Срок: 366 суток
6000.0      1.74591e-06
12000.0     8.32544e-07
18000.0     3.86933e-07
24000.0     3.34520e-07
```

Рисунок 4.54. Совокупное содержание всех файлов «stat*.txt»

Содержимое файлов за исключением самих значений целевых функций аналогично содержанию файлов, которые были продемонстрированы в предыдущих тестах.

4.4. Расчет в пунктах индикации и другие возможности

В завершении обучения рассмотрим еще одну небольшую частную задачу — получение временных профилей в точках индикации.

Для этого рассмотрим вариант расчета, который мы использовали в подразделе 4.1. Для этого выполните команду меню «Файл→Чтение» и выберите файл «ACCIDENT1-BEL.GPR». Сохраните этот вариант под именем «A1-BEL.GPR».

Для начала настроим список точек индикации, в которых будем рассчитывать временные профили целевых функций. Для этого выполните команду меню «Объект→Точки индикации».

В открывшемся окне «Точки индикации для временной динамики» на панели «Список точек индикации» нажмите кнопку «Добавить из БД». В открывшемся окне «Населенные пункты» найдите и выделите два населенных пункта: Режик и Чудова. Для добавления выбранных населенных пунктов в список нажмите «ОК» (рисунок 4.55).

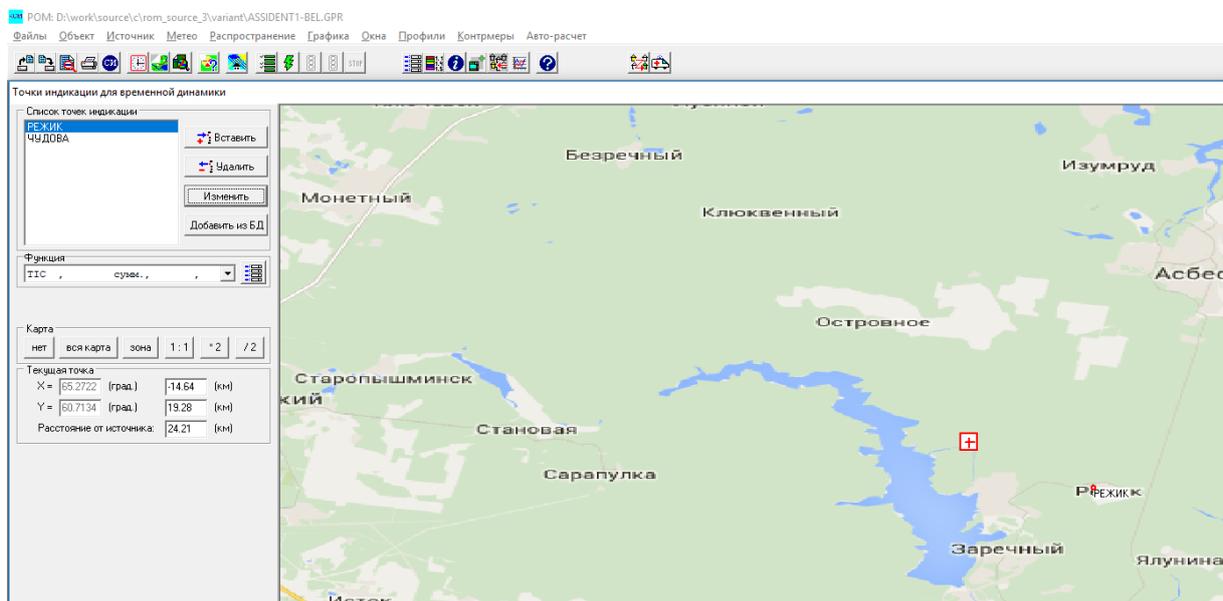


Рисунок 4.55. Окно «Точки индикации для временной динамики» после задания списков населенных пунктов

Далее перейдем к панели «Функция» и нажмем кнопку «». Появится окно для спецификации целевых функций. В текущем списке только одна функция: интеграла (проинтегрированная по времени концентрация) всех нуклидов. Добавим еще следующие функции:

- Выпадения всех нуклидов на момент ухода облака (срок — 0 суток);
- Эффективная доза от облака всех от всех нуклидов на все тело;
- Эффективна доза от ингаляции от всех нуклидов на все тело для лиц от 2 до 7 лет.

Для добавления целевых функций нужно нажать кнопку «Вставить». Тогда появится окно «Задание расчетной функции» (см. описание в пункте 3.10.3). Если необходимо изменить выделенную в списке целевую функцию, следует нажать кнопку «Уточнить».

Окно «Ввод целевых функций» после изменений будет иметь вид, как показано на рисунке 4.56.

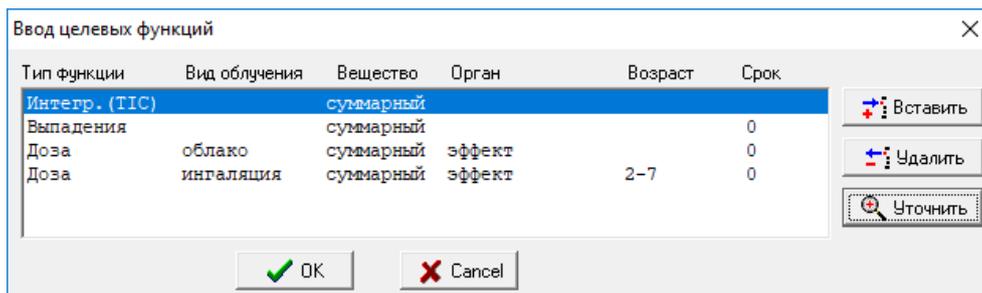


Рисунок 4.56. Окно «Ввод целевых функций» после изменений

Далее нажимаем кнопку «OK» для сохранения списка целевых функций.

Далее зададим время начала аварии 25.11.2018 21:00. Для этого нужно выполнить команду меню «Объект→Авария» и ввести соответствующие данные.

Для этого выполним команду меню «Метео→Локальная погода» и в окне «Ввод метеоданных», во вкладке «Метео» зададим следующие метеопараметры: направление ветра — 280°; скорость ветра 1 м/с; интенсивность осадков 0,1 мм/час; шероховатость поверхности оставим равной 0,1 м.

Осталось задать класс устойчивости. Допустим, категория устойчивости нам не известна. Определяем ее по синоптическим данным. Для этого во вкладке «Класс стабильности» нажмем кнопку «Расчет класса устойчивости». Появится окно «Определение класса устойчивости». Переходим во вкладку «Синоптика» и задаем необходимые для определения класса устойчивости параметры:

- Месяц: ноябрь;
- Время местное: 21:00;
- Широта станции: 60,54° с. ш.;
- Балл облачности: 10;
- Высота облаков: < 2 км;
- Снег: есть;
- Видимость: >1 км;
- Скорость ветра: 1 м/с.

Осталось определить сдвиг декретного времени. Сдвиг декретного времени в коде РОМ есть тот промежуток времени, который нужно добавить к 12:00, чтобы получить время, когда по местным часам наблюдается максимальная высота Солнца. Нам известно, что в городе Заречном, где расположена станция, местное время на 5 часов раньше мирового времени UTC. Кроме того, нам известна долгота станции: 65,54° в. д. Для начала определим мировое время UTC, когда в Заречном высота Солнца максимальна (см. пункт 2.3.1). Для этого от 12:00 отнимем 65,54/15. Получим 07:38. Так как время в Заречном сдвинуто вперед на 5 часов, то по местному это будет примерно 12:38. Получаем, что сдвиг декретного времени составляет 38 минут или 0,63 часа. Округляем эту величину до 1 часа и вводим справа от метки «Сдвиг декретного времени». Нажимаем кнопку «Расчитать» — получим оценку класса устойчивости F (отображается слева от кнопки «Расчитать»).

Нажимаем кнопку «OK» и возвращаемся во вкладку «Метео» окна «Ввод метеоданных». В столбце, где задается класс устойчивости, выбираем «F». Нажимаем кнопку «OK».

Далее необходимо обеспечить вывод данных по населенным пунктам. Для этого вызываем окно «Параметры счета» (команда меню «Распространение→Ввод параметров») и переходим во вкладку «Вывод». В панели «Вывод в файл» ставим галочку возле метки «По населенным пунктам...». Нажимаем «OK».

Во вкладке «Модель-Сетка-Экран» введем количество расчетных частиц — 96,000. Шаг интегрирования по времени задаем равным 0,05 часам. Периодичность обновления («Интервал показа») зададим 5 с. Остальные параметры в данном окне оставляем без изменений.

Откорректируем разрешение расчетной сетки. С помощью команды меню «Объект→Местоположение объекта» вызываем окно «Ввод размеров области...». В панели размерности расчетной сетки задаем размерности сетки вдоль долготы и широты: 108×120. Этим мы сделали горизонтальный размер расчетной ячейки 500×500 м.

Отредактируйте параметры отображения частиц. Для этого вызовите «Линии уровня» (команда «Графика→Установка линий уровня») и загрузите палитру «clr.rgblst». Задайте степенную шкалу с минимальным и максимальным значением 1 и 4000 соответственно.

Далее сохраним проделанные изменения в GPR-файле с помощью команды меню «Файл→Запись».

Нажимаем кнопку  на панели быстрого доступа для запуска счета. В процессе счета активируйте окно визуализации «Частицы» и посмотрите на движение облаков и их распределение по высоте.

В процессе счета окно «Частицы» будет иметь вид, как показано на рисунке 4.57.

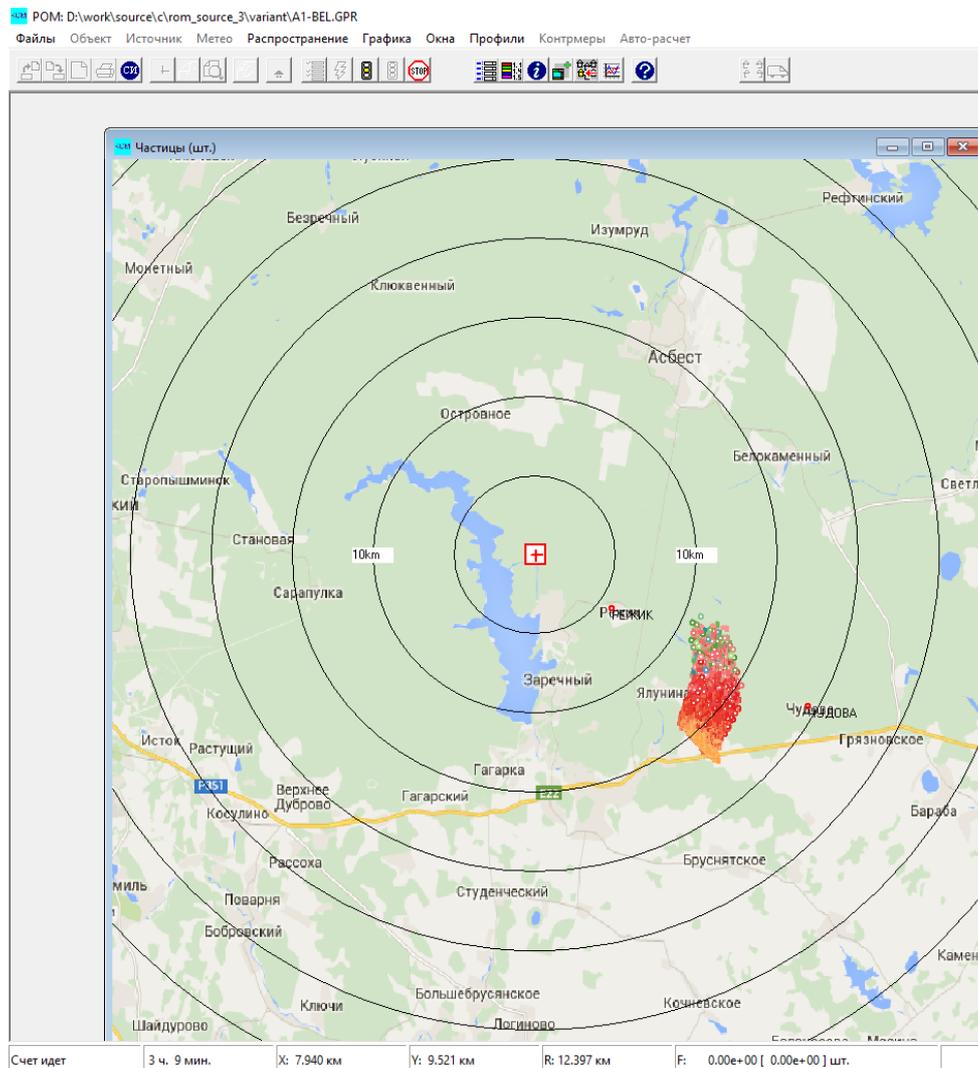


Рисунок 4.57. Окно «Частицы» в момент времени 3 ч 9 мин модельного времени

Теперь посмотрим на временные профили в пунктах индикации. Для этого с помощью команды меню «Профили→Пункты индикации» вызываем окно «Динамика в населенных пунктах».

Выбираем последовательно населенные пункты «Режик» и «Чудова», ставим галочку «На заказанное время» (дает команду выводить временную динамику не до момента ухода облака за пределы расчетной области, а спустя время, заданное в поля для ввода «Срок» окна «Задание расчетной функции»). В выпадающем списке «Функция» последовательно выбираем целевые функции:

- «Интеграл...»;
- «Выпадения...»;
- «Доза облако»;
- «Доза ингаляция».

Некоторые графики представлены на рисунках 4.58—4.60.

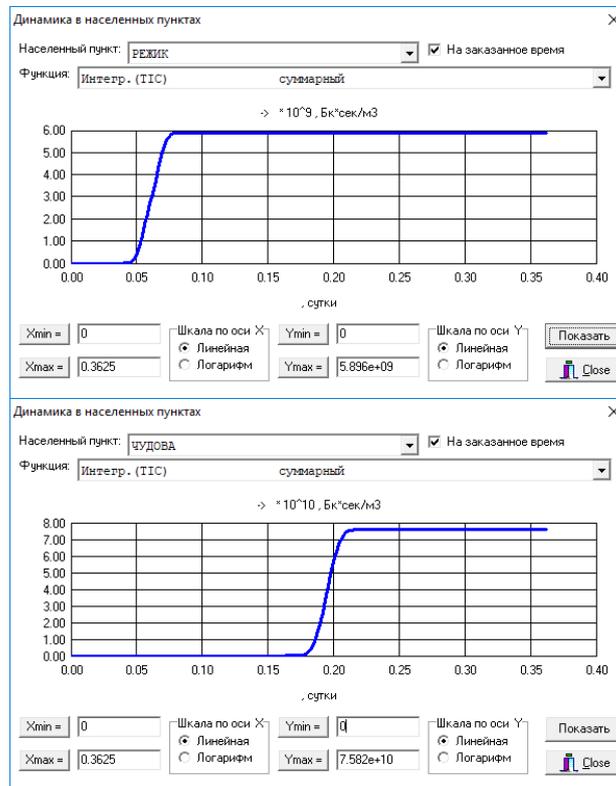


Рисунок 4.58. Временная динамика проинтегрированной по времени концентрации в пунктах индикации Режик (слева) и Чудова (справа)

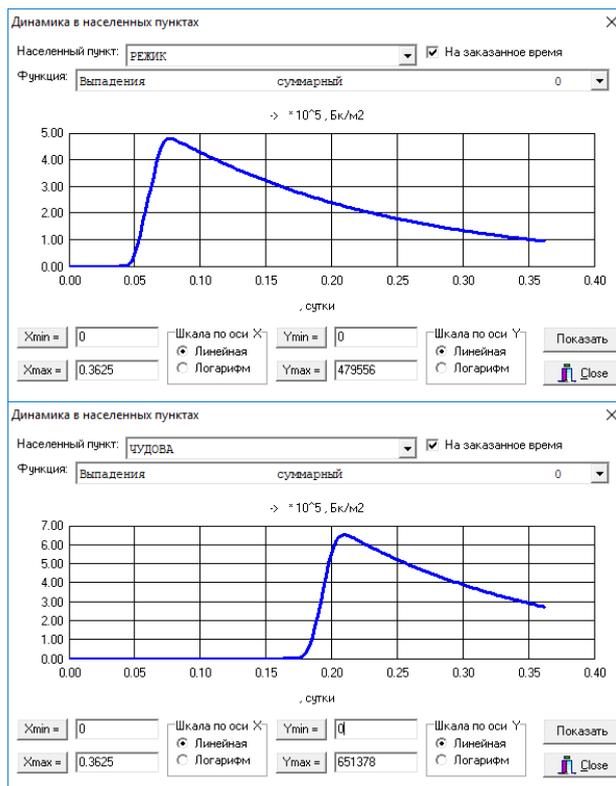


Рисунок 4.59. Временная динамика выпадений в пунктах индикации Режик (слева) и Чудова (справа)

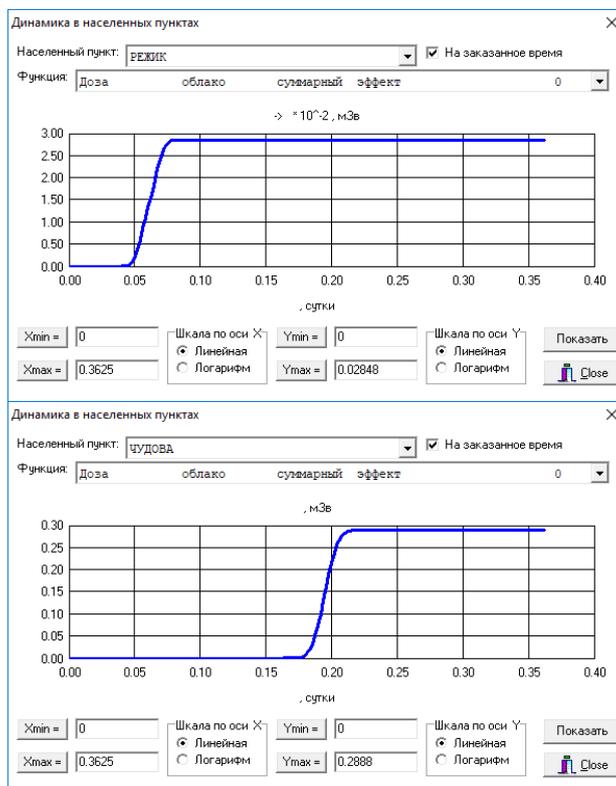


Рисунок 4.60. Временная динамика дозы от облака в пунктах индикации Режик (слева) и Чудова (справа)

По графикам, приведенным на рисунках 4.58—4.60, можно оценить время прихода облака в населенные пункты: в Режик облако пришло через 0,05 дня (1 час 12 минут); в Чудове через 4

часа 20 минут. В окне «Динамика в населенных пунктах» выводится максимальное значение целевой функции.

Относительно пологий спад выпадений после прохождения облака над населенными пунктами обуславливается радиоактивным распадом.

Рассмотрим также такую возможность кода РОМ, как получение профиля целевой функции вдоль произвольной траектории. Для этого активируйте, например, окно с целевой функцией «Выпадения» и выполните команду меню «Профили→Сечение». Откроется окно «Профили по маршруту». В этом окне нажимайте на фоне карты-подложки правой кнопкой «мыши» для задания координат вершин ломаной линии, ломаная отобразится в виде красной траектории. После этого нажмите кнопку «Показать профили». Например, можно получить следующую картину (рисунок 4.61).

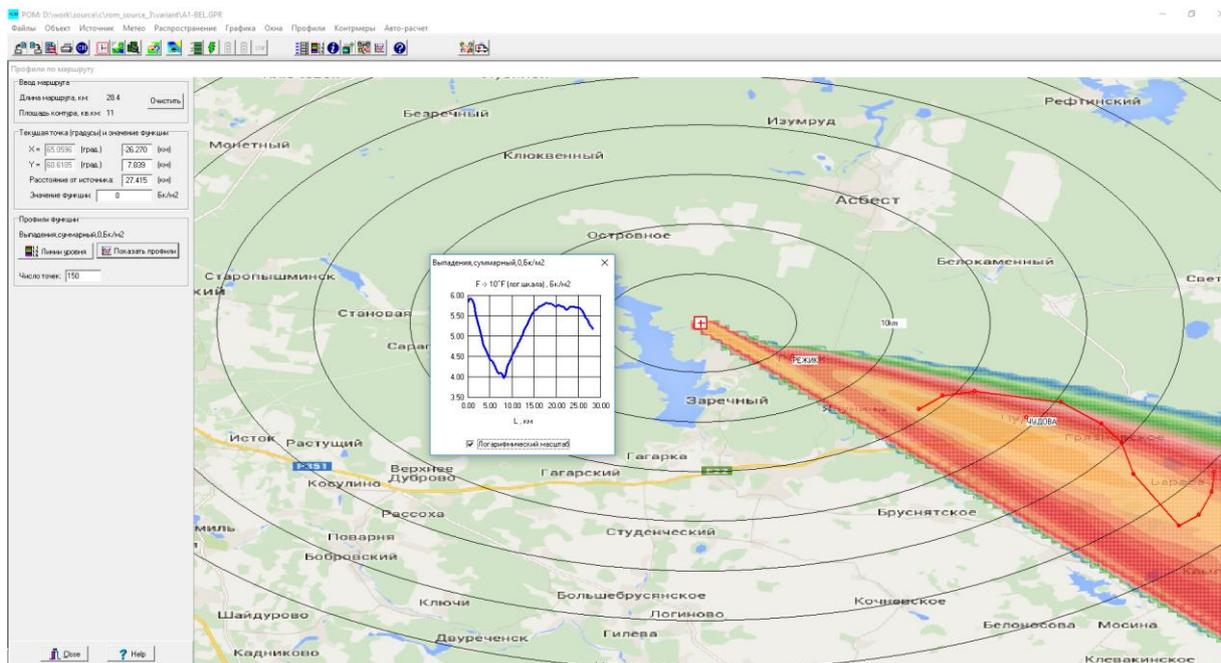


Рисунок 4.61. Выпадения вдоль заданной пользователем траектории

ЛИТЕРАТУРА

1. «Отчет о верификации и обосновании программного средства «Программа для расчета радиационной обстановки в мезомасштабе (за пределами промышленной площадки объекта использования ядерной энергии). Версия 1.0(РОМ)», № 4837-Н.4х.241.9Б.17.1018-3-Р/2, ИБРАЭ РАН, М., 2018, 243 с.
2. ИБРАЭ РАН. Отчет о НИР. Верификация компьютерной системы НОСТРАДАМУС для прогнозирования и анализа радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС. Верификационный отчет. М., 2001.
3. Арутюнян Р. В., Беликов В. В., Беликова Г. В., Сороковикова О. С. и др. Новые эффективные численные методики моделирования процесса распространения радионуклидов в атмосфере и их практическое использование. Известия академии наук, серия Энергетика, № 4, 1995.
4. Беликов В. В., Беликова Г. В., Фокин А. Л., Сороковикова О. С. и др. Анализ сравнения нормативных моделей переноса радионуклидов в атмосфере с лагранжевой моделью, используемой в интегрированном пакете «NOSTRADAMUS». Препринт ИБРАЭ РАН, 1996.
5. Grisenko A. I., Belov N. S., Semenov V. N., Sorokovikova O. S. The Unique Experiments on the Assessment of Accident Consequences at the Gas Transport Systems. Society for Risk Analysis — EUROPE, Stockholm, 1997, pp. 724—729.
6. Boughton B. A., Delaunoy J. M., Dunn W. E. A Stochastic Model of Particle Diffusion in the Atmosphere. // Boundary Layer Meteor. 1987. Vol. 40, pp. 147—163.
7. Zanetty P. New Monte Carlo scheme for simulation lagrangian particle diffusion with wind shear effects // Appl. math. modelling, 1984. Vol. 8, pp.188—192.
8. Костриков А. А., Новицкий М. А. Численное моделирование распространения примеси от точечного источника в условиях бризовой циркуляции // Труды ИЭМ, вып. 37 (120), 1986. 25—38 с.
9. ИБРАЭ РАН. Отчет о НИР. Верификация компьютерной системы «НОСТРАДАМУС» для прогнозирования и анализа радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС. Верификационный отчет. М., 2001.
10. Методические рекомендации по выбору исходных данных и параметров при расчете радиационных последствий аварий на АЭС. Утверждено Ген, директором ВНИИАЭС А. А. Абагяном, директором ГНЦ-ИБФ Л. А. Ильиным, Ген. Директором НПО ТАЙФУН А. Д. Орлянским, директором ИБРАЭ РАН Л. А. Большовым, Техническим директором концерна Росэнергоатом Б.В. Антоновым. М., 2001.
11. Гусев Н. Г., Дмитриев П. П. Цепочки радиоактивных превращений. Справочник. М. : Энергоатомиздат, 1994.
12. Справочник. Атмосфера. — Л. : Гидрометеиздат, 1991, 509 с.
13. Бызова Н. Л., Шнайдман В. А., Бондаренко В. Н. Расчет вертикального профиля ветра в пограничном слое атмосферы по наземным данным. Метеорология и гидрология, 1987, № 11, 75—83 с.

14. Gryning. Atmospheric environment, 1987, Vol. 21, pp. 79—89.
15. ЕГАСКРО. Проект. Методика расчета рассеяния радиоактивных веществ в атмосфере при аварийных выбросах. Обнинск, 2001, НПО ТАЙФУН.
16. *Randerson D.* Atmospheric science and Power Production. Technical Information Center, Office of Scientific and Technical Information. United States Department of Energy, 1994, Vol.1.
17. *Hanna S. R.* Review of Atmospheric Diffusion Models for Regulatory Applications. — WMO Techn. Note N177, 1982, 42 p.
18. *Бызова Н. Л., Гаргер Е. К., Иванов В. Н.* Экспериментальные исследования атмосферной диффузии и расчеты рассеяния примеси. Л. : Гидрометеиздат, 1991.
19. Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения. Нормативно-технический документ стран-членов СЭВ и СФРЮ 38.220.56-84. М. : Энергоиздат, 1984.
20. Методические указания по расчету радиационной обстановки в окружающей среде и ожидаемого облучения населения при кратковременных выбросах радиоактивных веществ в атмосферу. Технический документ МПА-98. Утвержден Министром РФ по атомной энергии и Зам. Главного государственного санитарного врача по спецвопросам 10.12.98.
21. *Overcamp T. J., Fjeld R. A.* An Exact Solution to the Gaussian Approximation for gamma Absorbed Dose Due to a Ground-Level Release. HealthPhysics, Vol. 44, No. 4, 1983, pp. 367—372.
22. *Машкович В. П., Кудрявцева А. В.* Защита от ионизирующих излучений. — М.: Энергоатомиздат, 1995. — 496 с.
23. Методы расчета распространения радиоактивных веществ в окружающей среде и доз облучения населения. — М.: ИНТЕРАТОМЭНЕРГО, 1992.
24. РБ_106-15. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии «Рекомендуемые методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух»
25. Generic Models for use in Assessing the Impact of Discharges of Radioactive Substances to the Environment. SafetyReportsSeries № 19. Vienna: IAEA, 2000.
26. Практические рекомендации по вопросам оценки радиационного воздействия на человека и биоту. Под общей редакцией И.И. Линге и И.И. Крышева. — М., 2015. — 265 с.
27. ICRP Database of Dose coefficients: Workers and Members of the Public. CD-ROM. Elsevier Science. 1998.
28. *Keith F. Eckerman, Jeffrey C. Ryman.* External exposure to radionuclides in air, water, and soil. U. S. Environmental Protection Agency, EPA-402-R-93-081. Washington, DC, 20460, 1993.
29. IAEA 2014. Safety Standards for protecting people and the environment. Radiation Protection and Safety of Radiation Sources: International Basic Safety Standards. General Safety Requirements. Part 3. No. GSR Part 3. Vienna, 2014. — 471 p.

30. МАГАТЭ, 1998. Руководство по радиационной защите при авариях на ядерных реакторах. IAEA-TEC-DOC-955.
31. ICRP, 1994. Age-dependent doses to members of the public from intake of radionuclides: Part 2. Ingestion dose coefficients. ICRP Publication Press, 1994.
32. ИБРАЭ РАН. Отчет о НИР «Разработка компонентов интегрированной системы кодов нового поколения для анализа и обоснования безопасности реакторов на быстрых нейтронах с жидкометаллическим теплоносителем и их топливных циклов. Этап 2011 года» по теме «Разработка программного модуля, реализующего разработанную модель эволюции натриевых аэрозолей, подготовка к имплементации в код «НОСТРАДАМУС». М., 2011.
33. Влияние влажности воздуха на дисперсность аэрозолей натрия. Отчет ФЭИ инв. № 8191, Обнинск, 1992.
34. The computer code. Ivanenko V. N., Zybin V. A., Bakuta N. N. International Topical Meeting Obninsk, Russia, October 3—7, 1994. SODIUM COOLED FAST REACTOR SAFETY. PROCEEDINGS, Vol. 3.
35. Характеристики дисперсности натриевых аэрозолей при их распространении в атмосфере. Отчет ФЭИ инв. № 7866, 1991.
36. *Morewitz H. A. et al.* Combustion of sodium in the open atmosphere. IAEA Specialist's Meeting on Sodium Fires and Prevention. Cadarache. 20—24 Nov. 1978, IWGFR/28.
37. *Райст П.* Аэрозоли. Введение в теорию. — М.: Мир. — 1987.

Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК

Семенов В. Н., Сороковикова О. С., Дзама Д. В.

Программное средство для расчета радиационной обстановки
в мезомасштабе (за пределами промышленной площадки объекта
использования ядерной энергии)

УЧЕБНАЯ ВЕРСИЯ 1.0

РОМ/Е1.0

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Редактура, корректура: *Суркова И.Е.*

Дизайн и верстка: *Наконечная Е. Л., Митрофанова И.А.*

Художественное оформление обложки: *Пузанков К. В.*

Оригинал-макет подготовлен ИБРАЭ РАН

Иллюстрации приведены в авторской редакции

Оригинал-макет подготовлен ИБРАЭ РАН

Иллюстрации приведены в авторской редакции

Сдано в набор 10 мая 2018 г. Подписано в печать 19.09.2018 г.

Формат 60×90^{1/8}. Бумага офсетная 80 г/м²

Гарнитура «Times New Roman», «Arial»

Уч.-изд. л. 8,37. Усл.-печ. л. 16,4

Заказное