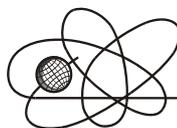




*Российская Академия Наук*

РОССИЙСКАЯ АКАДЕМИЯ НАУК

**ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ  
БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ  
АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ**



**ИБРАЭ**

RUSSIAN ACADEMY OF SCIENCES

**NUCLEAR SAFETY  
INSTITUTE**

Препринт ИБРАЭ № IBRAE-2017-06

Preprint IBRAE-2017-06

**Бакин Р.И., Зарянов А.В., Киселев А.А., Красноперов С.Н., Меркушов В.П.,  
Припачкин Д.А., Шведов А.М., Шикин А.В.**

**РАСЧЕТНО-ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС  
RELTRAN ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ  
ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ.  
РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ**

**Бакин Р.И., Зарянов А.В., Киселев А.А., Красноперов С.Н., Меркушов В.П., Припачкин Д.А., Шведов А.М., Шикин А.В.** РАСЧЕТНО-ПРОГНОСТИЧЕСКИЙ КОМПЛЕКС RELTRAN ДЛЯ АНАЛИЗА БЕЗОПАСНОСТИ ОБЪЕКТОВ ЯДЕРНОГО НАСЛЕДИЯ. РАЗРАБОТКА КОНЦЕПЦИИ. Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № ИБРАЭ-2017-06 — М: ИБРАЭ РАН, 2017. — 18 с. — Библиогр.: 10 назв. — 56 экз.

Аннотация

В работе рассмотрена концепция базового расчетно-прогностического комплекса RELTRAN (РПК «В»), разрабатываемого в ходе выполнения НИР «Создание практической методологии комплексного обоснования безопасности объектов наследия, пунктов захоронения радиоактивных отходов, включая разработку и внедрение системы кодов и расчетно-прогностических комплексов» в рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 - 2020 годы и на период до 2030 года».

Комплекс предназначен для оценки параметров атмосферного выброса, моделирования атмосферного переноса радиоактивных веществ, оценки параметров радиационной обстановки и определения необходимости и эффективности контрмер и, наряду с другими базовыми РПК, входит в единый комплекс РПК «М».

Исходя из назначения и решаемых задач, определен состав физических и математических моделей комплекса РПК «В» и сформулированы функциональные требования к ним. Определены необходимые для функционирования комплекса группы исходных данных, его функциональные и программные блоки, принципы их работы и информационного взаимодействия.

©ИБРАЭ РАН, 2017

**Bakin R.I., Zaryanov A.V., Kiselev A.A., Krasnoperov S.N., Merkuшов V.P., Pripachkin D.A., Shvedov A.M., Shikin A.V.** CALCULATION AND FORECASTING SYSTEM RELTRAN FOR SAFETY ANALYSIS OF THE NUCLEAR LEGACY FACILITIES. CONCEPT DEVELOPMENT. Preprint / Nuclear Safety Institute RAS IBRAE-2017-06 — Moscow: NSI RAS, 2017 — 18 p. — Bibliogr: 10 items.

Abstract

The paper considers the concept of the basic calculation and forecasting system RELTRAN (CFS "R"). The system is developed in the course of the R & D "Establishment of practical methodology for comprehensive safety justification of the nuclear legacy facilities and radioactive waste disposal sites, including the development and implementation of system of codes and calculation and forecasting systems" within the framework of the Federal Target Program "Nuclear and Radiation Safety for 2016-2020 and until 2030".

The system is designed to assess the parameters of atmospheric release, to simulate the atmospheric transport of radioactive substances, to assess the parameters of radiation situation and to determine the need for and effectiveness of countermeasures, and, along with other basic CFSs, is a part of the integrated CFS "M" complex.

Based on the purpose and tasks to be solved, the composition of the physical and mathematical models of the complex CFS "R" is determined, and the functional requirements for them are formulated. The necessary initial data sets, functional and program modules, the principles of their operation and information interaction are determined for the functioning of the system.

©Nuclear Safety Institute, 2017

# Расчетно-прогностический комплекс RELTRAN для анализа безопасности объектов ядерного наследия. Разработка концепции

*Бакин Р.И., Зарянов А.В., Киселев А.А., Красноперов С.Н., Меркушов В.П., Припачкин Д.А., Шведов А.М., Шикин А.В.*

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ НАУКИ  
ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
РОССИЙСКОЙ АКАДЕМИИ НАУК  
115191, Москва, ул. Б. Тульская, 52  
тел.:(495) 955-23-38, эл. почта: rnk@ibrae.ac.ru

## Содержание

Введение .....	4
1 Цель, назначение, решаемые задачи .....	4
2 Функциональные требования .....	5
3 Исходные данные .....	8
4 Схема взаимодействия функциональных блоков .....	11
5 Архитектура РПК «В» .....	13
Заключение .....	17
Литература .....	18

## Введение

В рамках Федеральной целевой программы «Обеспечение ядерной и радиационной безопасности на 2016 – 2020 годы и на период до 2030 года» в ИБРАЭ РАН выполняется НИР «Создание практической методологии комплексного обоснования безопасности объектов наследия, пунктов захоронения радиоактивных отходов, включая разработку и внедрение системы кодов и расчетно-прогностических комплексов».

Работа по созданию практической методологии комплексного обоснования безопасности объектов ядерного наследия (ОЯН), пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) предполагает ее реализацию в виде расчетно-прогностического комплекса (далее - РПК «М»). Этот комплекс будет интегрировать в единую систему базовые расчетно-прогностические комплексы (коды): «И» – источник, «Б» – барьеры безопасности, «В» – выбросы, «С» – сбросы, «Г» – гидрогеология и «Н» – неопределенности. Каждый из этих базовых РПК предназначен для решения соответствующих задач обоснования безопасности. Данная статья посвящена одному из базовых комплексов, а именно РПК «В» RELTRAN. Она является первой в планируемой серии статей о создаваемом РПК «В».

## 1 Цель, назначение, решаемые задачи

Расчетный код РПК «В» RELTRAN (RELease and TRANsport) предназначен для решения задач, связанных с обоснованием безопасности объектов ядерного наследия (ОЯН) и пунктов захоронения РАО как в условиях нормальной эксплуатации, так и при нештатных ситуациях, для оценки безопасности которых актуальны поступления (выбросы) радиоактивных веществ в атмосферу. В перечень решаемых задач RELTRAN входят оценка параметров атмосферного выброса, моделирование атмосферного переноса радиоактивных веществ, оценка параметров радиационной обстановки и определение необходимости и эффективности контрмер.

RELTRAN должен позволять проводить расчеты параметров радиационной обстановки с учетом физических особенностей распространения радиоактивных веществ (РВ) в атмосфере для выбросов следующих сценариев:

- точечный источник на произвольной высоте (классический подход);
- выбросы, сопровождающиеся взрывами и пожарами;
- выбросы из вентиляционных систем;
- вторичный подъем радиоактивных аэрозолей с поверхности земли;
- выброс аэрозолей продуктов горения натрия;
- выброс тяжелых газов.

В ходе работ по созданию РПК «В» необходимо решить ряд специализированных задач:

а) Разработка технологической цепочки сопряжения РПК «В» и РПК «С» в части передачи данных из гидросферы в атмосферу при моделировании выноса активности из водоемов и донных отложений при внешних экстремальных воздействиях.

Вынос активности с поверхности водоемов и при обнажении донных отложений требует разработки сквозной расчетной процедуры, начиная от формирования источника (концентраций радиоактивности в водоеме и профилей заглубления в донных отложениях) до выхода радиоактивных веществ в атмосферу, их распространения в атмосфере, формирования поверхностных выпадений и доз облучения.

б) Адаптация и настройка метеорологической модели

Метеорологическая модель позволяет проводить адаптацию под работу с приоритетными ОЯН и обладает широким спектром параметризаций, определяющих перенос тепла и массы в атмосфере, например, учет сезонной изменчивости метеорологической обстановки, оптимизация математических моделей, определяющих параметризацию приземного слоя атмосферы. Выбор оптимальных параметров не однозначен и требует в каждом случае проведения специального анализа. При этом точность прогноза параметров радиационной обстановки напрямую зависит от выбранных сочетаний математических моделей.

в) Учет результатов метеорологических и аэрологических наблюдений сети мониторинга вблизи ОЯН.

Включение этих данных в метеорологический модуль соответствует современному уровню и позволяет повысить точность прогноза пространственно-временных метеорологических полей и связанных с ними целевых радиационных характеристик при работе РПК «В» в оперативном режиме.

г) Использование пространственно-временных полей метеорологических параметров при оценке последствий аварийных выбросов

Современные подходы моделирования распространения веществ в атмосфере, основанные на использовании трехмерных пространственно-временных метеорологических полей, повышают точность прогноза. Такие метео данные могут быть получены с помощью современных метеорологических моделей, например WRF-ARW (Weather Research and Forecasting Model) [1]. При этом модель WRF-ARW требует предварительной адаптации под погодные условия, наблюдаемые в районе расположения выбранных ОЯН.

д) Внедрение методов статистического анализа радиационных рисков для решения задач обоснования безопасности.

В рамках работ по созданию РПК «В» предполагается разработка блока оценки неопределенностей, основанного на использовании данных мониторинга и моделирования в районе расположения ОЯН. При этом будет возможно проводить оценки радиационных рисков на основе учета истории метеонаблюдений за длительные периоды времени (годы), результатом которых будут плотности вероятности рисков и доз облучения населения, проживающего в ближней зоне.

е) Рассмотрение проблемы обращения с графитовыми кладками.

Потенциальным источником возможного загрязнения окружающей среды могут стать несанкционированные (аварийные) выбросы, связанные с решением проблемы утилизации графитовых кладок уран-графитовых реакторов (УГР). В настоящее время в России накоплено около 60 тыс. т радиационно загрязненного графита, часть которых относится к ОЯН, и таким образом, проблема утилизации графитовых кладок представляется актуальной. Кроме того, 2 крупных радиационных инцидента - авария на реакторе «Виндскейл Пайл №1» в 1957 году и на IV блоке ЧАЭС в 1986 году - тесно связаны с горением графита и освобождением накопленных в нем радионуклидов.

Таким образом, предполагается, что при создании RELTRAN будет разработано специализированное программное средство оценки и прогнозирования (включая оперативное) радиационной обстановки вокруг ОЯН, в том числе, пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) и АЭС с остановленными энергоблоками, позволяющее применительно к атмосферным выбросам решать полный спектр задач анализа радиационной безопасности: от количественной оценки параметров выброса до расчета предельно допустимых величин выбросов, доз облучения, рисков, а также разработку рекомендаций по мерам защиты и оценку неопределенности полученных результатов. Подобный универсальный комплекс для объектов наследия с учетом особенностей их эксплуатации создается в России впервые. Универсальность комплекса будет обусловлена также широким классом сценариев событий, моделируемых комплексом, включая, например, выброс радиоактивных веществ через систему вентиляции или выход в атмосферу при демонтаже установки. При этом актуальной является задача объединения в рамках единого программного средства существующих наиболее современных математических моделей физических процессов и их доработка с учетом того, что они должны функционировать в составе одного программного комплекса.

## **2 Функциональные требования**

Функциональные требования к РПК «В» (RELTRAN) определяются необходимостью учета основных возможных сценариев развития аварий на ОЯН, современным уровнем моделирования распространения веществ в атмосфере, требованиями национальных и международных нормативных документов в области радиационной безопасности, требованиями к информационному обмену как внутри RELTRAN, так и в рамках РПК «М».

На основе перечня исходных событий на ОЯН, которые могут привести к выбросам радиоактивных веществ в атмосферу, определен набор сценариев формирования источника атмосферного выброса, описание которых требует разработки комплексных физических и математических моделей процессов. Необходимо также учесть, что выбросы могут иметь определённые физические особенности распростране-

ния, возникающие при моделировании последствий таких инцидентов и аварий. Классические подходы для таких сценариев без специальных модификаций не применимы. К указанным особенностям относятся:

- распространение в результате взрывов и пожаров (сценарий формирования источника - пожар и взрыв на объекте, падение самолета, внешний пожар, ударные волны от взрывов на других объектах и проходящем транспорте);
- распространение при выбросах из вентиляционных систем (сценарий формирования источника - нормальная эксплуатация и авария с выбросом РВ через вентиляционные системы);
- распространение радиоактивных аэрозолей, образовавшихся в результате вторичного подъема с твердых поверхностей (сценарий формирования источника - вынос с радиоактивно загрязненных территорий, обнажение донных отложений в результате нарушения водного баланса водоема, падение технологического оборудования, разрушение загрязненных зданий и сооружений);
- распространение аэрозолей продуктов горения натрия (сценарий формирования источника - хранилища радиоактивного натрия, вывод из эксплуатации быстрых реакторов);
- распространение тяжелых газов (сценарий формирования источника - хранение гексофторида урана).

Анализ существующих моделей оценки выхода и распространения радиоактивной примеси в атмосфере показал, что в целом существующие модели позволяют моделировать особенности протекания рассматриваемых процессов. Однако в зависимости от степени сложности, эти модели требуют тех или иных исходных данных, которые не всегда доступны. Таким образом, в рамках разработки RELTRAN для моделирования физических процессов будут выбраны модели, обеспечивающие приемлемую точность расчета и имеющие надежное константное обеспечение. При необходимости будет проведена доработка этих моделей с учетом потребностей конкретных конечных пользователей - предприятий атомной отрасли.

Современные реалистичные подходы к моделированию распространения веществ в атмосфере диктуют необходимость использования в RELTRAN уже существующих и хорошо зарекомендовавших себя на практике сторонних свободно распространяемых моделей. В частности, для повышения точности оценки последствий атмосферных выбросов и более детального описания особенностей формирования картины загрязнения, недоступных при использовании классических гауссовых моделей, в лагранжевых моделях распространения примесей в атмосфере планируется использование реальной и прогнозируемой на основе реальной метеорологической информации.

Именно такой подход реализуют современные зарубежные моделирующие системы аналогичного назначения. К сторонним моделям, которые могут быть использованы для обеспечения RELTRAN метеорологическими данными, можно отнести метеорологические модели WRF-ARW [1] и ПЛАВ20 [2]. Для повышения надежности предполагается использование обеих моделей с возможностью выбора типа модели. Использование модели WRF-ARW или ПЛАВ20 в процессе моделирования переноса радиоактивных веществ в атмосфере позволяет получать прогностические метеорологические поля на расстояниях до 1000 км от источника выброса с высокой степенью достоверности. Использование таких моделей в RELTRAN позволит существенно повысить качество прогноза переноса радиоактивных веществ в атмосфере. Включение требования по интеграции метеорологических моделей в качестве модулей метеорологического блока потребует создания специализированного алгоритма их использования, разработки требований по обеспечению этих моделей исходными данными и по передаче данных в другие блоки RELTRAN.

Перечень нормируемых параметров радиационной обстановки и доз облучения населения, установленных в российских и международных нормативных документах, определяет список моделируемых величин (целевых функций) для RELTRAN. Разрабатываемый расчетно-прогностический комплекс должен рассчитывать нормативно регулируемые целевые функции (дозы, предотвращаемые дозы, концентрации и т.д.) при выбросах радиоактивных веществ в атмосферу как в результате аварий, так и в процессе нормальной эксплуатации. В качестве базовых моделируемых величин, которые позволяют проводить анализ, расчет целевых функций и контроль результатов расчета, должны использоваться пространственно-временные распределения концентрации радиоактивных веществ в атмосфере (для каждого нуклида) и плотности загрязнения поверхностей земли и водоемов (для каждого нуклида).

На основе базовых величин должны проводиться расчеты интегральных и дифференциальных дозовых функционалов от суммарного выброса или отдельных нуклидов на отдельные органы и ткани по различным путям облучения с использованием существующих актуальных дозовых коэффициентов [3]. Для соответствия требованиям нормативных документов и в целях обеспечения возможности анализа

расчетных данных, дозиметрическая модель должна рассчитывать дозы за произвольный интервал времени, формирующиеся за счет разных путей воздействия, а именно:

- дозу внешнего облучения от радиоактивного облака и поверхностного загрязнения;
- дозу внутреннего облучения за счет ингаляции от облака (6 возрастных групп) и перорального поступления;
- мощность дозы внешнего гамма-излучения от поверхности и облака.

В случае радиационной аварии список целевых функций, которые должна рассчитывать дозиметрическая модель РПК «В», детально представлен в таблицах 6.1. - 6.5 НРБ-99/2009 [4]. Этот список включает:

- поглощенную дозу за 2 суток на все тело и органы и ткани: легкие, щитовидная железа, гонады, плод, кожа, хрусталик глаза;
- предотвращаемую защитными мероприятиями поглощенную дозу за 10 суток на все тело и органы и ткани: легкие, щитовидная железа, кожа;
- поглощенную дозу за год на органы и ткани: хрусталик глаза, красный костный мозг (ККМ), гонады;
- эффективную дозу, предотвращаемую защитными мероприятиями (ограничение потребления загрязненных продуктов и воды, отселение) за первый и последующие годы, для сравнения с критериями таблицы 6.4. НРБ-99/2009;
- удельные активности некоторых радиологически значимых радионуклидов в пищевых продуктах в течение первого года после аварии.

Также в соответствии с п.6.4 НРБ-99/2009 должна быть реализована возможность расчета эффективной дозы за произвольный интервал времени (для оценки уровня вмешательства в виде временного отселения).

В соответствии с требованиями основных международных норм безопасности [5] необходимо обеспечить расчет следующих величин:

- взвешенная по относительной биологической эффективности (ОБЭ) доза внешнего облучения за период <10 ч на органы и ткани: ККМ, плод, кожа, ткань;
- взвешенная по ОБЭ доза внутреннего облучения за период 30 дней на следующие органы и ткани: ККМ, мозг, щитовидная железа, легкие, толстый кишечник, плод;
- эквивалентная доза на щитовидную железу и плод и эффективная доза за 7 суток;
- поглощенная доза в плоде с учетом относительной биологической эффективности облучения за весь период внутриутробного развития;
- годовая эффективная доза и эквивалентная доза на плод.

В условиях нормальной эксплуатации необходимо рассчитывать:

- нормативы предельно допустимых выбросов (для каждого нуклида) [6];
- годовую эффективную дозу и эквивалентные дозы на органы и ткани.

В настоящее время не все целевые функции обеспечены дозовыми коэффициентами, есть проблемные вопросы. Связаны они, в первую очередь, с расчётами дозы облучения плода. Эти вопросы будут решаться путем выбора соответствующих моделей расчета на основе международных баз данных константного обеспечения.

Таким образом, определен состав моделей и сформулированы функциональные требования к следующим физическим и математическим моделям в составе RELTRAN:

- модель формирования источника выброса в атмосферу радиоактивных аэрозолей в результате ветрового подъема с поверхностей произвольной формы;
- модель формирования источника выброса в атмосферу радиоактивных газов и аэрозолей через вентиляционные системы зданий и сооружений на ОЯН;
- модель формирования источника выброса в атмосферу радиоактивных аэрозолей при демонтаже или разрушении зданий и сооружений, загрязненных радиоактивными веществами;
- комплексная модель оценки последствий в результате пожара, приведшего к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу;
- комплексная модель оценки последствий в результате взрыва, приведшего к выбросу радиоактивных веществ в атмосферу;
- модель переноса радиоактивных веществ в атмосфере (транспортная модель);
- метеорологические модели;
- дозиметрическая модель, риски.

Взаимосвязь этих моделей представлена на рисунке 1.



Рисунок 1 – Взаимосвязь моделей в составе RELTRAN

### 3 Исходные данные

Состав моделей RELTRAN и функциональные требования к ним определяют перечень и объем исходных данных, необходимых для решения поставленных задач.

Исходные данные, необходимые для функционирования RELTRAN, можно классифицировать по следующим группам:

- данные об источнике выброса (активность, нуклидный состав, физико-химические формы, эффективная высота выброса, длительность выброса, геометрия, дисперсный состав, термодинамические параметры);
- метеорологические параметры (скорость и направление ветра, тип подстилающей поверхности, орография, осадки, класс устойчивости атмосферы, высота слоя перемешивания, динамическая скорость трения, масштаб Монина-Обухова);
- данные для оценки дозовых функционалов (скорости сухого и гравитационного осаждения, скорость вымывания осадками, скорость дыхания, дозовые коэффициенты).

Среди указанных данных можно выделить класс, который относится к константному обеспечению расчетов. Такие данные, как правило, доступны через базы данных международных организаций (например, МАГАТЕ, МКРЗ) или через международные системы обмена данных (например, NCEP) и рекомендованы к использованию. К таким данным относятся: радиационные характеристики радионуклидов; дозовые коэффициенты для различных целевых функций; параметры моделей распространения примеси в атмосфере и осаждения, орография, типы подстилающих поверхностей и ряд других данных. Для каж-

дого такого типа данных проведен анализ, на основе которого были выбраны источники с наиболее современными данными, удовлетворяющими требованиям RELTRAN.

Другая часть является входными данными, которые задаются пользователем, рассчитываются в RELTRAN или передаются из других РПК. В общем случае для штатного функционирования РПК «В» RELTRAN в составе интегрированной системы необходимо обеспечивать его входными данными из РПК «И», «Б» и «С». Однако объем, полнота и методы получения данных будут зависеть от постановки задачи, которую необходимо решить с помощью RELTRAN и условий оперативности. В частности, данные об источнике выброса можно оценить несколькими способами. Первый способ – поиск, например, по базам данных наиболее близких к исходному событию условий формирования источника. Способ не всегда эффективный, но самый быстрый с точки зрения временных затрат. Второй способ – использование специализированных кодов, моделирование аварийных процессов на объекте, являющемся источником выброса. Способ, вероятно, наиболее точный, хотя в оперативных условиях возможен дефицит в исходных данных, а временные затраты на оценку источника могут быть велики. Третий способ – экспертная оценка. Опыт работы экспертов в условиях реальных инцидентов и аварий, а также на учениях и тренировках, является основой того, чтобы оценивать этот способ как оптимальный с точки зрения соотношения «временные затраты / качество оценки источника».

В «метеорологический блок» должны входить данные для подготовки метеорологических полей по одному из четырех возможных подходов. Содержимое блока будет варьироваться в зависимости от используемого подхода к учету трехмерных метеорологических полей: «Базовый», «Базовый + орография» (дополнительно указываются пути к файлам с орографией и типами подстилающей поверхности), «Статистика наблюдений + орография» (указываются параметры доступа к базе данных с трехмерными полями за несколько лет и пути к файлам с орографией и типами подстилающей поверхности) и «Метеорологические поля» (указываются параметры доступа к данным анализа и реанализа полномасштабной метеорологической модели). Область построения метеорологических полей определяется расчетной областью, заданной пользователем. Указанные модули в зависимости от конфигурации системы могут быть частично отключены (в силу их ресурсоемкости, ориентированности на конкретный ОЯН или особенностей отчуждения РПК «В» для различных категорий пользователей).

Входные данные для «основного расчетного блока» можно разделить по следующим категориям:

- данные по параметрам расчетной области;
- данные по параметрам сетки результатов;
- данные по целевым функциям для расчета на сетке;
- данные по точкам индикации и населенным пунктам (в отличие от данных на сетке, в качестве результата на этих объектах выступает динамика заказанных целевых функций, например, зависимость мощности дозы от времени);
- данные по параметрам расчета;
- константное обеспечение расчетов.

Данные по параметрам расчетной области определяют область, для которой РПК «В» будет проводить расчеты (транспортная модель будет функционировать только в этой области). Расчетная область должна быть ограничена в зависимости от режима работы (например, режим использования «Базовый» метеорологической модели должен быть ограничен 30-километровой зоной вокруг ОЯН). Расчетная область должна геометрически включать положение источника выброса и область результатов (см. рисунок 2).

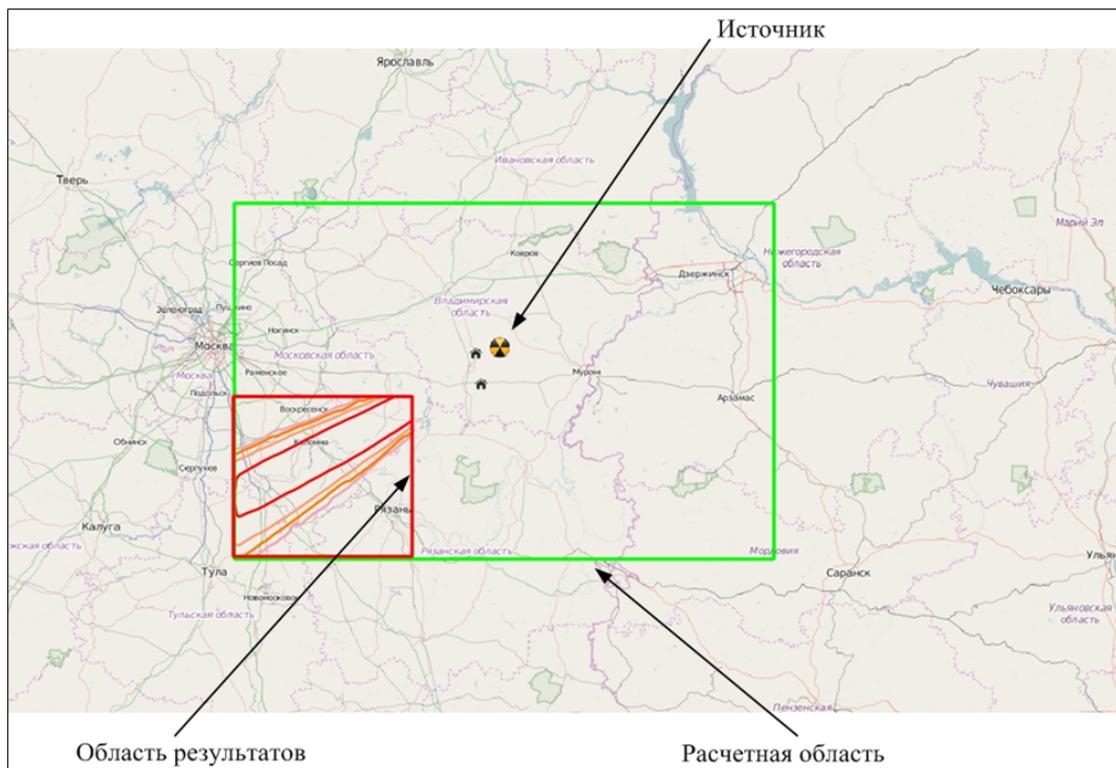


Рисунок 2 – Взаимное расположение расчетной области, источника и области результатов

Параметры сетки результатов включают тип расчетной сетки, ее дискретизацию, а также географическую привязку. Существует ряд задач, когда требуется моделирование параметров радиационной обстановки на значительном расстоянии от источника, поэтому для оптимизации процесса расчета таких задач сетка результатов может не совпадать с сеткой расчетной области.

Данные по целевым функциям включают перечень целевых функций, которые будут рассчитаны на сетке, определенной в блоке «область результатов».

Данные по расположению точек индикации и населенных пунктов включают перечень точек индикации и населенных пунктов, географические координаты (система геодезических параметров WGS-84) и целевые функции, которые должны быть рассчитаны в этих точках. Все точки должны находиться в расчетной области. В точках индикации рассчитывается и хранится динамика целевых функций. Пример выдачи результата в населенном пункте по целевой функции «мощность дозы» приведен на рисунке 3. Увеличение числа таких точек приводит к увеличению требований к размерам оперативной памяти для РПК, поэтому такие расчеты проводятся в отдельных точках, а не на всей расчетной сетке.

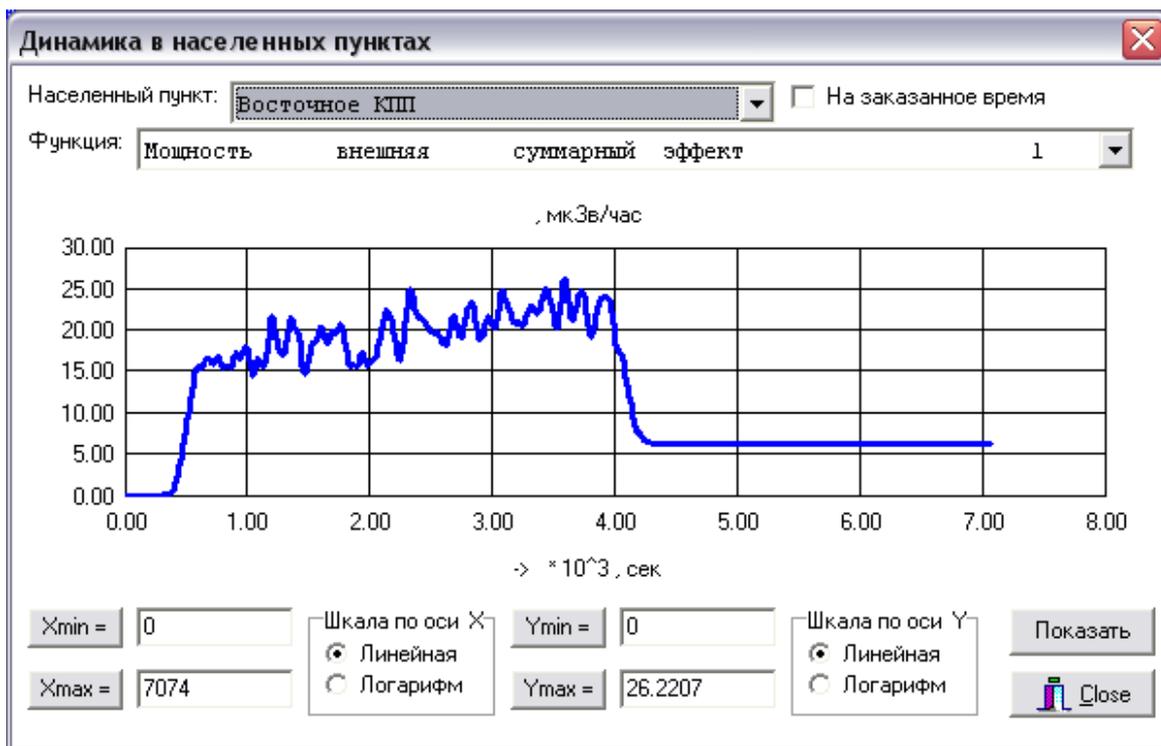


Рисунок 3 - Динамика мощности дозы в точке индикации

Данные по параметрам расчета включают общие параметры для транспортной модели (число облаков, тип облаков, шаг по времени и др.). Выбор этих параметров обусловлен параметрами расчетной области и области результатов для обеспечения приемлемой точности результатов. В зависимости от решаемой задачи оптимальный выбор параметров может быть разным.

Константное обеспечение должно удовлетворять функциональным требованиям, предъявляемым к моделям в составе РПК «В» RELTRAN, и соответствовать современному уровню подходов к обоснованию безопасности объектов использования атомной энергии, включая ОЯН.

#### 4 Схема взаимодействия функциональных блоков

Схема взаимодействия функциональных блоков RELTRAN и организация информационного обмена как внутри РПК «В», так и в рамках РПК «М» определяются необходимостью обеспечения гибкой и расширяемой структуры РПК, экспорта промежуточных данных в другие РПК и замены отдельных расчетных блоков альтернативными.

Для определения набора функциональных блоков RELTRAN и способов обмена данными был проведен анализ принципов построения современных расчетных кодов, хорошо зарекомендовавших себя при решении задач анализа безопасности, а также широко использующихся в мире моделирующих систем, ориентированных на оценку последствий атмосферных выбросов. Были рассмотрены программный комплекс ANSYS [7], интегральный код СОКПАТ [8], моделирующая система CALPUFF [9], моделирующая система AERMOD [10]. Проведенный анализ показал, что для реализации гибкой и расширяемой структуры расчетно-прогностического комплекса, ориентированного на решение широкого круга задач, необходимо в рамках RELTRAN организовать блочную структуру и зафиксировать потоки данных между ними. Блоки следует разделить по функциональному признаку: блок подготовки источника, блок подготовки метеорологической информации, блок моделирования переноса и доз облучения, блок обработки результатов расчета, управляющий блок и графический интерфейс пользователя. Информационный обмен данными между блоками в целях обеспечения интегрируемости в единую систему целесообразно организовать через файловую систему по принципу системы ANSYS. Для повышения эффективности управления процессом расчета и организации внутренних связей в RELTRAN необходимо выделить управляющий блок (как это сделано в расчетном коде СОКПАТ). Внутри расчетных блоков возможно использование связей как через файловую систему и запуск исполняемого файла, так и с применением

динамически типизированных библиотек. На рисунке 4 приведена предполагаемая схема взаимодействия графического интерфейса пользователя с управляющим блоком RELTRAN для случая распределённой архитектуры RELTRAN.

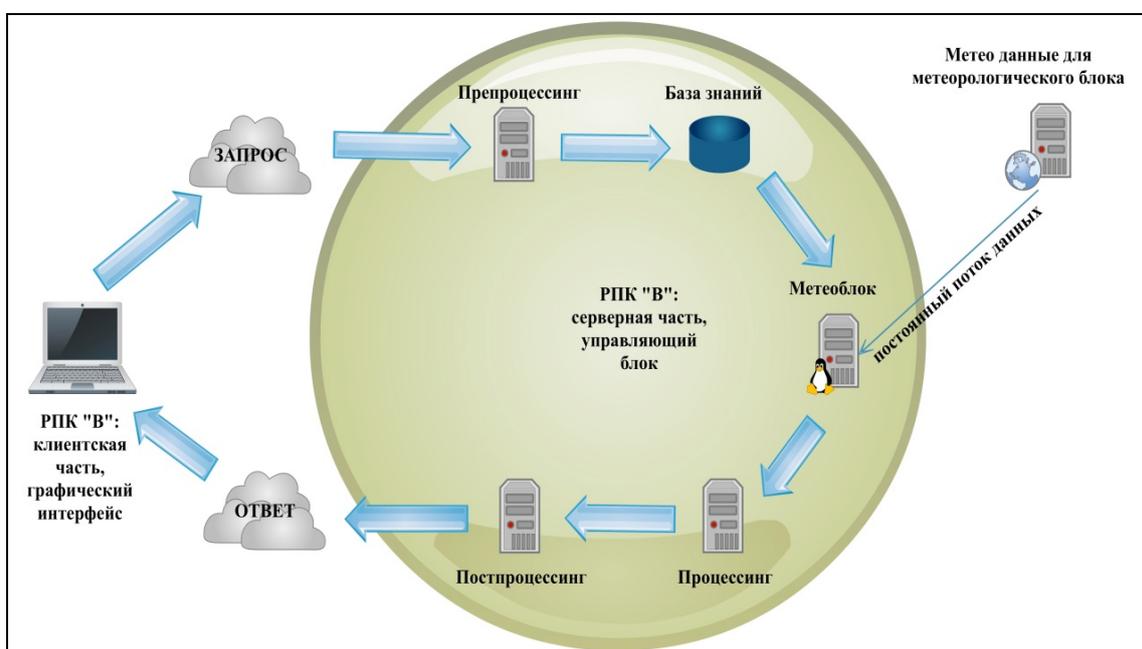


Рисунок 4 - Предполагаемая схема взаимодействия блоков РПК «В»

Блок преппроцессинга включает блок подготовки параметров источника и метеорологический блок. В блок процессинга входят основной расчетный блок RELTRAN, блок оценки неопределенностей и блок гибридного мониторинга (коррекция рассчитываемых параметров с учетом данных натурных измерений). Блок обработки результатов расчета (постпроцессинга) проводит подготовку данных по населенным пунктам, расчёт изолиний и отрисовку их на карте, формирует данные в виде отчета, готовит данные для записи в базу знаний RELTRAN.

В рамках этих блоков могут создаваться конфигурации расчетных модулей, которые будут определяться исходя из событий и физических процессов, требующих рассмотрения, передача данных между ними будет осуществляться под управлением «управляющего блока». Кроме этого, для обеспечения входными данными каждого последующего расчетного блока могут использоваться различные наборы математических моделей физических процессов, при этом, естественно, результаты будут разной степени точности. Поэтому важным является контроль и анализ потока данных от одного расчетного блока к другому.

Архитектура комплекса и порядок информационного обмена должны обеспечить функционирование RELTRAN в различных режимах работы в зависимости от задействованных ресурсов и используемых моделей, включая:

- локальный режим для работы на одном персональном компьютере (допускается ограничение функциональных возможностей, исходя из доступных вычислительных ресурсов и доступных внешних данных);
- распределенный режим работы (полнофункциональный режим с доступом к базе знаний, исходя из категорий пользователей).

С точки зрения использования метеорологических данных должна быть предусмотрена возможность работы RELTRAN в:

- упрощенном режиме с использованием локальных метеоданных;
- упрощенном режиме с использованием алгоритмов модификации профилей ветра с учетом локальных особенностей местности;
- уточненном режиме для решения задач обоснования безопасности ОЯН с использованием временных рядов по погодным условиям;
- уточненном режиме с возможностью оценки параметров радиационной обстановки на основе реальных данных с учетом метеорологического прогноза на 2 суток.

Должны быть проработаны сценарии задач, которые могут быть решены локально (без привлечения в режиме он-лайн внешних ресурсов и методанных), и сценарии для уточненных режимов работы RELTRAN с использованием внешних вычислительных ресурсов в системе с удаленным доступом. Графический интерфейс пользователя необходимо разработать для обоих типов задач.

## 5 Архитектура РПК «В»

Внедрение подходов, позволяющих снизить неопределенности прогнозов за счет более реалистичного моделирования отдельных физических процессов, требует соответствующих вычислительных ресурсов и создания развитых инструментов подготовки данных для проведения расчетов и анализа результатов. Наиболее оптимальной реализацией RELTRAN в этих условиях представляется его построение в виде распределенной системы, позволяющей работать как в локальном, так и в распределенном режимах. Схема взаимодействия программных блоков RELTRAN приведена на рисунке 5.

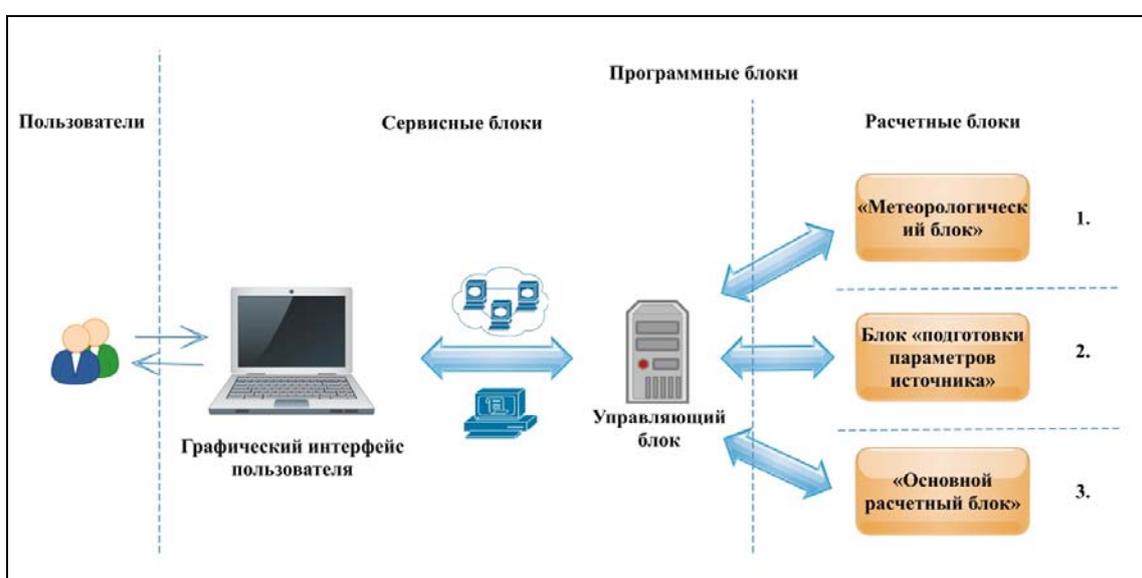


Рисунок 5 - Схема взаимодействия программных блоков РПК «В»

Иерархическая структура RELTRAN включает 5 программных блоков:

1. графический интерфейс пользователя (сервисный блок), отвечающий за ввод исходных данных, просмотр промежуточных результатов, обработку и представление результатов расчета, в том числе, с использованием ГИС-технологий, и экспорт результатов для работы в другие блоки или РПК;
2. управляющий блок (сервисный блок), осуществляющий взаимодействие с графическим интерфейсом пользователя, расчетными блоками и базами данных;
3. блок «подготовки параметров источника» (расчетный блок), включающий набор математических моделей, описывающих процессы, которые могут привести к выбросам радиоактивных веществ в атмосферу;
4. «метеорологический блок» (расчетный блок), осуществляющий подготовку метеорологических данных (трехмерные метеорологические поля);
5. «основной расчетный блок», осуществляющий расчет параметров радиационной обстановки за счет атмосферного переноса радиоактивных веществ, оценку воздействия и выработку рекомендаций по мерам защиты населения, проживающего в пределах 100 км зоны вокруг ОЯН и ПЗРО.

Каждый расчетный блок будет включать в себя набор расчетных модулей, в которых будут реализованы физические и математические модели, и набор сервисных модулей, отвечающих за обработку промежуточных и итоговых результатов расчета, ввод/вывод данных, взаимодействие между блоками и другие, не связанные с проведением расчета функции.

Графический интерфейс пользователя предоставляет специальные формы для ввода исходных данных и инструменты для анализа результатов расчета, оформленные в оконном виде с использованием общепринятых элементов графического представления (поля ввода, выпадающие списки, кнопки, переключатели и др.). Графический интерфейс РПК «В» должен обеспечивать возможность:

- формировать запросы к управляющему блоку и получать ответ с промежуточными и окончательными результатами;
- формировать входные данные для трех расчетных блоков и сценарий работы для управляющего блока;
- просматривать промежуточные результаты для трех расчетных блоков (через управляющий блок).

Предварительная схема работы графического интерфейса пользователя представлена на рисунке 6.

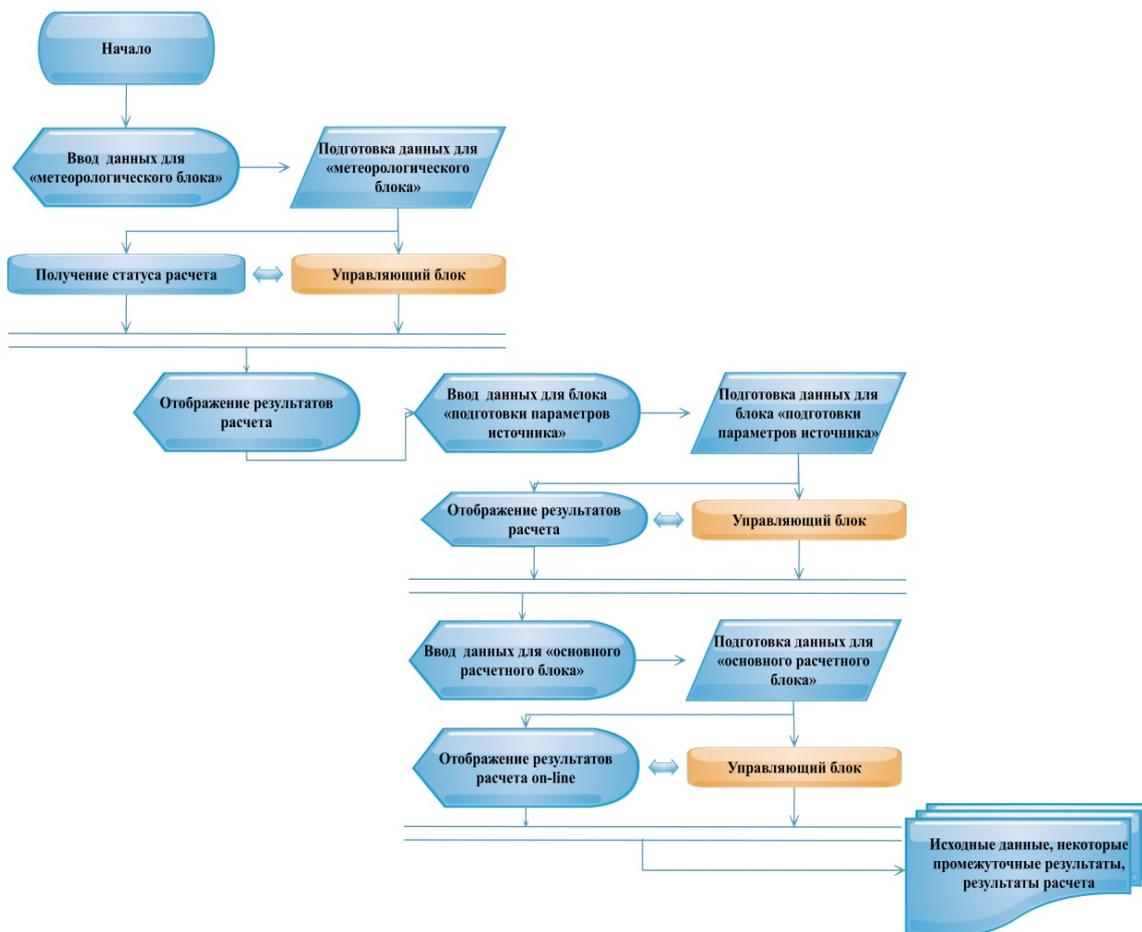


Рисунок 6 - Предварительная схема работы графического интерфейса пользователя RELTRAN

Управляющий блок должен принимать входной набор данных для моделирования и сценарий работы, запускать функции препроцессинга для подготовки всех необходимых данных для проведения расчета, запускать расчет, управлять его выполнением и контролировать процесс, запускать блок постпроцессинга и «возвращать» по запросу результаты расчета графическому интерфейсу. Управление процессом расчета, в частности, включает организацию очередей в асинхронном режиме работы RELTRAN (например, одновременный запрос от нескольких пользователей, работающих с RELTRAN в режиме распределенной системы).

На рисунке 7 представлена предварительная схема управляющего блока, включающая два потока выполнения, отвечающих за обработку входящих запросов и организацию запуска расчетных блоков (возможен асинхронный запуск расчетных блоков). После запуска блока эти два потока работают постоянно. Первый работает в режиме ожидания запроса от графического интерфейса пользователя и, при необходимости, обрабатывает запрос или формирует ответ об окончании расчета. Второй поток ожидает появления во внутренней базе данных необработанного запроса и после его появления управляет процессом

подготовки расчета и непосредственно запуском соответствующего расчетного блока. Результаты помещаются во внутреннюю базу данных, которая также доступна первому потоку выполнения. Таким образом, для повышения эффективности проведения расчетов работа RELTRAN может быть организована в распределенном режиме с привлечением кластерной вычислительной установки.

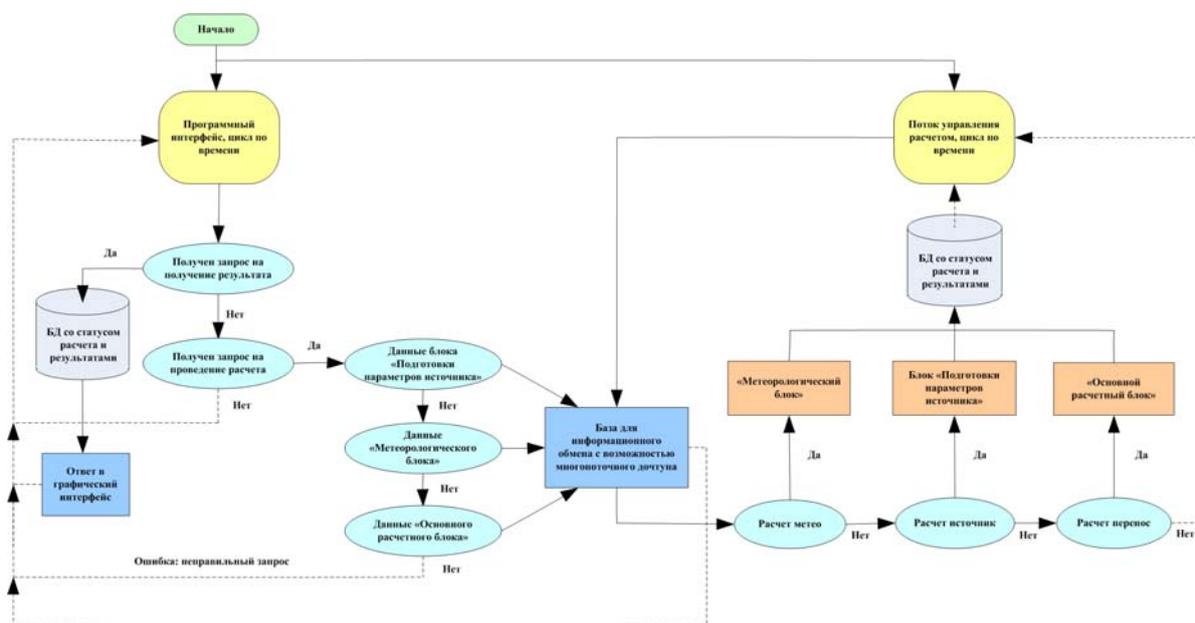


Рисунок 7 - Предварительная схема организации управляющего блока RELTRAN

Блок подготовки параметров источника содержит базовый модуль для ввода данных об источнике выброса (нуклидный состав, высота выброса, физико-химические формы) и специализированные расчетные модули, реализующие модели формирования различных типов источника выброса. Управление блоком осуществляется управляющим модулем через запросы графического интерфейса пользователя. Пользователь может задать параметры источника или подключить специализированные модули. В блоке предусмотрены источники выброса следующих типов: «вентиляционные системы», при разрушении зданий, при ветровом подъеме, при пожаре, при взрыве. Предварительная блок-схема работы блока «подготовки параметров источника» представлена на рисунке 8.



Рисунок 8 - Предварительная схема работы блока «подготовки параметров источника»

Метеорологический блок состоит из модулей, обеспечивающих различные уровни детализации метеорологических полей (скорость и направление ветра, температура, давление, интенсивность осадков) для расчета переноса радиоактивных веществ в атмосфере.

В модуле «Базовый» будет реализована упрощенная классическая метеорологическая модель с однородным стационарным полем ветра с учетом стратификации атмосферы и профиля скорости ветра и коэффициентов диффузии для однородного или неоднородного типа подстилающей поверхности для всей расчетной области. Рельеф местности не учитывается.

В модуле «Базовый + орография» будет реализована метеорологическая модель, учитывающая искажение поля ветра за счет рельефа местности, при этом поле ветра остается стационарным, тип подстилающей поверхности для всей расчетной области - однородный или неоднородный.

В модуле «Статистика наблюдений + орография» будет реализован подход, позволяющий учитывать многолетние наблюдения за метеорологической обстановкой в районе размещения источника выброса. Модель описывает осреднённое поле ветра, взвешенное по направлению и скорости ветра, с поправкой на рельеф и тип подстилающей поверхности (однородный или неоднородный для всей расчетной области).

В модуле «Метеорологические поля» будет реализована полномасштабная метеорологическая модель с неоднородными пространственно-временными полями ветра, учитывающими рельеф местности и неоднородность подстилающей поверхности в расчетной области. Использование модуля предполагает применение кластерной вычислительной установки.

Все модули метеорологического блока подготавливают специальные файлы для основного расчетного блока RELTRAN в универсальном формате, едином для всех модулей. Управление метеорологическим блоком осуществляется через графический интерфейс пользователя.

На рисунке 9 представлена блок-схема «метеорологического блока».

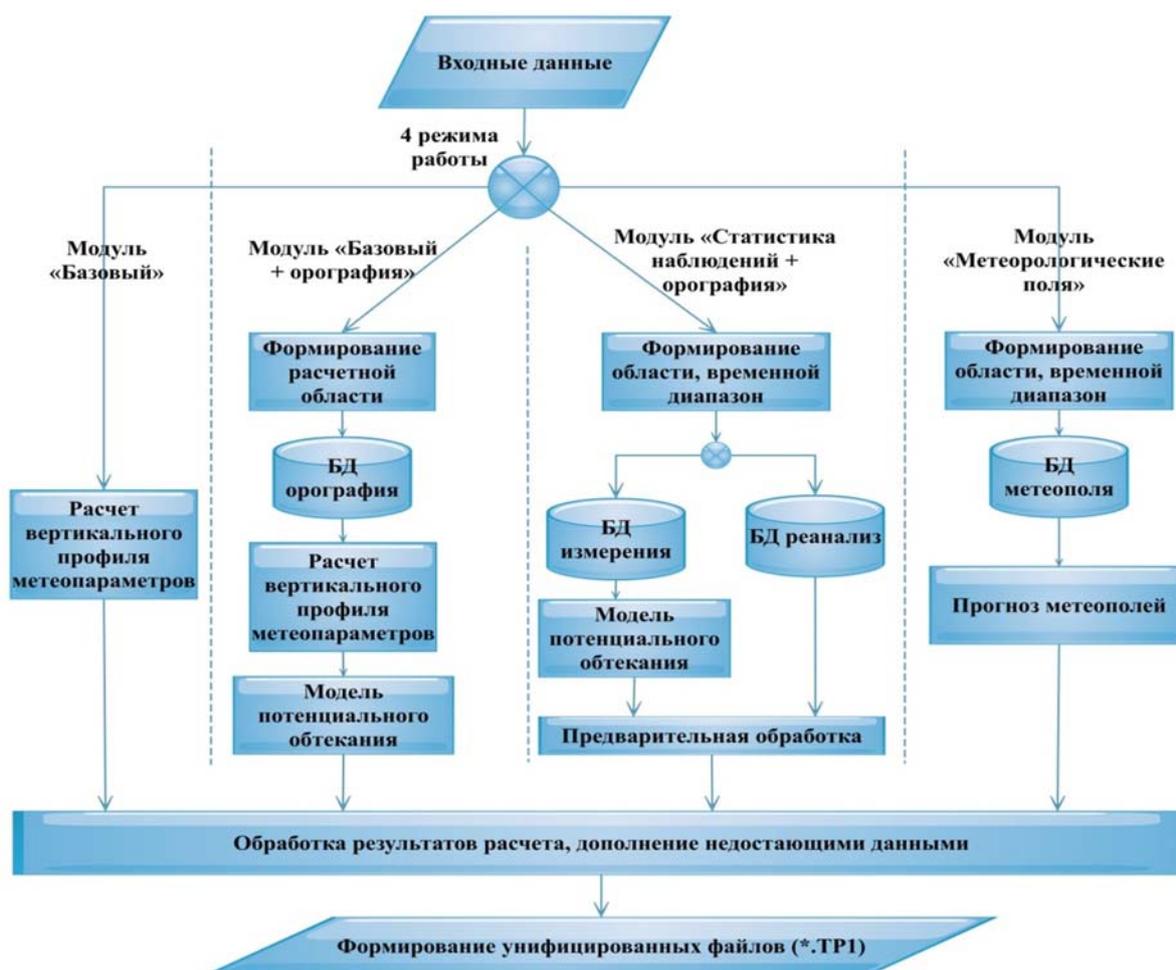


Рисунок 9 - Предварительная блок-схема работы «метеорологического блока»

Основной расчетный блок содержит расчетные модули, предназначенные для решения задач: «прямой расчет», «обратная задача» и «статистика». Для работы каждого модуля используется общая транспортная модель и дозиметрическая модель, на основе которых осуществляется перенос радиоактивных веществ в атмосфере и расчет доз с различным набором исходных данных и параметров расчета. На рисунке 10 представлена блок-схема «основного расчетного блока».

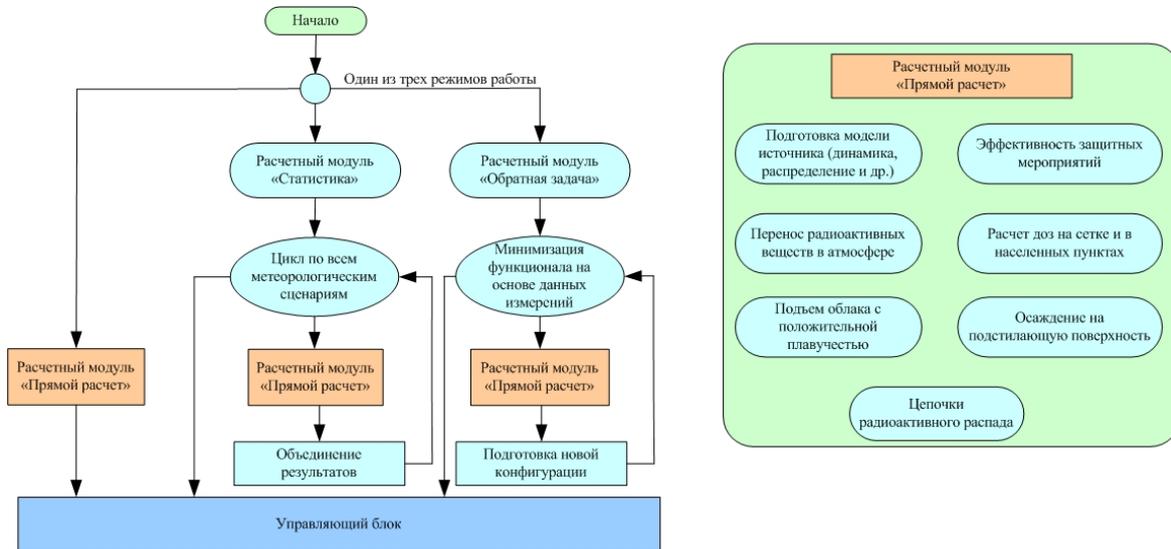


Рисунок 10 - Предварительная блок-схема «основного расчетного блока» РПК «В»

Модуль «прямой расчет» позволяет решать задачу прямого моделирования, используя исходные данные об источнике выброса и специальные файлы из метеорологического блока. Результатами расчета являются поля доз облучения, мощности дозы, плотностей загрязнения, концентраций в воздухе, а также рекомендации по мерам защиты населения, разработанные в соответствии с российскими НРБ-99/2009 и международными нормами безопасности.

Модуль «обратная задача» позволяет оценить параметры источника по результатам измерений мощности дозы, плотностей загрязнения или объемных активностей. Результатами расчета являются активность и нуклидный состав источника выброса.

Модуль «статистика» позволяет получать поля наиболее вероятной радиационной обстановки, формирующейся вокруг объекта в процессе аварийного выброса или выбросов при нормальной эксплуатации. Расчет производится с использованием модуля «Статистика наблюдений + орография» метеорологического блока.

Результаты работы модулей основного расчетного блока RELTRAN записываются в файлы универсального формата, которые используются в блоке обработки и представления результатов расчета.

## Заключение

В рамках разработки программно-прогностического комплекса «Выбросы» - RELTRAN - к настоящему времени проведены следующие работы.

Рассмотрены вопросы разработки технологической платформы базовой версии RELTRAN, технических требований к интеграции RELTRAN в РПК «М», требований к форме и содержанию базы исходных данных (базы знаний) в соответствии с требованиями российских нормативных документов и требований МАГАТЭ, технических требований к физическим и математическим моделям RELTRAN, архитектуры РПК «В».

При разработке технологической платформы проведен анализ современных систем создания программного обеспечения в рассматриваемой области, систематизирован накопленный в ИБРАЭ РАН опыт в области моделирования физических процессов, необходимых для решения задач, определен предвари-

тельный перечень инструментов разработки, включая целевые операционные системы, языки разработки и дополнительные библиотеки.

В рамках выработки технических требований к интеграции рассмотрены особенности функционирования модулей RELTRAN, которые обеспечивают интеграцию в РПК «М». С учетом особенностей RELTRAN (требования к исходным данным, задание начальных граничных условий для моделей и др.) определены принципиальные аспекты информационного обмена RELTRAN с РПК «М» и другими РПК всей системы кодов.

Проведен анализ исходных данных на соответствие требованиям российских нормативных документов и рекомендаций МАГАТЭ в части оценки параметров радиационной обстановки, являющихся критериями для принятия решений о проведении мер защиты.

Определены границы применимости физических и математических моделей в рамках RELTRAN. Рассмотрены модели различного уровня сложности от инженерных оценок до полномасштабных многомерных моделей. Указаны требования, которые представляются оптимальными для решения задач RELTRAN с учетом особенностей сценариев событий, явлений и процессов, которые могут привести к атмосферным выбросам.

В рамках разработки архитектуры (модульной системы) RELTRAN созданы схемы сервисных и расчетных блоков и определен порядок их взаимодействия, который, в том числе, обеспечивает интеграцию RELTRAN с другими РПК. Архитектура учитывает прогрессивную по качеству моделирования (соответственно, и по ресурсоемкости) структуру РПК.

Выполнено детализированное описание создаваемого RELTRAN, включающее описание структуры, режимов работы РПК и возможных его конфигураций, ориентированных на различные технические возможности пользователя. Также предложены варианты использования RELTRAN в распределенном режиме, когда для сложных детальных расчетов используются кластерные вычислительные установки.

Предполагается, что следующим шагом в разработке RELTRAN будет доработка моделей, включенных в состав комплекса, обеспечение их исходными данными и программная реализация комплекса в соответствии с техническими требованиями, приведенными в настоящей статье.

## Литература

1. Skamarock WC, Klemp JB, Dudhia J, Gill DO, Barker D, Duda MG, Huang X-Y, Wang WA //Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR doi:10.5065/D68S4MVH, 2008, 520p.
2. Толстых М.А., Желен Ж.Ф., Володин Е.М., Богословский Н.Н., Вильфанд Р.М., Киктев Д.Б., Крайчук Т.В., Кострыкин С.В., Мизяк В.Г., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Шляева А.В., Эзау И.Н., Юрова А.Ю. // Разработка многомасштабной версии глобальной модели атмосферы ПЛАВ. Метеорология и гидрология. 2015. № 6. С. 25-35.
3. International Commission on Radiological Protection. 2014 Annual report. ICRP, 2015.
4. Нормы радиационной безопасности (НРБ-99/2009). Санитарные правила и нормативы СанПин 2.6.1.2523-09. – М., 2009.
5. Radiation protection and safety of radiation sources: international basic safety standards. General safety requirements. International atomic energy agency. 2014.
6. Методика разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. Утверждена приказом Ростехнадзора от 7 ноября 2012 г. № 639 (зарегистрирована в Минюсте России 18 января 2013 года, регистрационный № 26595).
7. ANSYS Workbench User's Guide, Release 12.1, November 2009, 120 p. Инженерный анализ в ANSYS Workbench: Учеб. Пособ. / В.А. Бруйка, В.Г. Фокин, Н.А. Глазунова, И.Е. Адеянов. – Самара: Самар. Гос. Техн. Ун-т, 2010. – 271 с.
8. Верификационный отчет базовой версии расчетного комплекса СОКРАТ/В1. Отчет ИБРАЭ РАН, 930 с.
9. A User's Guide for the CALPUFF Dispersion Model. J.S. Scire, D.G. Strimaitis, R.J. Yamartino Earth Tech, Inc. 196 Baker Avenue, Concord, MA 01742.
10. AERMOD: description of model formulation. EPA-454/R-03-004, 2004.