Институт проблем безопасного развития атомной энергетики
Российской академии наук

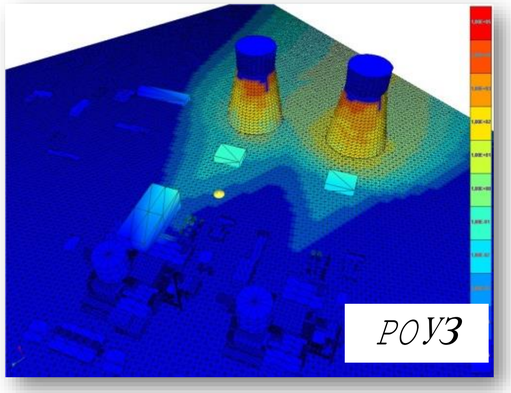
ИБРАЭ

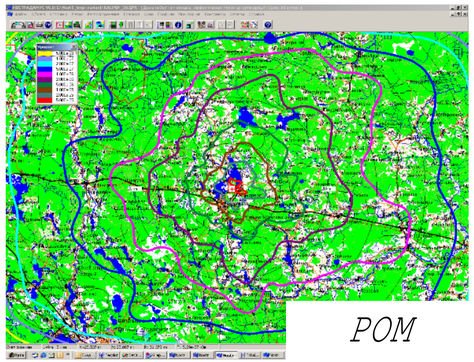
# Применение моделей атмосферного переноса в задачах аварийной готовности и реагирования — современное состояние и перспективы

Киселев Алексей Аркадьевич
aak@ibrae.ac.ru

**XX Международный ядерный форум**
**«Безопасность ядерных технологий: аварийная готовность и реагирование»**
**АНО ДПО «Техническая академия Росатома», г. Обнинск,**
**5 – 9 октября 2026 г**

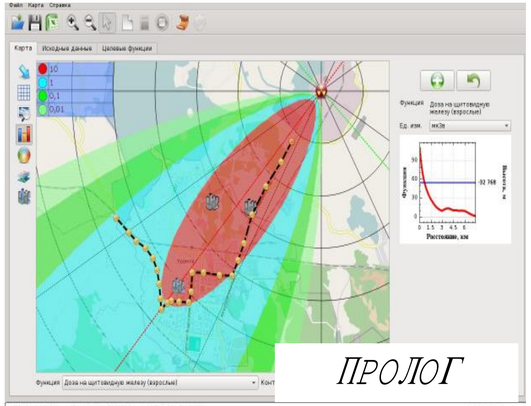
# Модели атмосферного переноса и оценки радиологического воздействия на население

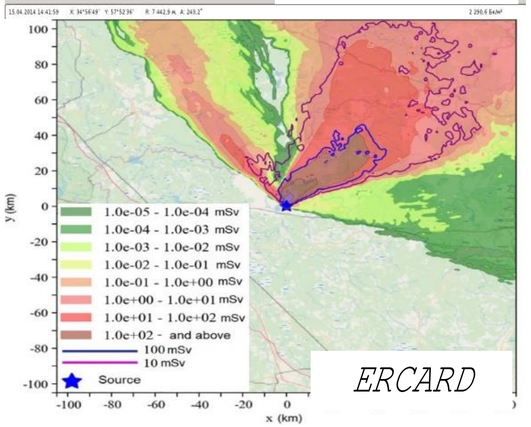









Применение моделей для задач обоснования безопасности (уроки на АЭС «Фукусима-1»):

1. Применение реалистичных моделей;
2. Анализ неопределенностей;
3. Этапность аварийной готовности и реагирования.

**Ключевые различия:**

- Пространственные и временные масштабы;
- Сложность и требования к исходным данным.

**Ключевые функции:**

- Интегрированный анализ неопределенностей;
- Нацелены на задачи анализа безопасности.

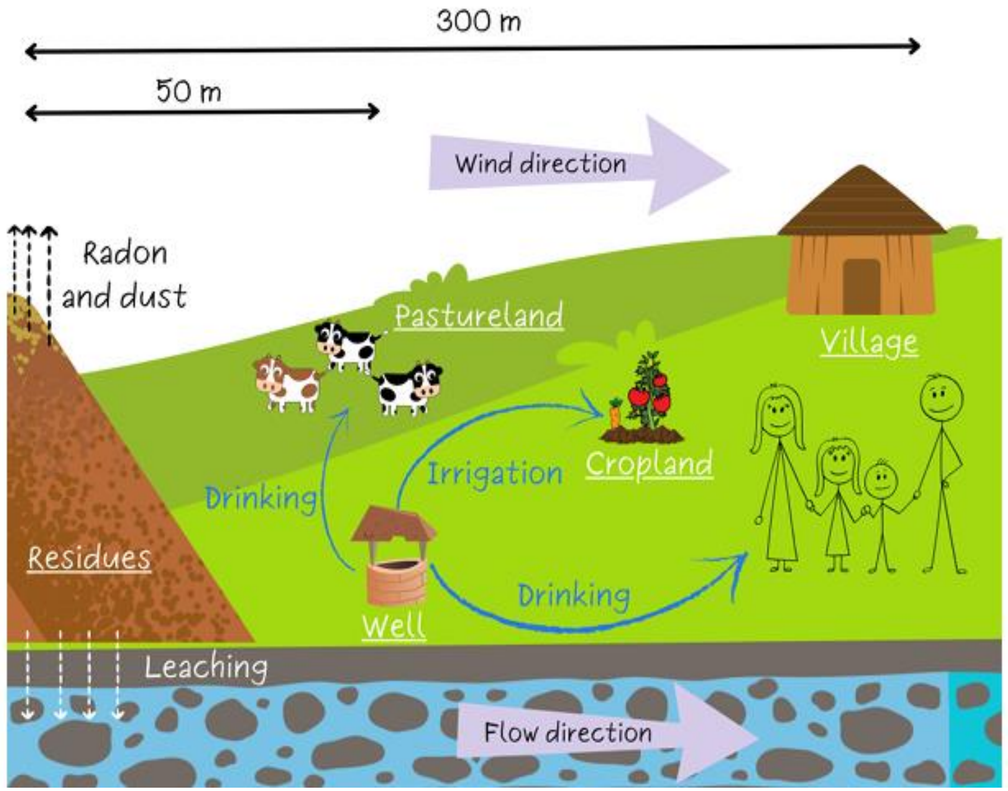
# Повышение реалистичности



**Упрощенная оценка доз *(масштаб последствий)*:**

*- Кратковременный залповый источник;*
*- Усредненные метеорологические условия;*
*- Усредненная поверхность в направлении распространения;*
*- Усредненное население и его поведение;*

*** МАГАТЭ MEREIA Training Workshop 7-11 April 2025**




**Уточненная оценка доз***

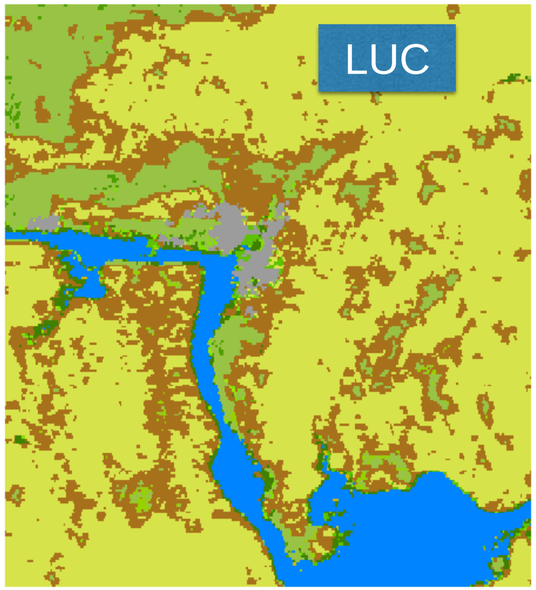
*+ Фактический источник;*
*+ Фактические метеорологические условия;*
*- Малые пространственные масштабы;*
*+ Фактическое население и его поведение;*

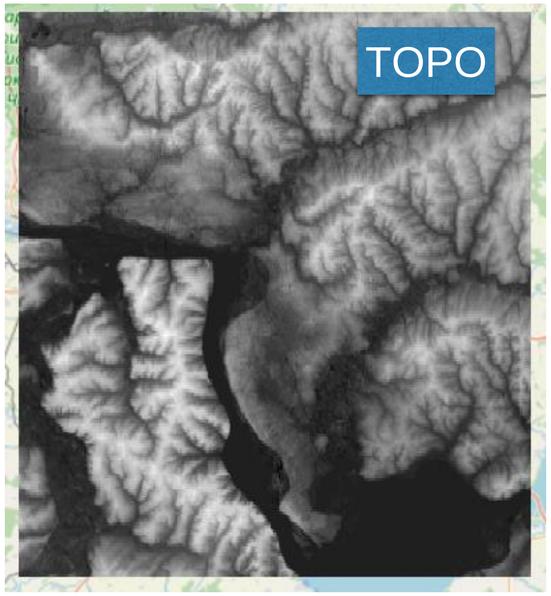
***Удалось реализовать за счет малых масштабов***
***!!Тенденция к повышению реалистичности!!***

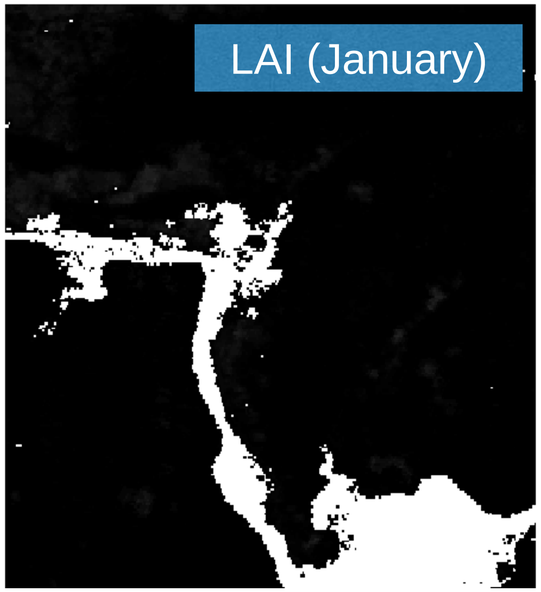
# Цифровая модель рельефа

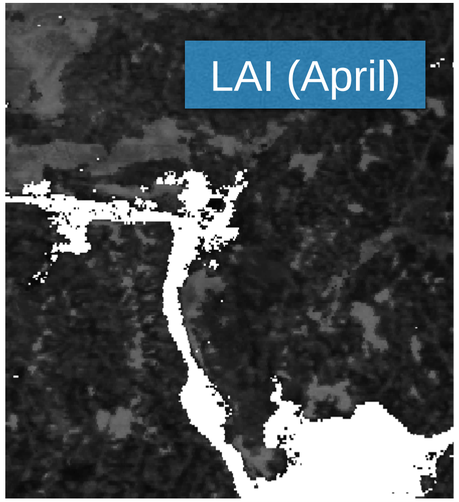
Проведен анализ источников;
Разработаны подпрограммы преобразования;
Созданы карты на весь мир (500 м):

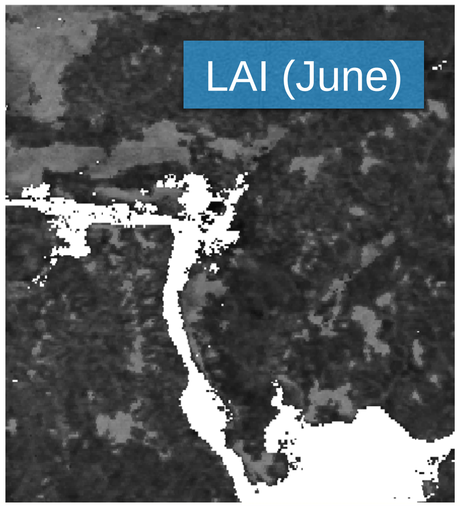
- LUC;
- LAI (12 месяцев + модель закрытия «дыр» в данных);
- TOPO (SRTM + ASTER GDEM для закрытия «дыр»);
- SOIL: типы почв для доз за счет перорального поступления;
- Батиметрические данные (водопользование).

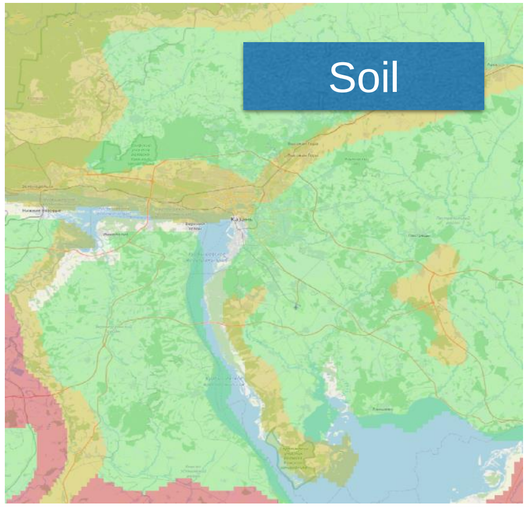


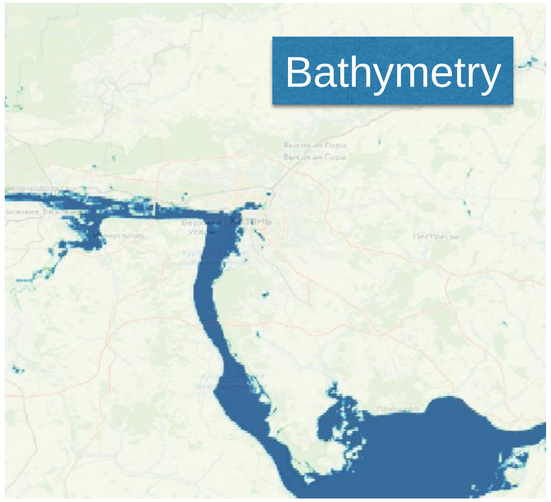



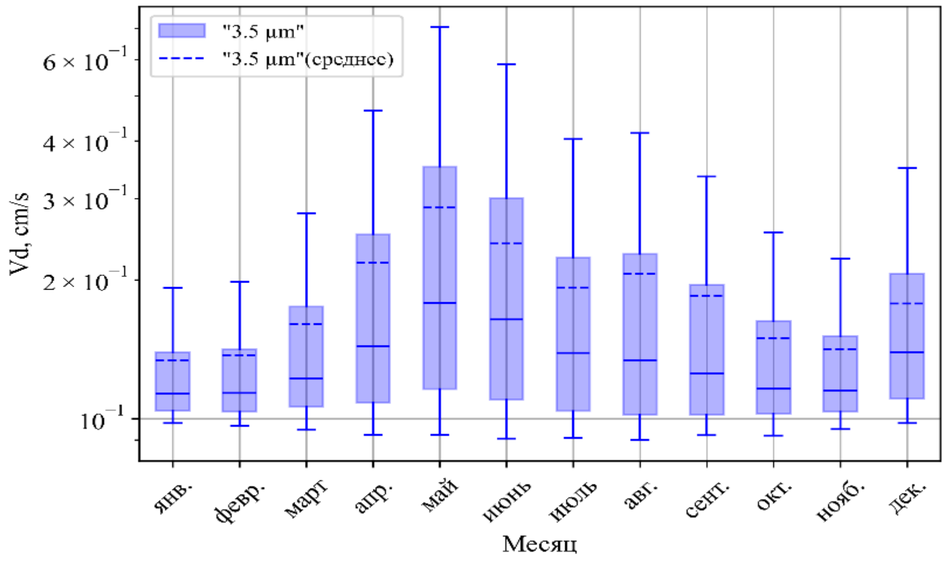
# Перенос и осаждение

Уравнение переноса и диффузии для концентрации с источником (Q) и изменением источника (S):

$$\frac{\partial c}{\partial t}+\frac{\partial Uc}{\partial x}+\frac{\partial Vc}{\partial y}+\frac{\partial \widehat{W}\ c}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(K_x\frac{\partial c}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(K_y\frac{\partial c}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(K_z\frac{\partial c}{\partial z}\right)+Q+S$$

Новые граничные условия (ранее – константы):

| | Сухое осаждение | Вымывание осадками в приближении быстрого перемешивания |
|---|---|---|
| Модель | $\mathrm{V_d}=\int_0^\infty(\mathrm{V_{drift}(r)}+\frac{1}{\mathrm{R_a(r)}+\mathrm{R_s}(r)})n(r)dr$ | $\iint_0^\infty E(D,r)V(D)\frac{\pi D^2}{4}N(D)n(r)dDd$ |
| Параметры | $V_d$ – Скорость сухого осаждения; $\mathrm{V_{drift}}$ – скорость осаждения из-за форетических сил и скорости гравитационного осаждения; Ra, Rs – аэродинамическое осаждение и взаимодействие с подстилающей поверхностью. | $\Lambda$ - постоянная вымывания, 1/с; *N(D)* – функция распределения гидрометеоров по размерам, 1/м$^4$ ; *E(D)* – эффективность захвата частиц; *V(D)* – скорость гидрометеоров, м/с; *D* – диаметр гидрометеора, м. |
| | n*(r)* – функция распределения активности по диаметрам частиц, 1/м; r – диаметр аэрозольной частицы, м. | |




*Изменение скорости осаждения аэрозоли из облака выброса в зависимости от метеорологических условий и уровня развития фитомассы для возделываемых земель*

# Дозы

- Эквивалентные дозы на 24 органа и эффективная доза по 60 публикации МКРЗ и 103 публикации МКРЗ (национальные и международные критерии);
- Поглощенные дозы за 2 суток и 10 суток (НРБ-99/2009);
- ОБЭ-взвешенные поглощенные дозы за 30 суток (МАГАТЭ GSR-3, ERP-NPP 2013)

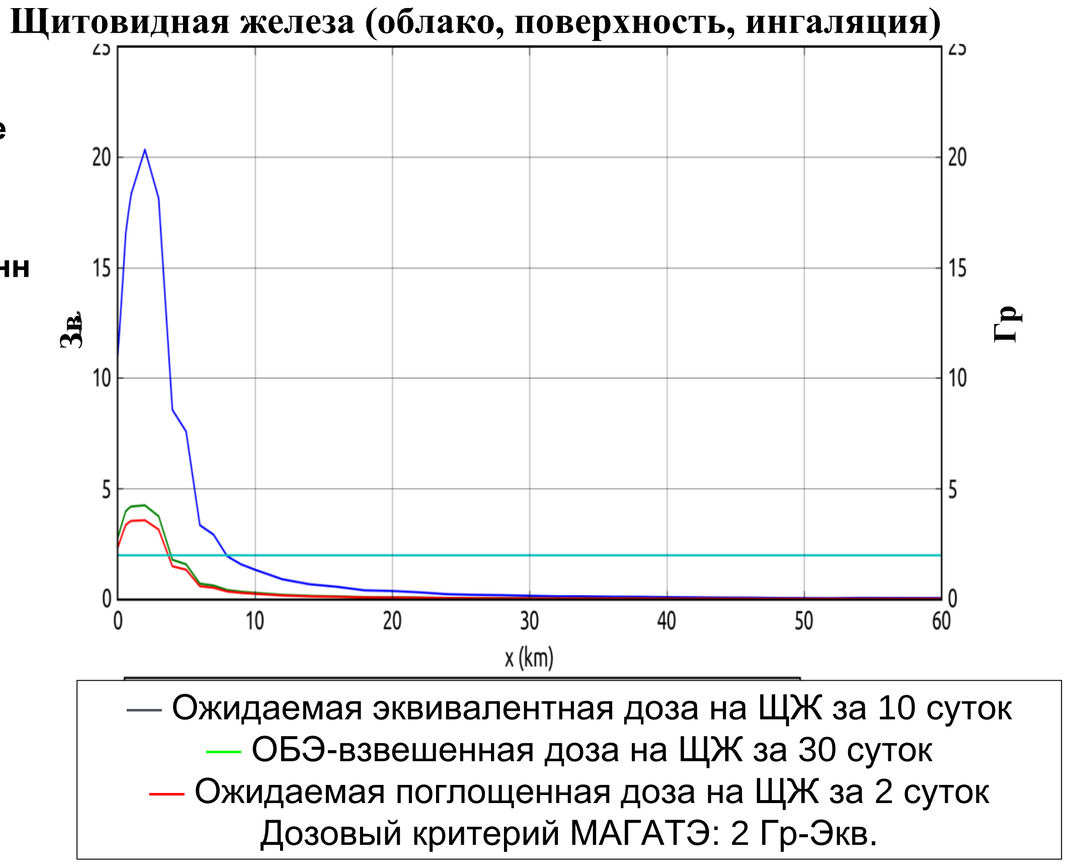
**Стохастические эффекты**

**Детерминированные эффекты**

Добавлены:

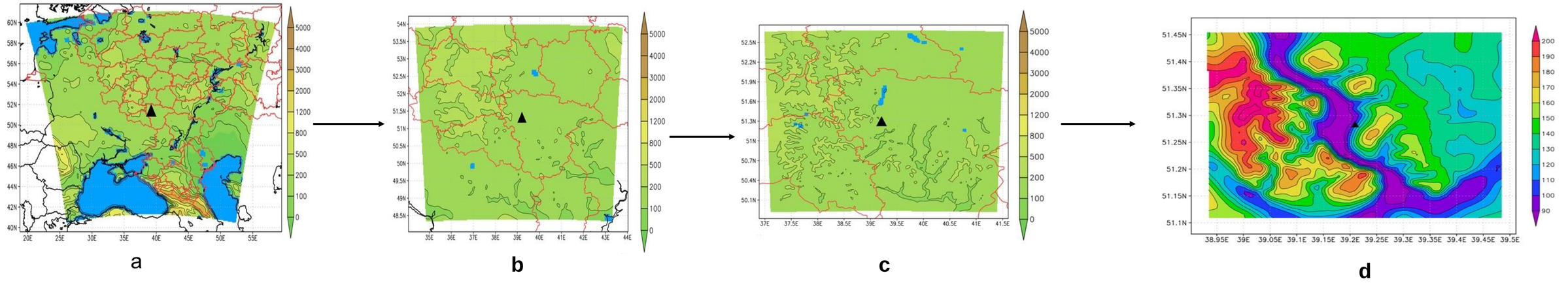
- модели и ДК для учета дозы от ресуспензии;
- дозы на кожу от контакта и оседания;
- непреднамеренное заглатывание;
- доза на плод;
- пересмотрена модель облучения от приподнятого облака.

Реализована возможность полноценного расчета дозиметрических характеристик в соответствии со всеми международными правилами.




*Расчетные значения доз облучения щитовидной железы без учета контрмер (95%)*

# Сопряжение с региональной численной моделью прогноза




*Домены для расчетов с разрешением 18 км (а), 6 км (б), 2 км (в) и 667 м (г)*

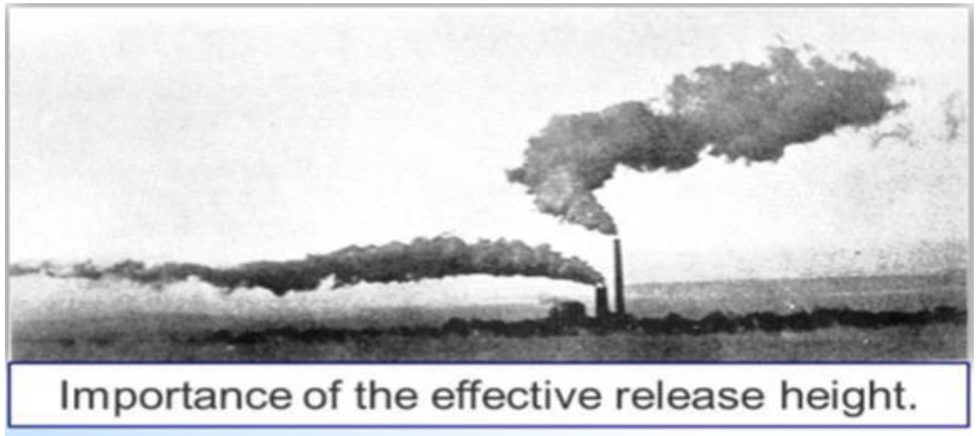
Исходные данные (базовые):

- Компоненты скорости ветра (3D);
- Давление (3D);
- Температура (3D/2D для ограниченного);
- Относительная влажность (3D);
- Плотность воздуха (3D);
- Влагосодержание;
- Водоносность облаков;
- Содержание дождевых капель;
- Содержание снега;
- Обратная шкала Монина-Обухова;
- Динамическая скорость трения;
- Высота ПСА;
- Количество осадков (для дополнительной интегрированной модели);
- Тип осадков (для дополнительной интегрированной модели).

# Неопределенности прогноза

| Категория * | Параметр * | Комментарии с учетом результатов анализа |
|---|---|---|
| Категория 1 | Величина выброса<br>направление ветра | С ростом заблаговременности прогноза наблюдается **рост дисперсии прогноза!**<br>Данные метеорологических измерений – в точке, данные прогноза – средние в ячейке сетки, имеют место значимые отличия! |
| Категория 2 | Высота выброса<br>скорость ветра<br>временные х-ки выброса | В ряде случаев – критически важные параметры, например, авария на АЭС «Фукусима-1». |
| Категория 3 | Осадки<br>параметры осаждения<br>распределение частиц по диаметрам | Принятые «эффективные» **параметры осаждения – нерелевантные**.<br>Анализ последствий на аварии АЭС «Фукусима-1» показал, **что нужно учитывать состав аэрозоли.** |
| Категория 4 | Устойчивость атмосферы<br>параметры ПСА<br>коэффициенты диффузии | Средний уровень влияния за исключением полностью некорректного выбора – вместо устойчивых выбраны неустойчивые условия. |
| Категория 5 | Разрешение сеточных данных, температура<br>распределение источника | Должны быть выбраны адекватно. И важны в специфичных условиях, например, моделирование взрывов |

*Существуют условия, когда параметры переходят между категориями*
**S.J. Leadbetter et al.: Radioprotection 2020, 55(HS1), S51–S55*




*Различные направления ветра на различных высотах выброса [Environmental characteristics of a release during a severe emergency at a nuclear power plant, IAEA]*

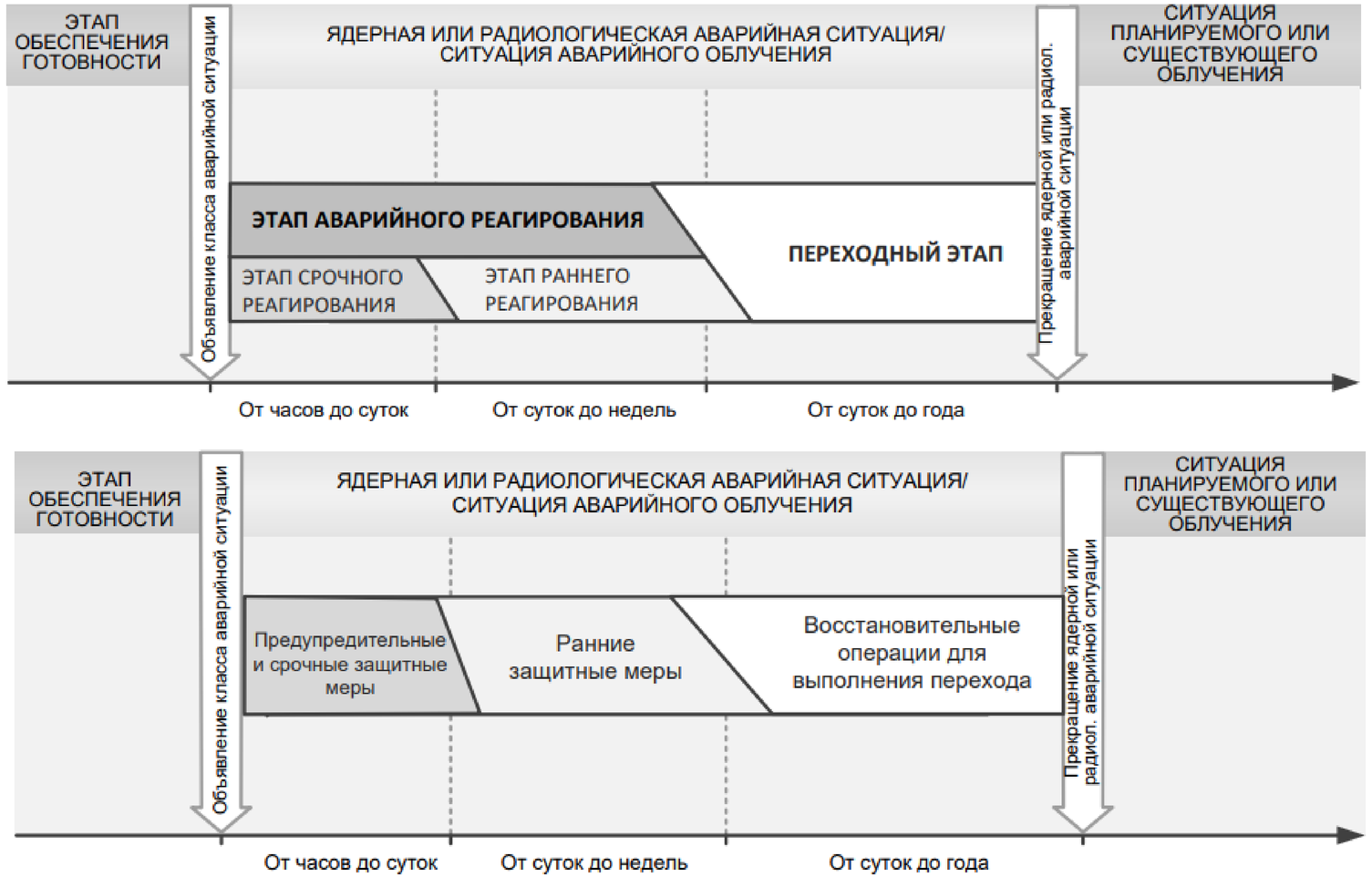
# Этапы и основные характеристики в части оценки и прогноза последствий

**Готовность**

- Цель: подготовка планов по защите населения;
- Основа – оценка опасностей;
- Неопределенности: метеоусловия (алеаторная), источник + перенос (эпистемическая).

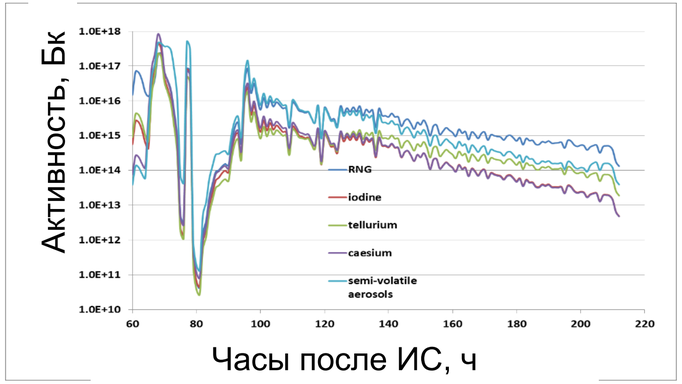
**Этапы аварийного реагирования**

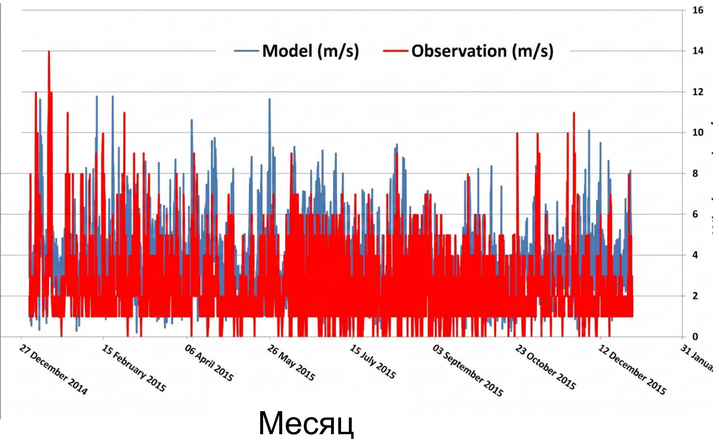
- Цель: уменьшить риск или ослабить последствия аварии;
- Основа – планы по защите населения, прогноз (источник, метеорология, распространение, дозы);
- Неопределенности: источник (алеаторная), метеоусловия + перенос (эпистемическая).

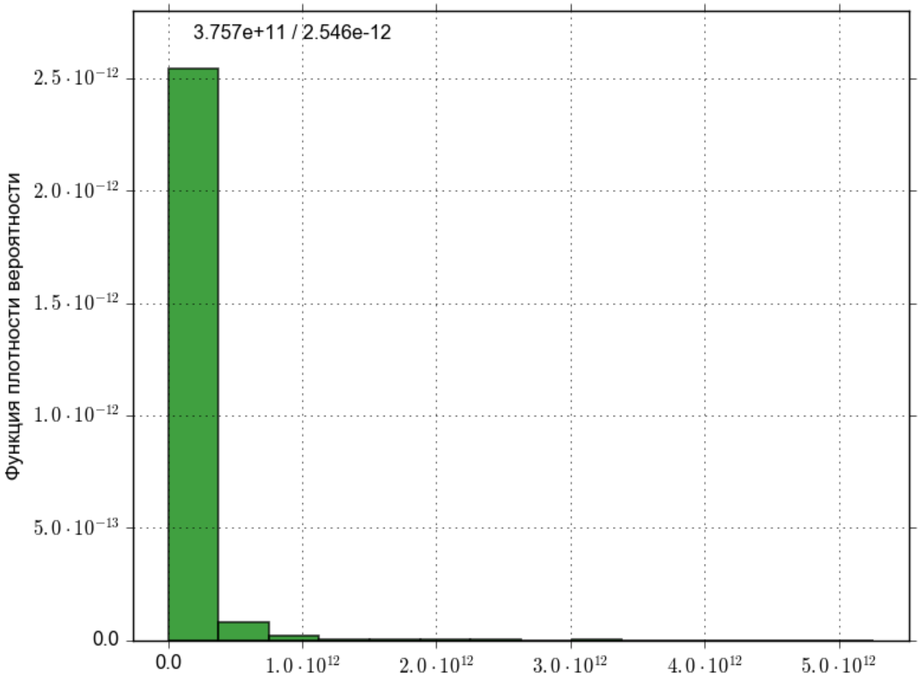



*Временная последовательность различных типов защитных мер и восстановительных операций в случае ядерной или радиологической аварийной ситуации в пределах одного географического района или одной площадки (**МАГАТЭ, GSG-11**)*

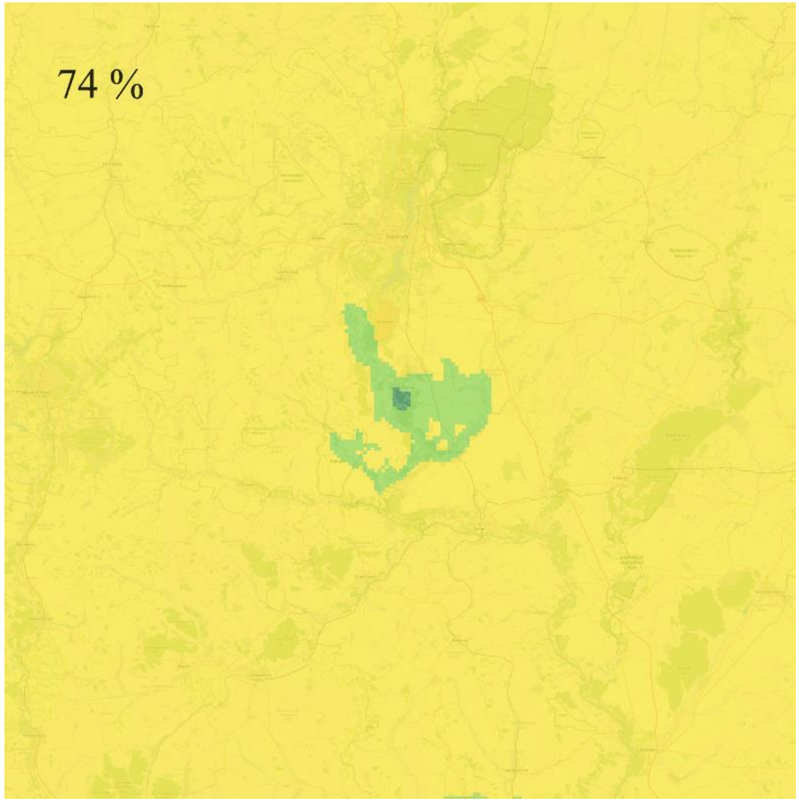
# Длительные выбросы и неопределенность, связанная с метеорологическим фактором



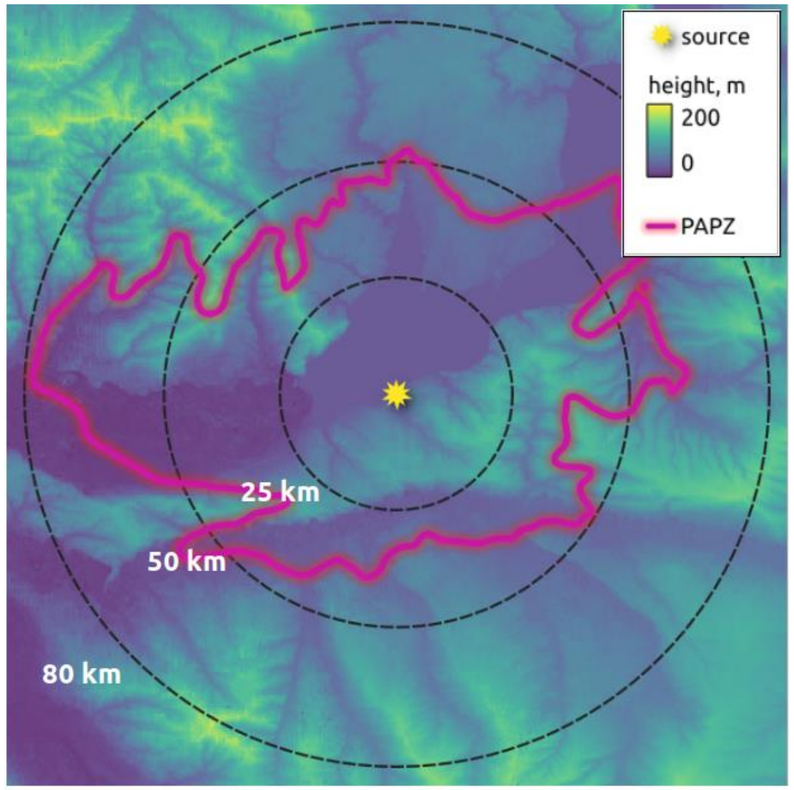

Проинтегрированная по времени концентрация Cs-137, Бк*с/кб.м




Картографирование возможных доз для населения, полученных с различными уровнями доверия

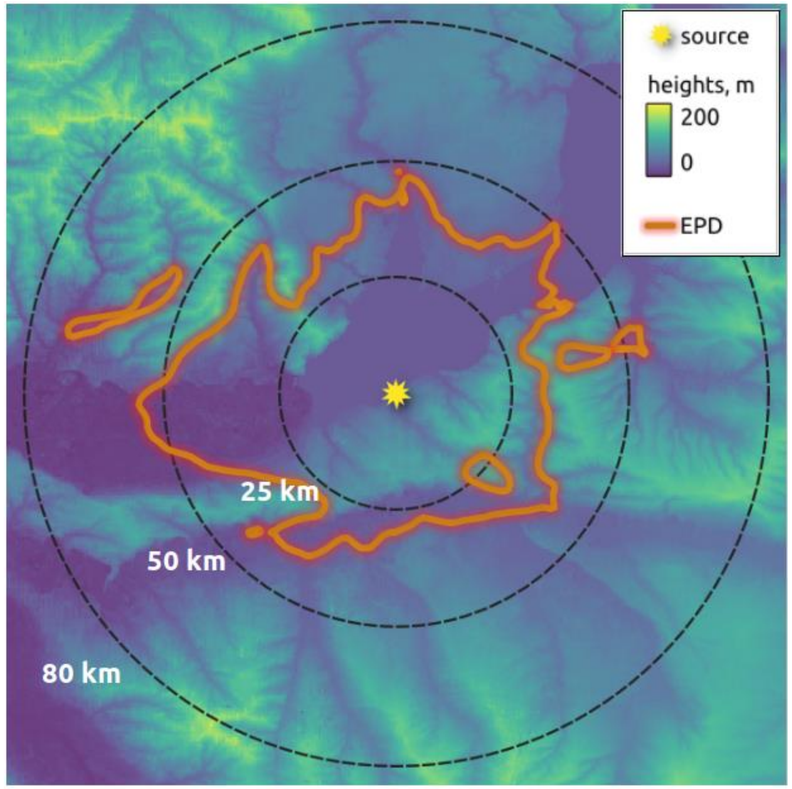
# Применение модели для расчета размеров зон планирования защитных мероприятий

**МТ 1.2.5.05.0110-2012**




*Рельеф и результаты расчета зон планирования защитных мероприятий (среднее)*

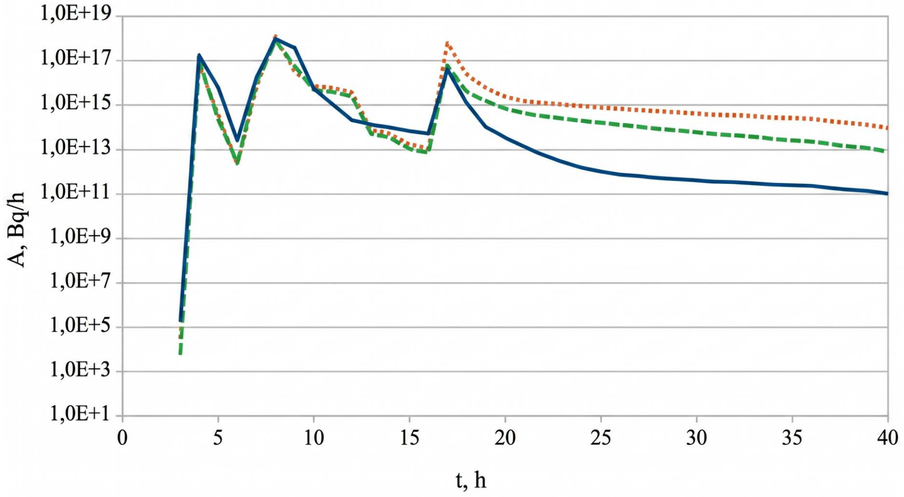
**Использовались дозовые критерии МАГАТЭ**

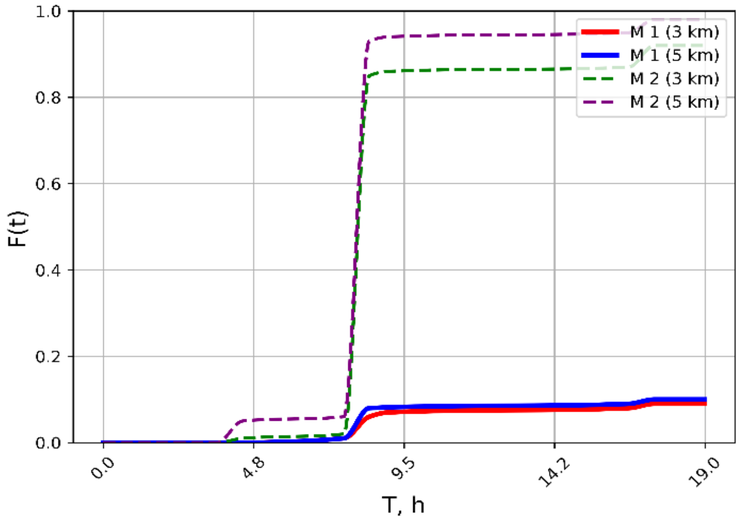



*Рельеф и результаты расчета зон планирования защитных мероприятий (среднее)*

| | |
|---|---|
| **ЗПЗМ (МТ)** | **75 км (все тело)**,<br>78 **км** (ЩЖ)<br>41 **км** (легкие)<br>70 **км** (кожа) |
| РРП (МАГАТЭ) | 47 **км** (эфф. доза)<br>72 **км** (плод) |

# Оценка временных характеристик и определение вероятностей



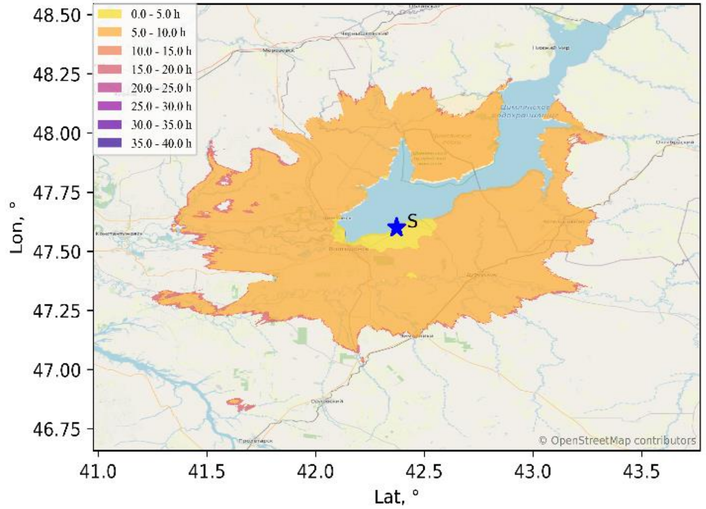




*Функция распределения времени достижения дозовых критериев при использовании методов М1 и М2 для ЗПЗМ с минимальными и максимальными контрмерами.*

| Метод №1 | Порядок расчета: пространство-время-доза (вероятность в точке) |
|---|---|
| Метод №2 | Порядок расчета: время–доза–пространство (вероятность в области) |

1. Можно получить доступ к информации о доступном времени и вероятности его наличия;
2. Вероятности превышения дозовых критериев в конкретной точке и за пределами выбранных радиусов различаются;
3. Если сопоставить эти результаты с планами действий в чрезвычайных ситуациях, это может стать эффективным инструментом для поддержки задач планирования на случай чрезвычайных ситуаций.

*Минимальное время для достижения критериев дозирования*



# Комплексный ансамблевый прогноз

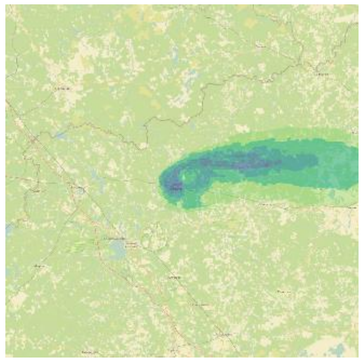
**Неопределенности**:

1. Неопределенность в прогнозах метеорологических полей;
2. Неопределенность в прогнозах атмосферного переноса;
3. Неопределенность в оценке источника выброса, включая действия оператора;
4. Неопределенность относительно времени начала инициирующего события;

**В результате** получается обобщенная картина последствий с возможностью исключения не реализовавшихся сценариев;

*Учет неопределенности источника выброса. Для каждого источника выброса учет неопределенности метеорологии, и др. параметров.*

Наиболее вероятный источник, наиболее вероятный прогноз

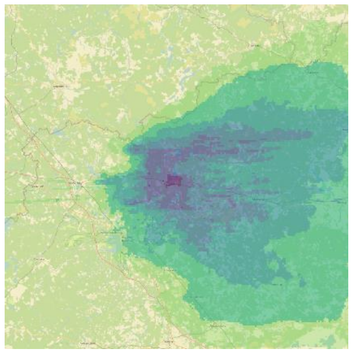


*«Классический» результат прогноза*

Новый подход

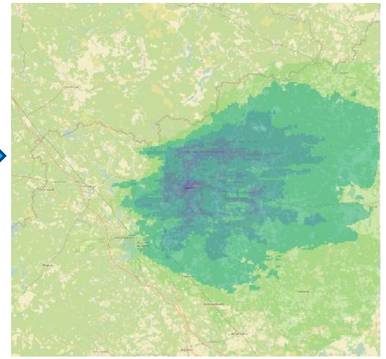



Объединение прогнозов в единую картину



Прогноз с учетом 100 сценариев развития аварии и других неопределенностей

Учет поступивших данных о состоянии РУ



*Прогноз с учетом 20 сценариев развития аварии и других неопределенностей*

# Тезисные выводы

**Применение моделей должно быть адресным: АГ, АР и учитывать цели и задачи**

**Тенденция к взаимосвязи целевых ориентиров обоснования безопасности и АГР**

**Учет неопределенностей – важная задача, но требует разумного подхода:**

- **Что может произойти и на сколько вероятно?**
- **Каковы будут последствия, если это произойдет?**
- **Что можно улучшить, чтобы минимизировать эти последствия?**

# Спасибо за внимание

**Киселев Алексей Аркадьевич**

Заведующий отделом, н.с, к.т.н.

E-mail: aak@ibrae.ac.ru
www.ibrae.ac.ru

**07.10.2026**