

УДК 621.039

ПРИНЦИПЫ ВАРИАНТНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ В КОДЕ RELTRAN ДЛЯ ЗАДАЧ ПРОГНОЗНОЙ ОЦЕНКИ ДОЗ ОБЛУЧЕНИЯ НАСЕЛЕНИЯ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ПЛАНИРУЕМЫХ РАБОТ ПО ВЫВОДУ ИЗ ЭКСПЛУАТАЦИИ ОИАЭ

© 2023 г. А. А. Киселев*

*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Институт проблем
безопасного развития атомной энергетики Российской академии наук, Москва, Россия***e-mail: aak@ibrae.ac.ru*

Поступила в редакцию 07.02.2023 г.

После доработки 18.04.2023 г.

Принята к публикации 21.04.2023 г.

В статье рассматриваются подходы, заложенные в разрабатываемый в рамках ФЦП ЯРБ-2 код RELTRAN, к моделированию радиационных последствий для населения, обусловленных возможными выбросами радиоактивных веществ в атмосферу при выполнении планируемых работ по выводу объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) из эксплуатации. Одной из задач кода RELTRAN является выполнение расчетов последствий радиоактивных выбросов для населения для задач обоснования радиационной безопасности. Рассмотрено несколько вариантов моделирования: по среднемноголетним параметрам, по среднемноголетним параметрам с учетом графика производственного процесса, по метеорологическому ряду и по метеорологическому ряду с учетом графика производственного процесса. Получено, что в зависимости от длительности планируемых работ и сезона начала работ результаты существенно отличаются. Для работ средней продолжительности важным фактором становится их сезонность. В то же время для работ с условно постоянными выбросами длительностью более 6 месяцев учет календарного времени начала работ вносит пренебрежимо малую неопределенность в результаты.

Ключевые слова: вывод из эксплуатации, атмосферный перенос, население, дозы, планирование работ, сезонность, суточный ход метеоусловий

DOI: 10.31857/S0002331023040064, EDN: YLGJVL

ВВЕДЕНИЕ

Задача обоснования безопасности объектов использования атомной энергии (ОИАЭ) в части возможного радиационного воздействия на население актуальна на всех этапах жизненного цикла. Особое внимание, как правило, уделяется разовым выбросам [1–3] и штатным выбросам [4–6]. Однако, при планировании работ по выводу из эксплуатации (ВЭ), возникает промежуточный класс задач – длительные (от месяца до нескольких лет), периодические (в рабочие часы смены/рабочего дня), стадийные (диспергирование в зависимости от типа работ на текущей стадии) выбросы, связанные с работами по дезактивации и демонтажу зданий и сооружений, сопровождающимися выходом радиоактивных веществ в атмосферу. На сегодняшний день нормативно регулируемые методы решения данной задачи отсутствуют (при этом необходимость таких оценок обозначена для задач вывода из эксплуатации в НП-016-05 [7] и

НП-057-17 [8]), однако могут быть применены адаптированные подходы, основанные на модификации методов анализа аварийных выбросов с учетом длительности источника выброса, а также методы расчета воздействия штатных выбросов с учетом соответствующих особенностей вывода из эксплуатации. Во всех случаях важными параметрами являются суточный и сезонный ход метеорологических условий и географическое расположение площадки, включая подстилающую поверхность, влияющую на пограничный слой атмосферы и на параметры осаждения примеси как результат турбулентного взаимодействия примеси и подстилающей поверхности.

Код RELTRAN [9–11], разрабатываемый в ИБРАЭ РАН для решения задач по оценке источника выброса в атмосферу и прогнозирования радиационной обстановки вокруг объектов ядерного наследия (ОЯН) и пунктов захоронения радиоактивных отходов (ПЗРО) за счет атмосферного переноса, позволяет решать такого рода задачи и реализует два метода их решения:

1) построение среднегодовых концентраций и осредненной скорости выпадений за счет сухого и влажного осаждения, с учетом или без учета графика производственного процесса (развитие методов, рекомендуемых в РБ-106-15 [4]);

2) перебор метеорологических условий с сохранением динамики выброса для разных метеорологических условий (развитие методов, предложенных в работах [3, 12]).

С учетом новых возможностей для моделирования ранее не учитываемых при разработке проектных решений явлений важным становится сопоставление результатов, полученных с применением комбинаций методов, и анализ влияния плана работ на прогнозируемые дозы облучения населения. Для этого в рамках настоящей статьи на примере гипотетической работы по выводу из эксплуатации было проведено расчетное исследование влияния двух методов, заложенных в код RELTRAN, на результаты оценки доз населения для двух вариантов расчетов: использование среднегодовых значений параметров радиационной обстановки, использование временного ряда метеорологических параметров. В основе модельных оценок используются полученные с использованием региональной модели численного прогноза погоды WRF-ARW метеорологические поля [13]. Данная модель является опционным метеопроцессором кода RELTRAN для работы с прогнозными и ретроспективными метеорологическими данными.

ПРОГРАММНЫЕ СРЕДСТВА И СЦЕНАРИИ ПРОВЕДЕНИЯ РАБОТ

Численные эксперименты в рамках настоящей работы выполнялись с использованием кода RELTRAN [9–11, 19]. Код предназначен для решения задач по оценке выбросов в атмосферу и оперативному прогнозированию радиационной обстановки в окрестностях ОЯН, в том числе таких объектов, как ПЗРО и АЭС с остановленными энергоблоками (предназначенными для вывода из эксплуатации), расположенными на территории Российской Федерации. RELTRAN включает в себя следующие модули:

– оценка параметров источника выброса: выброс через вентиляционные системы (модуль “Вентиляция”); выброс при демонтаже/разрушении зданий и сооружений (модуль “Демонтаж”); выброс в результате ветрового подъема (модуль “Пылеподъем”);

– модули для моделирования метеорологической обстановки: по данным натурных измерений с метеомачты; по данным анализа или прогноза из глобальных циркуляционных моделей;

– моделирование атмосферного переноса: расчет доз облучения населения от источника единичной мощности (“Базовый транспортный модуль”); обоснование радиационной безопасности населения в случае запроектных аварий (модуль “Статистика”); обоснование радиационной безопасности населения при нормальной эксплуатации (модуль “ПДВ”).

В основе кода RELTRAN лежит лагранжева стохастическая модель [15–18] атмосферного переноса, численно решающая уравнение адвекции–диффузии примеси в стратифицированной атмосфере. Она позволяет моделировать распространение, осаждение примеси на поверхности с разной морфологией, осаждение примеси в условиях осадков различного типа, а также прогнозировать дозы облучения населения (после получения полей приземных концентраций радиоактивных веществ). В настоящей работе рассматривались дозы внешнего облучения от проходящего облака и от загрязненной поверхности, ингаляционные дозы и дозы за счет потребления загрязненных продуктов питания местного производства в консервативном приближении.

В качестве примера рассматривается задача планирования работ по ВЭ ОИАЭ. Предполагаемая длительность работ – 1, 3, 6 и 12 мес. (модельный пример для целей настоящего анализа, на практике могут рассматриваться различные длительности, включая многолетние работы). Для оценки влияния временных характеристик источника моделирование атмосферного переноса и доз облучения населения выполняется для двух вариантов источника выброса (и метеорологических условий соответственно):

- непрерывный равномерный выброс;
- циклический равномерный выброс.

Непрерывный равномерный выброс

Предполагалось, что радиоактивные вещества поступают в атмосферу постоянно без изменения интенсивности и радионуклидного состава в течение всего времени проведения работ (работы ведутся круглосуточно). При рассмотрении работ различной продолжительности предполагалось, что общая интегральная активность, выбрасываемая в атмосферу, сохраняется.

Циклический равномерный выброс

Данный тип источника предполагает, что работы по ВЭ проводятся только в рабочие часы с 8 утра до 16 вечера по местному времени, в вечерние часы и ночное время работы не проводятся, и выброс отсутствует. Таким образом, суточный выброс реализуется за 8 ч. При этом предполагается, что выброс является равномерным по мощности и постоянным по радионуклидному составу.

Среднегодовые концентрации и осредненная скорость выпадений за счет сухого и влажного осаждения строятся путем проведения вариантных расчетов атмосферного переноса выброса заданной динамики для каждых суток в течение заданного периода, после чего проводится осреднение полей концентраций и полей выпадений. Полученные величины пересчитываются далее с учетом радиоактивного распада в поля ожидаемых доз облучения населения.

Вторая серия расчетов – перебор метеорологических условий с сохранением динамики выброса путем смещения времени начала выброса по метеорологическому ряду по заданному многолетнему периоду. Расчеты выполняются со смещением времени начала работ в 1 нед. Таким образом учитываются все сезоны проведения работ, все наблюдавшиеся в регионе метеорологические условия, включая неблагоприятные для разных точек пространства. Полученные результаты позволяют оценить разброс значений и построить огибающие.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В качестве объекта исследования выбрана площадка АО “СХК”, для которой рассматривался гипотетический сценарий проведения работ по ВЭ одного из производственных объектов, находящихся на площадке. Для оценки последствий был взят выброс Cs-137 ($3.7E + 06Bк$) и Co-60 ($7.3E + 06Bк$). Величина выброса была рассчитана с

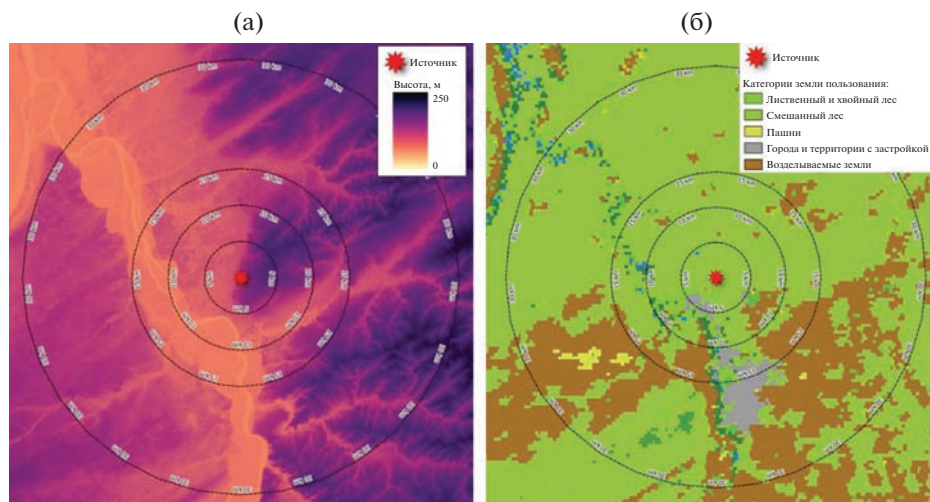


Рис. 1. Рельеф [21] (а) и карта категорий земель [20] (б) в рассматриваемой области.

учетом оцененного запаса активности, накопленного в производственном объекте, и полного коэффициента выхода аэрозолей, оцененного с учетом специфики работ по демонтажу оборудования, характеристик системы вентиляции и наличия системы фильтров [11]. Рассматривались сценарии выполнения работ длительностями 1, 3, 6 и 12 мес., проводящихся в рабочее время и круглосуточно, интегральная величина выброса при этом сохранялась, выброс считался постоянным в течение времени проведения работ.

Окружающая территория характеризуется [20, 21] наличием значительного количества лесов (65%), чередующихся с возделываемыми землями/землями с естественной растительностью (25%) в соответствии с классификацией MODIS [20]. На рис. 1 представлены картограммы распределения орографии и типов подстилающей поверхности в районе расположения объекта, они влияют на формирование атмосферных течений в региональном масштабе.

Для данной площадки были подготовлены два типа метеорологических данных: метеорологические поля и результаты метеорологического мониторинга из открытых источников. Все данные сформированы за 3 полных календарных года с 1 января 2019 г. по 31 декабря 2021 г. включительно. На рис. 2 представлена карта распределения станций метеорологического (синоптического) мониторинга в рассматриваемом регионе, а также сравнение расчетных роз ветров и полученных на основе анализа измерений роз ветров на трех станциях. Видно, что повторяемость метеорологических условий в различных точках рассматриваемой области отличается статистически значимым образом, в то же время метеорологические поля, построенные с использованием модели, отражают данные измерений. Рассмотрим качество моделирования метеорологических данных более подробно, поскольку от него непосредственно зависит конечный результат. В качестве ориентира будем рассматривать розы ветров и желательные показатели качества, предложенные в работе [22]. В табл. 1 приведены результаты статистического анализа метеорологических полей, осредненных по недельным промежуткам времени. Полученные показатели находятся в пределах установленных в работе диапазонов желательных величин, что позволяет говорить об удовлетворительном качестве полей. Следует отметить, что данные критерии являются ориентировочными

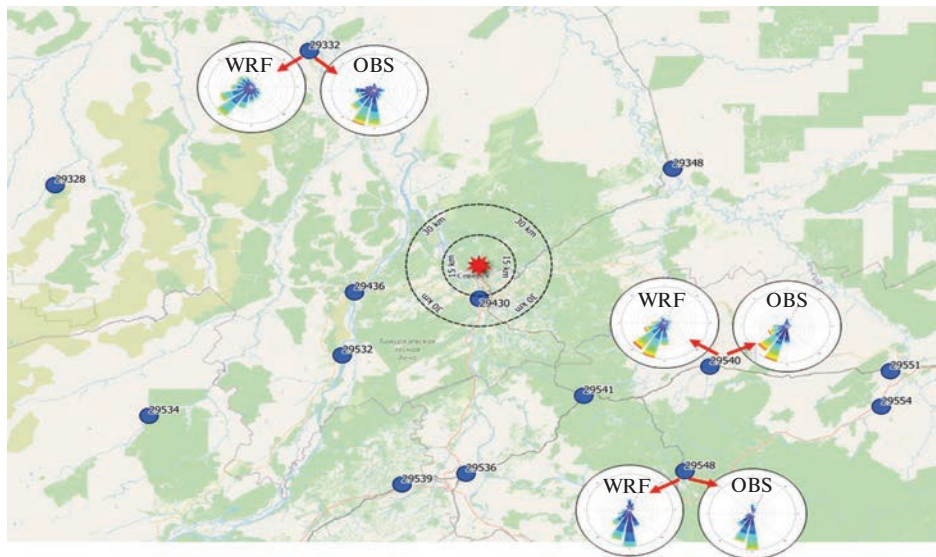


Рис. 2. Станции метеорологического мониторинга в регионе, расчетные и измеренные розы ветров для трех станций, показания которых передаются в международный обмен.

значениями, полученными в специфических условиях, и отражают наилучшие возможности моделирования.

На основе полученных временных рядов метеорологических условий (по модели WRF) рассмотрим выбросы с учетом суточного хода метеорологических условий, проводя расчеты атмосферного переноса только в дневные часы или в течение целого дня (последнее может быть рассмотрено либо как проведение работ по демонтажу в несколько смен круглосуточно или приближение, которое обычно используется для расчетов радиационного воздействия ОИАЭ при штатной работе). На рис. 3 приведены соответствующие розы ветров для дневных условий и круглосуточные, полученные по данным модели. При сравнении видно отличие как по характерным скоростям ветра, так и по преобладающим направлениям ветра, в то же время общая структура качественно соотносится. На рис. 4 представлено пространственное распределение прогнозируемых доз облучения населения, построенное по результатам расчетов на основе расчетов среднегодовых значений параметров радиационной обстановки. Общая пятнистая структура распределения связана в основном с различиями в скоростях осаднения на разные типы подстилающей поверхности, принятые в коде RELTRAN.

Таблица 1. Статистические индексы качества воспроизведения метеорологической моделью наблюдений и желательные величины [22]

Параметр	Метрика	Значение, полученное в RELTRAN	Желательные показатели качества
Скорость ветра	RMSE	2.00	≤ 2 м/с
	IOA	0.71	≥ 0.6
Направление ветра	Грубая ошибка	26.15 градусов	≤ 30 градусов
	Bias	9.48 градусов	$\leq \pm 10$ градусов

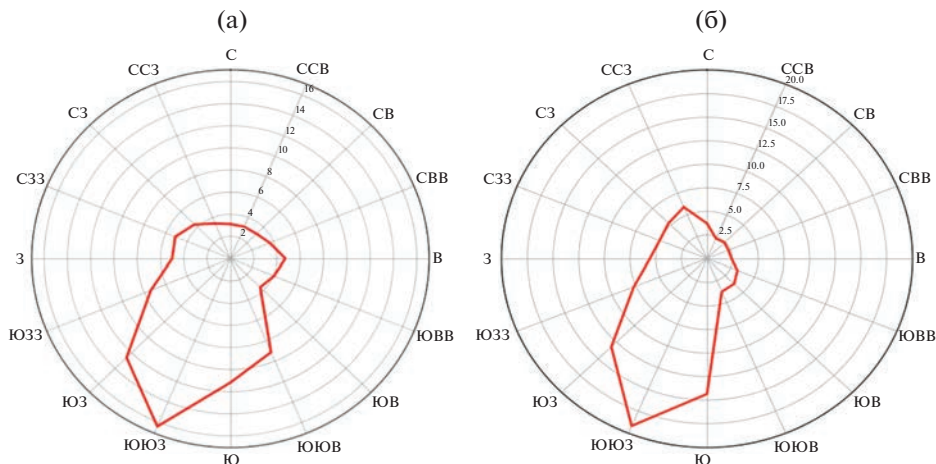


Рис. 3. Роза ветров в точке расположения гипотетического источника выброса, полученная интерполированием по результатам расчетов по региональной модели прогноза погоды для дневного времени (а) и круглосуточной (б).

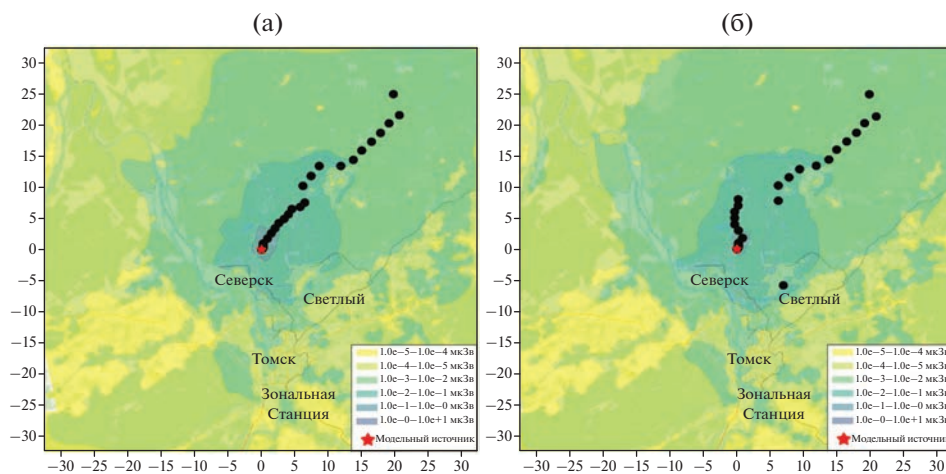


Рис. 4. Прогнозируемая доза облучения населения с использованием среднегодовых значений параметров радиационной обстановки от 12-месячного выброса для дневного времени проведения работ (а), для круглосуточных работ (б).

Отличия в результатах по дневным работам и круглосуточным в данном случае практически отсутствуют (данный результат специфичен для рассматриваемой площадки и может быть принципиально другим, особенно для объектов, расположенных на границе водораздела в регионах, подверженных бризовой циркуляции). Точками обозначены положения максимумов значений прогнозируемой дозы на различных расстояниях от источника.

Результаты расчетов максимальных значений доз облучения, полученные на основе перебора метеорологических условий, для источников длительностями 1 и 12 мес.

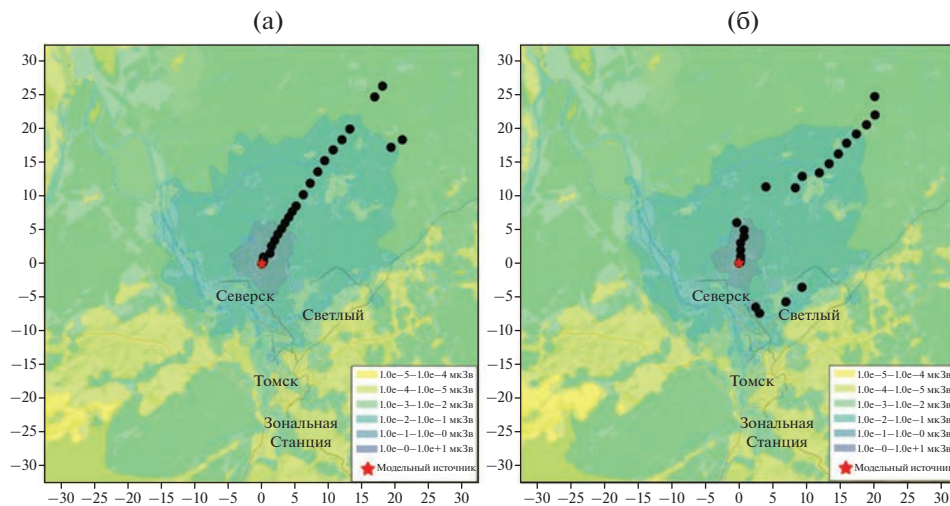


Рис. 5. Прогнозируемая максимальная по временам начала работ доза облучения населения с использованием временного ряда метеорологических параметров от 1-месячного выброса для дневного времени проведения работ (а), для круглосуточных работ (б).

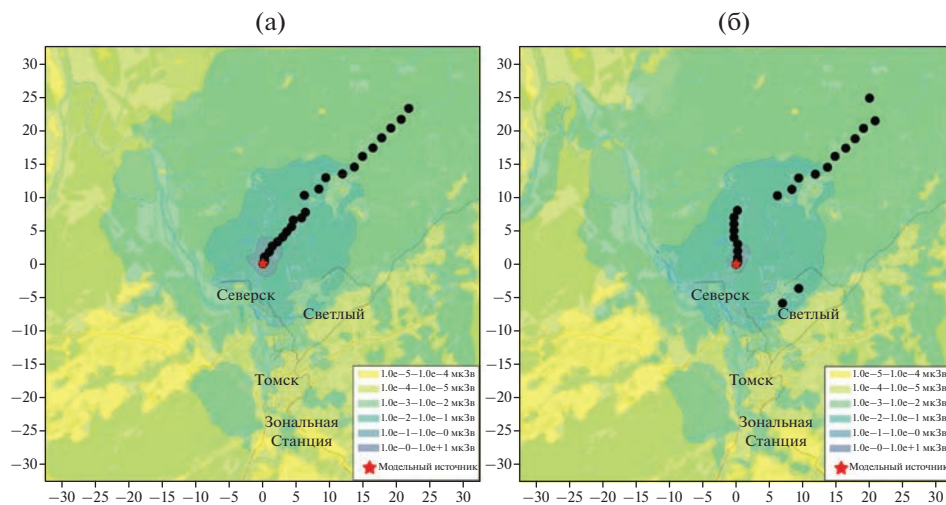


Рис. 6. Прогнозируемая максимальная по временам начала работ доза облучения населения с использованием временного ряда метеорологических параметров от 12-месячного выброса для дневного времени проведения работ (а), для круглосуточных работ (б).

приведены на рис. 5 и 6 соответственно. Можно видеть различные направления следа, большие значения прогнозируемых доз облучения населения для месячного выброса по сравнению с годовым, что связано с меньшей продолжительностью выброса при сохранении интегральной активности выброса. На рис. 4–6 видно, что в целом результаты соотносятся с розой ветров, однако имеют место влияние рельефа, неодно-

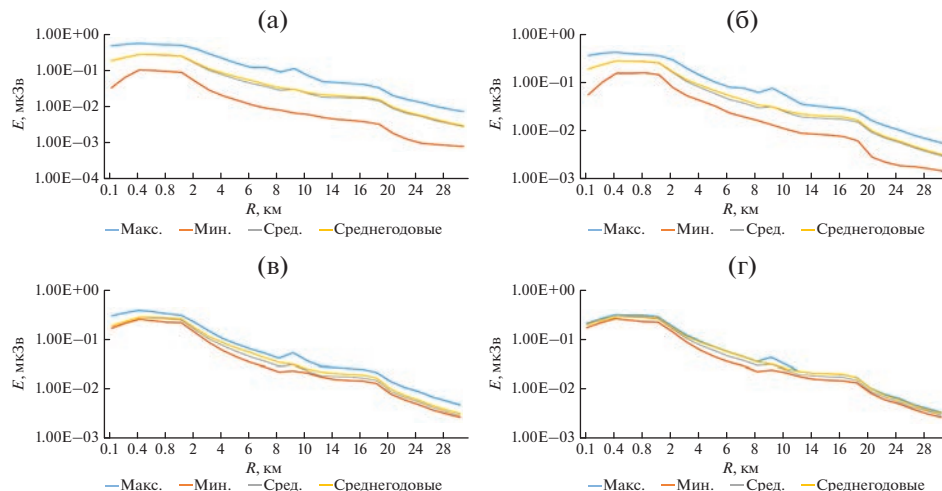


Рис. 7. Максимальные значения прогнозируемых доз облучения населения для работ длительностями 1 (а), 3 (б), 6 (в) и 12 (г) мес. (ось следа).

родной подстилающей поверхности и проявляются эффекты статистических различий в результатах, связанных с суточным ходом метеорологических условий при выполнении работ только в дневное время или круглосуточно.

ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты моделирования атмосферного переноса для задач оценки доз на население являются пространственно-неоднородными. Обычно анализ таких данных проводится в нескольких плоскостях: оценка максимально возможных значений в зависимости от расстояния от источника, оценка потенциально возможных доз для населенного пункта. С учетом этого рассмотрим влияние сезонного фактора на основе результатов, полученных для выброса в условиях дневного проведения работ с использованием региональных метеорологических полей. На рис. 7 представлены зависимости максимальных значений доз от расстояния от источника. Результаты, полученные по среднегодовым параметрам и как среднее по серии расчетов с варьируемым временем начала работ, совпадают в пределах точности модели. Разброс значений, полученный во второй серии расчетов, позволяет оценить неопределенность, связанную с метеорологическим фактором. Как видно из рис. 7, эта неопределенность уменьшается с увеличением длительности работ. Тем не менее следует отметить, что географическое положение максимумов различается для различных расчетов, что делает эту величину нестабильной и зависящей не только от направления, но и от совокупности других факторов, таких как влияние подстилающей поверхности, рельефа, локальных осадков и т.д.

Другим важнейшим критерием оценки является прогнозируемая доза облучения населения, проживающего в заданном населенном пункте (в данном случае населенный пункт рассматривается как площадной объект, имеющий свои границы). На рис. 8 представлено расчетное значение минимальных, максимальных, средних прогнозируемых значений доз облучения населения в населенном пункте, полученных с использованием временного ряда и с использованием среднегодовых значений параметров

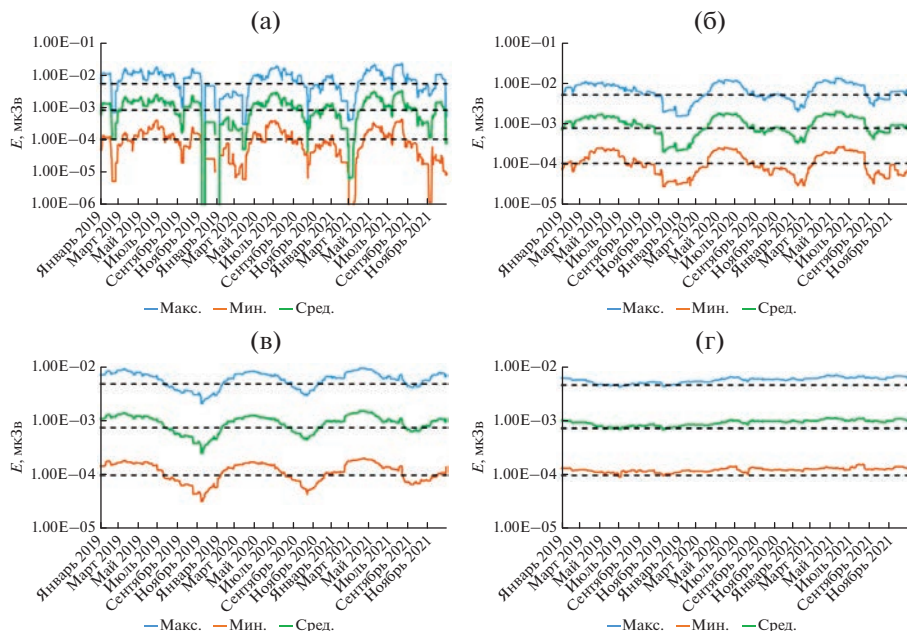


Рис. 8. Прогнозируемые дозы облучения населения в населенном пункте для работ длительностями 1 (а), 3 (б), 6 (в) и 12 (г) мес. в зависимости от времени начала работ и по среднегодовым значениям параметров радиационной обстановки.

радиационной обстановки. Можно отметить наличие сезонности в результатах по первому методу, причем повторяющихся с одинаковым масштабом по трем рассмотренным годам. Разброс расчетных доз в населенном пункте (площадной объект) увеличивается по сравнению с точками на оси следа и достигает двух порядков величины. Все это позволяет говорить о систематически повторяющихся метеорологических условиях, способствующих формированию более высоких или более низких доз облучения населения в зависимости от сезона, что дает основание для выбора оптимального времени начала работ по ВЭ, обеспечивающего минимальную расчетную дозу. Как видно из рис. 8, при увеличении продолжительности работ данный фактор становится все менее значимым, что в предельном случае позволяет использовать технологию с использованием среднегодовых концентраций.

Дополнительно в качестве примера рассмотрим пространственные характеристики прогнозируемой дозы по дуге, расположенной на расстоянии 15 км от источника. На рис. 9 представлено пространственное распределение прогнозируемых доз облучения населения для работ длительностями 1 (а), 3 (б), 6 (в) и 12 (г) мес. по дуге на расстоянии 15 км от источника. По мере увеличения длительности источника выброса разброс между минимальными и максимальными значениями уменьшается, что связано с общей схожестью дневных и ночных роз ветров по трехлетней статистике. Тем не менее распределение носит неоднородный характер с наличием пиков, обусловленных подстилающей поверхностью с повышенными характеристиками осаднения, а также доминирующими направлениями распространения. Таким образом, технология с перебором метеорологических условий позволяет получить разброс оценок доз облучения, связанный с неопределенностями метеорологического фактора. Разброс уменьшается по мере увеличения длительности источника выброса, что позволяет го-

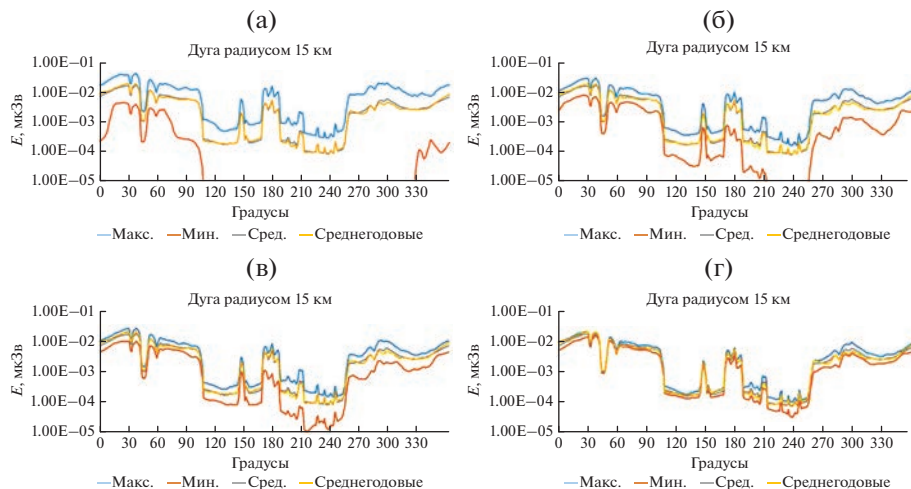


Рис. 9. Пространственное распределение прогнозируемых доз облучения населения для работ длительно-стями 1 (а), 3 (б), 6 (в) и 12 (г) мес. по дуге на расстоянии 15 км от источника.

ворить о соответствии технологий в предельном переходе (результаты с учетом неопределенностей для годовых работ равны соответствующим, полученным по осредненным данным, в пределах погрешности).

ВЫВОДЫ

Полученные в настоящей работе результаты показывают важность планирования работ по выводу из эксплуатации на основе прогнозных оценок доз облучения населения. Методы, реализованные в коде RELTRAN, позволяют учесть такие факторы, как суточный и сезонный ход метеорологических условий, что в свою очередь позволяет учесть это в плане проведения работ с целью минимизации радиационного воздействия на население. Для проведения анализа доступны два метода: расчет по средним прогнозируемым параметрам и расчет по истории метеонаблюдений с оценкой разброса. Оба метода дают сопоставимые результаты, однако последний позволяет учесть сезонность, что дает возможность оптимизировать дозовые нагрузки на население.

Приведенные оценки доз для гипотетического выброса показывают важность учета продолжительности и динамики технологического процесса при планировании работ по ВЭ. Результаты показывают, что даже для относительно простой с точки зрения моделирования территории выделяются эффекты, связанные с суточным и сезонным ходом метеорологических условий.

Анализ расчетных доз облучения в точках на оси следа и на окружности вокруг источника, а также в населенном пункте (как в пространственно-распределенном объекте) позволяет говорить о системности результатов, периодичности оценок и возможности оптимизации стратегии ВЭ с целью минимизации дозовых нагрузок на население. Отмечено, что выбросы продолжительностью 1 год показывают незначительные сезонные изменения результатов, в то же время уменьшение продолжительности выброса увеличивает разброс значений между сезонами вплоть до порядка величины, что может быть учтено при планировании работ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. RODOS-based Simulation of Potential Accident Scenarios for Emergency Response Management in the Vicinity of Nuclear Power Plants, 12.09.2016 [Электронный ресурс]. — URL: <https://doris.bfs.de/jspui/bitstream/urn:nbn:de:0221-2016091214084/3/BfS-SCHR-60-16.pdf> (дата обращения 26.09.2021).
2. Rossi J., Ilvoinen M. Dose estimates at long distances from severe accidents VTT-R-00589-16 VTT, 2016. 41 p.
3. Morozov V.B., Kiselev A.E., Kiselev A.A., Dolganov K.S., Tomashchik D.Yu., Krasnoperov S.N. (2020) Issues of Safety Assessment of New Russian NPP Projects in View of Current Requirements for the Probability of a Large Release, Nuclear Technology. <https://doi.org/10.1080/00295450.2020.1767998>
4. Руководство по безопасности при использовании атомной энергии. Рекомендуются методы расчета параметров, необходимых для разработки и установления нормативов предельно допустимых выбросов радиоактивных веществ в атмосферный воздух. РБ-106-15: утверждено приказом Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 11.11.2015 № 458.
5. LONG-TERM ATMOSPHERIC DISPERSION ESTIMATES FOR ROUTINE RELEASES [Электронный ресурс] — Режим доступа: <https://www.nrc.gov/docs/ML0707/ML070730713.pdf> — Свободный.
6. Simmonds J.R., Lawson G., Mayall A. (1995). Methodology for assessing the radiological consequences of routine releases of radionuclides to the environment. European commission. European Commission, RP 72, EUR 15760 EN, Luxembourg.
7. Общие положения обеспечения безопасности объектов ядерного топливного цикла (ОПБ ОЯТЦ) (НП-016-05), утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 2 декабря 2005 г. № 11.
8. Правила обеспечения безопасности при выводе из эксплуатации ядерных установок ядерного топливного цикла (НП-057-17), утверждены постановлением Федеральной службы по экологическому, технологическому и атомному надзору от 14 июня 2017 г. № 205.
9. Бакин Р.И. и др. Концепция разработки расчетно-прогностического комплекса RELTRAN для анализа безопасности при выбросах радиоактивных веществ в атмосферу // Вопросы радиационной безопасности. 2018. № 3. С. 27–38.
10. Kiselev A.A., Krasnoperov S.N., Bakin R.I., Pripachkin D.A. The concept and current status of the RELTRAN code development for safety justification of nuclear-legacy facilities and radioactive waste disposal sites for accident scenarios related to atmospheric emissions of radionuclides Proceedings of the International Conference on Radioecology and Environmental Radioactivity; Berlin (Germany); 3–8 September 2017. P. 62–63.
11. 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 объектов ядерного наследия. Разработка концепции. Препринт / Ин-т проблем безопас. развития атом. энергетики РАН, № ИБРАЕ-2017-06. М: ИБРАЭ РАН, 2017. 18 с.
12. Napier B.A., Droppo Jr.J.G., Rishel J.P. 2011. Air Dispersion Modeling of Radioactive Releases During Proposed PFP Complex Demolition Activities. Report to CH2M HILL Plateau Remediation Company. PNNL-20173, Pacific Northwest Laboratory, Richland, Washington.
13. Skamarock W., Klemm J., Dudhia J. et al. Description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR Technical Note NCAR/TN-475+STR. 2008.
14. Список индексов метеорологических станций [Электронный ресурс]. URL: http://meteomaps.ru/meteostation_codes.html (дата обращения 23.11.2021)
15. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. Труды ИБРАЭ РАН под редакцией чл.-корр. Л.А. Большова. Вып. 9. М.: Наука, 2008. 229 с.
16. Верификация компьютерной системы “НОСТРАДАМУС” для прогнозирования радиационной обстановки на ранней стадии аварии на АЭС. Верификационный отчет. ИБРАЭ РАН, инв. № 3431. М. 2001.
17. Отчет о верификации и обосновании программного средства “Программа для расчета радиационной обстановки в мезомасштабе. Версия 1.1 (ПОМ)”. Инв. № 4837-Н.4х.241.9Б.17.1018-3-Р/2. М. 2017.
18. Dzama D., Semenov V., Sorokovikova O. The code rom for assessment of radiation situation on a regional scale during atmosphere radioactivity releases. Fast Reactors and Related Fuel Cycles: Next Generation Nuclear Systems for Sustainable Development (FR17). Proceedings of an International Conference Held in Yekaterinburg, Russian Federation, 26–29 June 2017, Companion CD. Ссылка в веб: <https://www.iaea.org/publications/13414/fast-reactors-and-related-fuel-cycles-next-generation-nuclear-systems-for-sustainable-development-fr17>
19. Красноперов С.Н., Припачкин Д.А., Киселев А.А., Бакин Р.И. Разработка расчетно-прогностического комплекса “RELTRAN” для обоснования безопасности объектов наследия, пунктов захоронения радиоактивных отходов” // Тезисы докладов. Международная кон-

- ференция “Безопасность исследовательских ядерных установок”. АО “ГНЦ НИИАР”, Димитровград, 22–27 мая 2017 г., с. 99.
20. MODIS MODERATE RESOLUTION IMAGING SPECTRORADIOMETER [Электронный ресурс]. URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/> (дата обращения 15.11.2021)
 21. Shuttle Radar Topography Mission Data [Электронный ресурс], Naval Academy – Режим доступа: https://www.usna.edu/Users/oceano/pguth/md_help/html/srtm.htm – свободный. Загл. с экрана. Яз. англ.
 22. Emery C., Tai E., Yarwood G. Final Report. Enhanced meteorological model and performance evaluation for two Texas ozone episodes. Work Assignment No. 31984-11 TNRCC Umbrella Contract No. 582-0-31984 Prepared for The Texas Natural Resource Conservation Commission 12118 Park 35 Circle Austin, Texas 78753; ENVIRON International Corporation 101 Rowland Way, Suite 220 Novato, CA August 31, 2001. P. 153.
 23. Проектная документация ОВОС для общественных обсуждений | АО “СХК” (atomsib.ru)
 24. Методика расчета рассеяния загрязняющих веществ в атмосфере при аварийных выбросах. РД 52.18.717-2009. Обнинск, ООО “ПРИНТ-СЕРВИС”, 2009.

Principles of Multivariate Analysis in the Reltran Program for the Problems of Estimating Public Exposure Doses during the Decommissioning of Nuclear Facilities

A. A. Kiselev*

Nuclear Safety Institute, Russian Academy of Sciences, Moscow, Russia

**e-mail: aak@ibrae.ac.ru*

The article represents the approaches introduced in the RELTRAN code developed under the FTP NRS-2 to modeling the radiation consequences for the population caused by possible releases of radioactive substances into the atmosphere during the planned work on the decommissioning of nuclear facilities. One of the tasks of the RELTRAN code is to perform calculations of the consequences of radioactive releases for the population for the tasks of justifying radiation safety. Several modeling options are considered: calculations based on average concentrations over several years, calculations based on average concentrations over several years, considering the schedule of the decommissioning process, case-study modeling approach based on historical meteorological series analysis and case-study modeling approach based on historical meteorological series analysis, considering the schedule of the decommissioning process. It was obtained that, depending on the duration of the planned process and depending on the season, the results differ significantly, for medium-term work, their seasonality becomes an important factor, at the same time, work with conditionally constant emissions lasting more than 6 months has a negligible uncertainty associated with time start of work.

Keywords: decommissioning, atmospheric dispersion and transport, dose to members of the public, decommissioning program, seasonality, daily course of weather conditions