

# Системы поддержки принятия решений при аварийных выбросах на АЭС

*В.В.Беликов*

ИНСТИТУТ ПРОБЛЕМ БЕЗОПАСНОГО РАЗВИТИЯ АТОМНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ  
113191, Москва, ул. Б. Тульская, 52  
тел.: (495) 955-23-78, факс: (495) 958-11-51, эл.почта: [vbel@ibrae.ac.ru](mailto:vbel@ibrae.ac.ru)

## Содержание

Введение.....	4
Лекция 1. Поддержка принятия решений при аварийных выбросах радиоактивных веществ на основе компьютерного моделирования.....	4
Лекция 2. Этапы вычислительного эксперимента. Математические модели. Законы сохранения. Иерархия моделей. Упрощения.....	6
Лекция 3. Обзор пакета «Нострадамус». Исходные данные и целевые функции. Представление результатов.....	8
Лекция 4. Радиоактивность. Описание источника выброса. Временные фазы. Групповой и нуклидный состав. Алгоритм выпуска частиц при стохастическом моделировании. Модели начальной стадии подъема («Пожар», «Взрыв»).....	8
Лекция 5. Модели атмосферного переноса примесей. Адвекция и диффузия. Источники, стоки, Гауссовы модели. Стохастический подход. Метод блуждающих облаков.....	16
Лекция 6. Расчет приземных концентраций и выпадений. Потери в облаке за счет сухого осаждения и вымывания осадками. Консервативность.....	18
Лекция 7. Радиоактивный распад. Цепочки. Разветвления. Моделирование распада в «Нострадамусе». Распад после прохождения облака – долговременные последствия.....	20
Лекция 8. Пути облучения. Целевые функции. Расчет доз и выпадений. Уточненная дозиметрическая модель.....	24
Лекция 9. Метеорология. Сценарий. Классы устойчивости. Коэффициент диффузии атмосферы. Вертикальный профиль. Орографическое приспособление ветрового поля.....	27
Лекция 10. Обратная задача. Мониторинг. Восстановление характеристик источника.....	36
Лекция 11. Контрмероприятия на острой фазе радиационной аварии. Йодистая профилактика, укрытие, эвакуация. Модели риска. Оценка ущерба.....	40
Лекция 12. Модели непрерывных выбросов. Экологическое воздействие работающих станций.....	42
Лекция 13. Практическое участие системы «Нострадамус» в проектах. Аварийное реагирование. Чернобыльский след. Рязанская ГРЭС. RealTime модель (Игналинская АЭС).....	48
Лекция 14. Расчет и анализ варианта выброса.....	51
Вопросы по курсу.....	51
Литература.....	51

## Введение

Инциденты с выбросом радиоактивности в окружающую среду на ядерно-опасных объектах (особенно Чернобыльский) показали жизненную важность прогноза радиационной обстановки, воздействия на окружающую среду и население. Фактор времени в этой ситуации становится решающим. С другой стороны, обработка большой и разнообразной, быстроменяющейся информации невозможна без применения современных компьютерных технологий.

Поэтому была поставлена и решена задача создания компьютерной системы для поддержки принятия решений (ППР) при аварийных выбросах на АЭС. В разработке системы участвовали самые разные специалисты – физики-теоретики, математики, вычислители, программисты. В разработку системы были заложены самые современные многомерные численные методики, при реализации которых главное внимание также уделялось эффективности реализации предложенных алгоритмов. Большинство методик разработаны или реализованы впервые.

Эта система в настоящее время является штатным, сертифицированным продуктом для использования в кризисном центре ИБРАЭ РАН, постоянно использовалась и используется при учебно-тренировочных, а также реальных инцидентах.

Система внедрена на ряде атомных станций и других предприятий ядерно-энергетического комплекса.

Предлагаемые лекции содержат комплексное изложение проблем, включая математические основы, методики реализации алгоритмов, принципы построения и описание диалоговой системы, опыт ее использования.

Лекции содержат «кухню» полного рабочего цикла от постановки проблемы до эксплуатации компьютерного продукта – результата многолетней работы коллектива специалистов.

## Лекция 1. Поддержка принятия решений при аварийных выбросах радиоактивных веществ на основе компьютерного моделирования

### Инциденты и аварии с выбросом радиоактивности. Шкала МАГАТЭ. Реагирование

Шкала МАГАТЭ

	Вне площадки	На площадке	Ухудшение защиты	Пример
<b>7</b> <b>Крупная авария</b>	Крупная авария с воздействием на здоровье и окружающую среду			Чернобыль, 1986 г. Фукусима, 2011 г.
<b>6</b> <b>Серьезная авария</b>	Значительный выброс. Полное принятие контрмер			Кыштым, 1957 г.
<b>5</b> <b>Авария с риском за пределами площадки</b>	Ограниченный выброс. Частичное принятие контрмер	Тяжелое повреждение АЗ		Реактор в Уиндскайте, 1957 г. (Великобритания) Три-Майл-Айленд, США
<b>4</b> <b>Авария без значительного риска за пределами площадки</b>	Незначительный выброс. Облучение на уровне норм.	Значительное повреждение АЗ, смертельные дозы персонала		Уиндскайте, 1973 г. (Великобритания) АЭС Сен-Леран, 1980 г. (Франция), Аргентина 1983 г.
<b>3</b> <b>Серьезный инцидент</b>	Малый выброс, облучение доли норм.	Обширное распространение, большие дозы персонала	Близко к аварии – нарушены все защиты	АЭС Вандельос, Испания
<b>2</b> <b>Инцидент</b>		Значительное распространение, облучение персонала	Значительное нарушение защит	
<b>1</b> <b>Аномалии</b>			Отклонения от штатного режима	
<b>0</b> <b>Отклонение</b>				

Чрезвычайное происшествие -> сбор экспертов и лиц, принимающих решения (администрации).

## **Использование современных компьютерных технологий**

Общая справочная информация об объекте, окружении, населении, погоде.

Компьютерные системы связи, оповещения, конференции.

Математическое моделирование для прогноза ситуации.

Радиологический мониторинг на местности и с датчиков.

Анализ и прогноз ситуации экспертами.

Рекомендации властям.

## **Требования к программному обеспечению**

Главное – анализ и прогноз ситуации.

Система реального времени.

Учет реальной обстановки – источника, погоды, окружения, населения.

Постоянное уточнение – многовариантность, неполнота данных.

Наличие заранее подготовленных сценариев исходных данных и форм представления результатов, удобных для экспертов.

Адекватные современные модели и заполненные базы данных.

Удобный ввод информации.

Концентрированный вывод.

Системы обучения.

## **Общее описание радиологической аварии и ее последствий для окружающей среды**

### **Краткий экскурс по основным понятиям курса лекций**

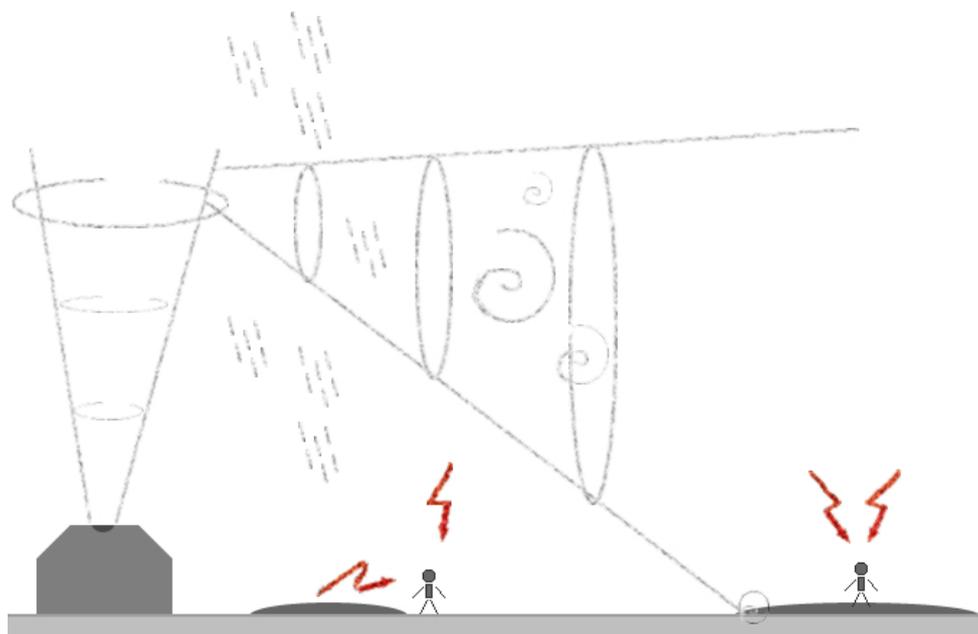
Авария с выбросом и распространением в атмосфере радионуклидов (см. рис.).

Основные термины и явления

1. Начальный подъем примеси
  - гидродинамический и тепловой подъем
  - эффективная высота выброса
2. Перенос в атмосфере
  - адвекция, турбулентная диффузия
3. Выпадения
  - сухие и влажные (вымывание осадками)
4. Облучение
  - от радиоактивного облака
  - от зараженной поверхности
  - внутреннее облучение от вдыхаемого загрязнителя
5. Доза – временной интеграл от мощности излучения
  - от облака
  - от поверхности
  - внутренняя (ингаляционная)

## 6. Контрмероприятия по уменьшению дозы

- йодистая профилактика (уменьшение дозы на щитовидную железу)
- укрытие (ослабление всех видов облучения)
- отселение и эвакуация (покидание опасной зоны)



## Лекция 2. Этапы вычислительного эксперимента. Математические модели. Законы сохранения. Иерархия моделей. Упрощения

Главное – анализ и прогноз ситуации. А это возможно только с использованием математического моделирования. По идеологии - это вычислительный эксперимент.

### Численные модели. Этапы разработки

1. Цель - исследуемое явление (заказчик).
  - актуальность
  - анализ современного состояния
  - основные цели
  - трудоемкость, кадры, финансирование
2. Физическая модель (теория)
  - теоретические исследования
  - выбор значимых явлений.
3. Математическая модель.
  - определяющие уравнения
  - константы, свойства, граничные условия

4. Численная реализация (вычислитель)
  - иерархия моделей
  - дискретизация, аппроксимация, устойчивость
  - метод решения сеточных уравнений
  - алгоритм, программа
  - тестирование
  - контроль версия (ревизии Turtoise SVN)
  - контроль и исправление ошибок (Redmine)
5. Численный эксперимент.
  - верификация, валидация
  - сравнение с другими моделями, расчетами, экспериментами
  - анализ результатов, проверка исходных допущений
6. Уточнение физических, математических моделей, повторение п.п. 3 – 5.
7. Оформление как продукта, интегрированная среда.
  - ввод, проверка исходных данных
  - управление счетом
  - отображение результатов
  - сохранение вариантов
  - документация
  - сертификация
8. Сопровождение, модификации.
  - отчуждение продукта
  - обучение пользователей
  - анализ использования
  - модификации по запросам пользователей.
9. Использование в кризисных центрах разного уровня.

**Математическая модель – это, как правило, изменение со временем уравнения баланса с источниками.**

$$dM / dt = \text{источник массы}$$

$$d(MV) / dt = \text{внешние силы} + \text{внешние потоки}$$

$$d(ME) / dt = \text{внешние источники} + \text{работа внешних сил}$$

### Примеры

1. Теплопроводность, диффузия

$$\text{Поток} = -D * \text{grad}(\dots)$$

2. Баланс частиц при химреакциях, радиоактивный распад.



$$A \Rightarrow B \text{ – распад, } dA / dt = \text{поток} = -L * A$$

3. Уравнения сплошной среды (Гидродинамика)

$$F^v = (\mathbf{V}, \mathbf{S}) \text{ – поток объема}$$

$$F^m = \rho * F^v \text{ – поток массы}$$

$$\mathbf{F}^u = \rho * \mathbf{V} * F^v \text{ – поток импульса}$$

$$F^e = \rho * E * F^v \text{ – поток энергии}$$

### Степень сложности, иерархия моделей

Набор объектов, свойств определяют размерности задачи.

- физические размерности  $t, x, y, z, N, G, \dots$
- численные размерности, шаги
- характерные времена, минимальное, максимальное

Возможные упрощения

- уменьшение физических и численных размерностей
- использование автомодельных зависимостей (фактически другой способ уменьшения физических размерностей)
- использование корреляций

Результат – расчет с приемлемой точностью за приемлемое время.

## Лекция 3. Обзор пакета «Нострадамус». Исходные данные и целевые функции. Представление результатов

Лекция в кризисном центре (по возможности).

1. Запуск пакета. Главное меню.
2. Меню объект.
3. Меню «источник».
4. Метеорология.
5. Параметры счета.
6. Расчет прогноза.
7. Результаты расчета.

## Лекция 4. Радиоактивность. Описание источника выброса. Временные фазы. Групповой и нуклидный состав. Алгоритм выпуска частиц при стохастическом моделировании. Модели начальной стадии подъема («Пожар», «Взрыв»)

- Радиоактивность
- Модель (сценарий) источника
- Основная идея моделирования распространения
- Стратегия выпуска частиц метода Монте-Карло

### Радиоактивность

Явление основное – и генерация энергии, и вред при аварии.

$N$  – число ядер изотопа

$$dN / dt = - \lambda N, \quad \lambda = \ln(2) / T_{0.5}$$

Примеры времен полураспада:

$$T_{0.5}(\text{Cs137}) = 30 \text{ лет}$$

$$T_{0.5}(\text{I131}) = 8 \text{ суток}$$

$$T_{0.5}(\text{Kr89}) = 1 \text{ мин.}$$

$$A = \lambda N - \text{активность [Бк]}, 1 \text{ Ки} = 3.7 \times 10^{10} \text{ Бк}$$

Вообще – десятки нуклидов.

Расчет цепочек распада – позднее.

## Основная идея моделирования распространения

Лагранжевый стохастический метод – метод облаков.

- расчет 3Д адвекции-диффузии очень дорог
- след только узкая часть области (не гонять нули)

## Описание динамики облаков – рождение, основные преобразования, разрушение

Рождение

- ввод через диалог пакета (время, место, групповой и нуклидный состав).
- база сценариев
- результаты расчета реакторных кодов (Melcor)

Разрушение

- переход в стабильное состояние, вылет за границы расчетной области.

Динамика – расчет прогноза.

## Задание источника

$A(t, g, n)$  - основные исходные данные по источнику.

$t$  – время,  $g$  – группа,  $n$  - нуклид

- Фазы (зависимость от времени)
- Группы (поведение в атмосфере и взаимодействие с поверхностью)
- Нуклиды (цепочки)

## Основные модельные параметры (компромисс – точность/время расчета варианта)

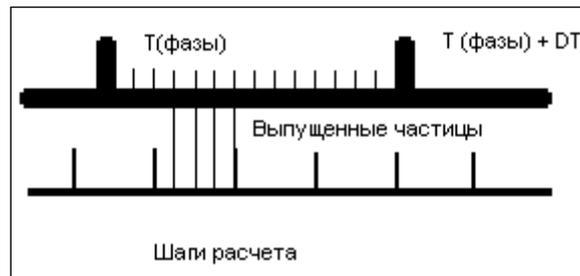
- Число выпущенных частиц-облаков.
- Шаг по времени

Частица –  $(t, g)$  – группа.

## Стратегия выпуска частиц

$N$  – общее число выпущенных частиц

$$NG = AG / \text{sum}(AG), AG = A(t, g), G = (t, g)$$



Везде будем обращать внимание на *real time* – быстрый ввод и обработка данных.

- База сценариев подготовлены заранее, ввод источника целиком.
- Перерасчеты при изменении активностей суммирование «вверх» и «пропорциональное изменение «вниз».
- Достаточно простой, в то же время произвольный сценарий выброса.

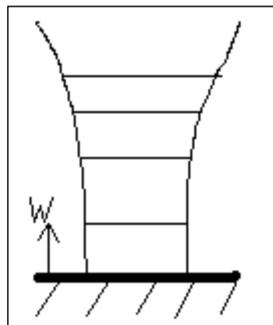
### Модели начальной стадии подъема («Пожар», «Взрыв»)

- Рисунок начальной стадии вертикального подъема нагретого пара с начальной скоростью
- Основополагающие уравнения
- Стационарный (нейтральный) профиль температуры в атмосфере
- Понятие потенциальной температуры
- Частота Брандта-Вайселя
- Нестационарная модель (взрыв)
- Валидации модели

#### Модель «Пожар» - стационарная модель

$$T_0 > T_{атм}$$

$$W > 0 \text{ (начальная скорость)}$$



Стационарная струя.

Секундная масса:

$$M = \rho S W = \rho \pi R^2 W$$

Основные уравнения.

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \frac{\partial(\rho SW)}{\partial z} = \dot{M}_{ext}$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = 0$$

$\rho SW$  – секундная масса

$$M = \rho SW = \rho \pi R^2 W$$

$$dz = W \cdot dt$$

Масса :

$$\frac{dM}{dt} = \alpha WM, \quad \frac{dM}{dz} = \alpha M$$

Импульс :

$$\frac{d(MW)}{dt} = -Mg + M_a g; \quad \frac{M_a}{M} = \frac{\rho_a}{\rho}; \quad P_a = P$$

Энергия :

$$dU + P \cdot dV = \delta Q$$

$$P = P_{амм} \Rightarrow (U, V) \rightarrow (H, P)$$

$$d(U + PV) - V \cdot dP = \delta Q$$

$$dH - V \cdot dP = \delta Q$$

$$\frac{d(Mh)}{dt} = \frac{M}{\rho} \frac{dP}{dz} + h_a \frac{dM}{dt}$$

Итого :

$$\frac{dM}{dz} = \alpha M$$

$$\frac{d(MW)}{dz} = \frac{Mg}{W} \left( \frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right)$$

$$\frac{d(Mh)}{dz} = \frac{M}{\rho} \frac{dP}{dz} + h_a \frac{dM}{dz}$$

$$\frac{dP}{dz} = -\rho_a g \quad P = \rho RT = \rho_a RT_a$$

+ начальные и граничные условия (скорость, температура струи на входе, плотность, температура, вовлечение атмосферы)

Упрощения системы

Без вовлечения  $M = \text{const}$  (или вовлечение пренебрежимо мало).

$$\frac{dW}{dt} = g \left( \frac{\rho_a}{\rho} - 1 \right)$$

$$\frac{dh}{dt} = -Wg \frac{\rho_a}{\rho}$$

Стационар – равенство плотностей. Стационарный профиль температуры.

$$h = c_p T$$

$$c_p \frac{dT_a}{dz} = -g \quad \frac{dT_a}{dz} = -\frac{g}{c_p}$$

Около 10 град./км. С учетом влажности – 6 град./км.

Малые отклонения от стационара.

Определение потенциальной температуры.

$$\frac{dT_a}{dz} = -\frac{g}{c_p} + \frac{d\theta}{dz} \quad \theta - \text{потенциальная температура}$$

Малые отклонения:

$$W \approx 0$$

$$T - T_a = \delta T \ll T_a$$

$$\frac{dW}{dt} = g \left( \frac{T}{T_a} - 1 \right)$$

$$c_p \frac{dT}{dt} = -Wg \frac{T}{T_a}$$

$$c_p \frac{dT}{dt} = (-g + c_p \frac{d\theta}{dz}) \cdot W$$

$$\frac{dW}{dt} = g \frac{\delta T}{T}$$

$$\frac{d\delta T}{dt} = -W \frac{d\theta}{dz}$$

$$\frac{d^2 W}{dt^2} + \left( \frac{g}{T} \frac{d\theta}{dz} \right) W = 0$$

$$\varpi = \sqrt{\frac{g}{T} \frac{d\theta}{dz}} \text{ – частота Брандта – Вайселя.}$$

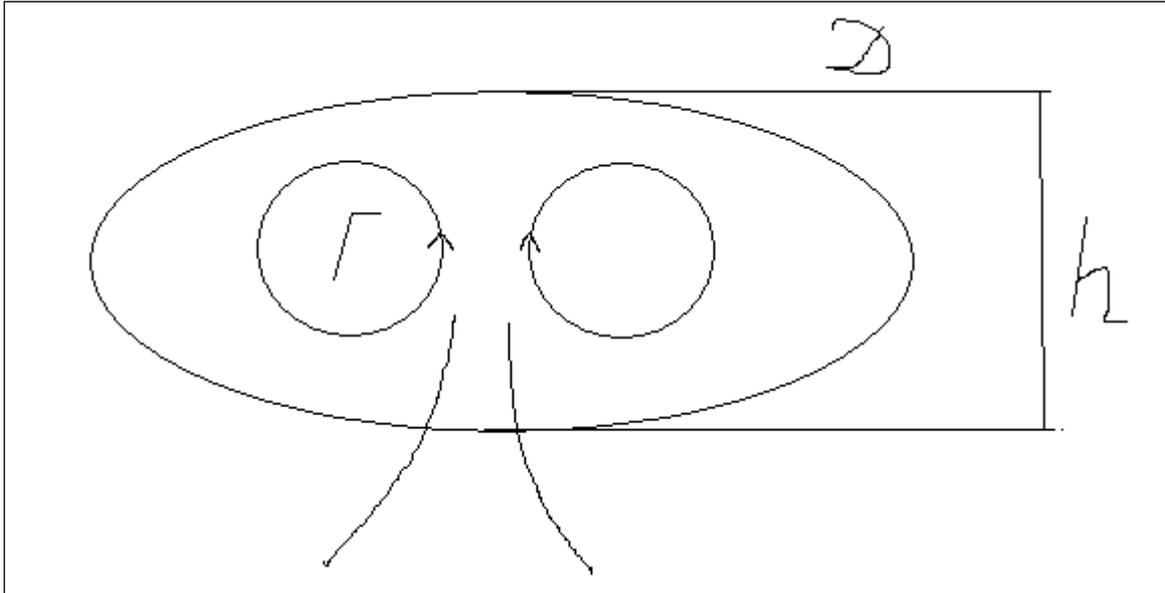


$$\frac{d\theta}{dz} > 0 \quad \text{– устойчивая (инверсия)}$$

$$\frac{d\theta}{dz} < 0 \quad \text{– неустойчивая (конвекция)}$$

$$\frac{d\theta}{dz} = 0 \quad \text{– нейтральная (изотермия)}$$

## Модель «Взрыв»



Усложнения:

- введена циркуляция (сила Жуковского)

$$F = -2\pi R\Gamma\rho$$

- лобовое сопротивление

$$F = -\frac{c_d S}{2} \rho v |v|$$

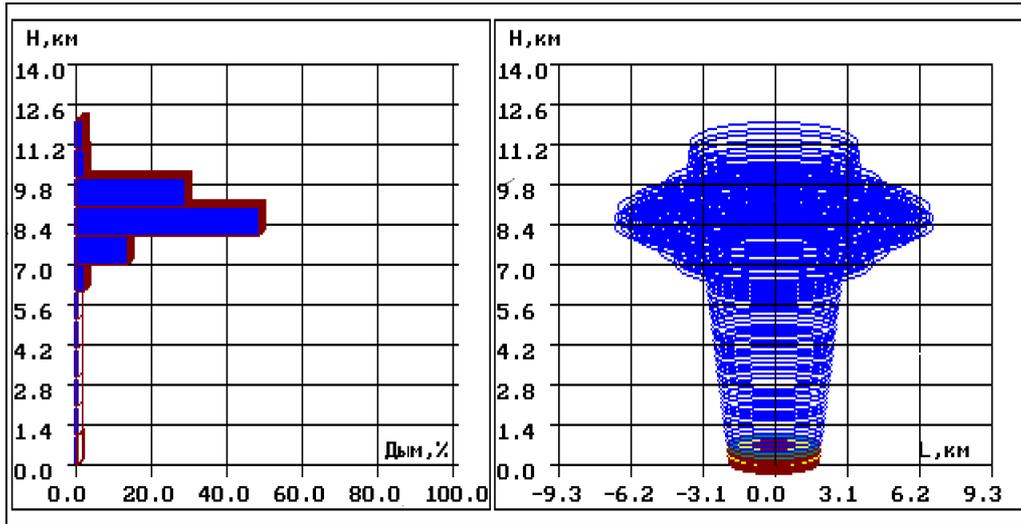
- добавлено уравнение для циркуляции (из анализа автомодельных режимов).

$$\frac{d\Gamma}{dt} = \frac{\Gamma - \Gamma_0}{\tau}, \Gamma_0 - \text{автомодельное решение}$$

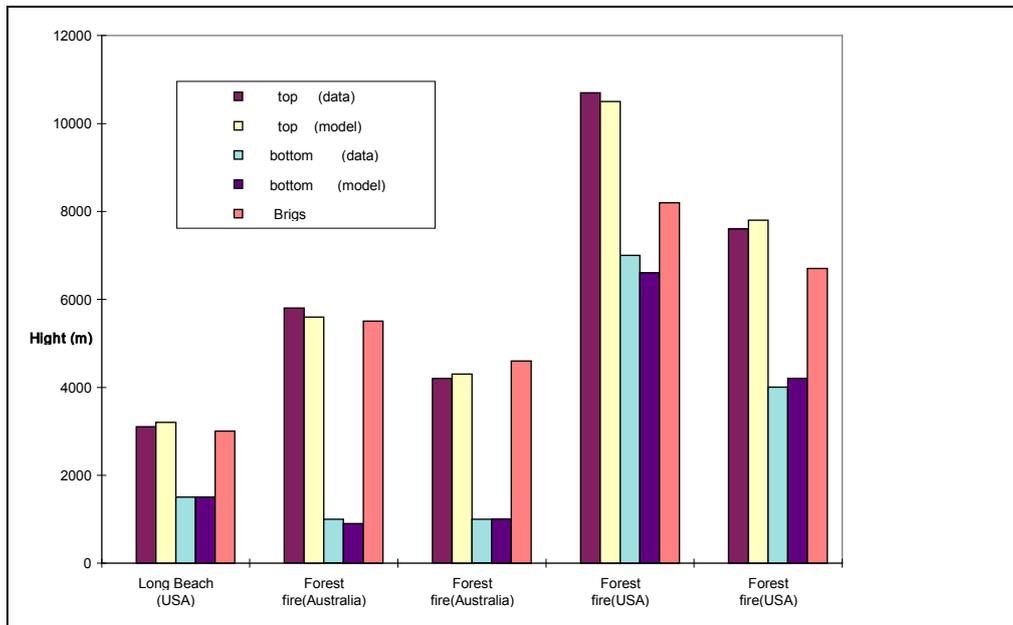
## Тестирование

1. На автомодельных решениях (линейный рост радиуса струи)
2. На сравнении с экспериментами (лабораторными и ядерными взрывами)

Модель «Пожар»

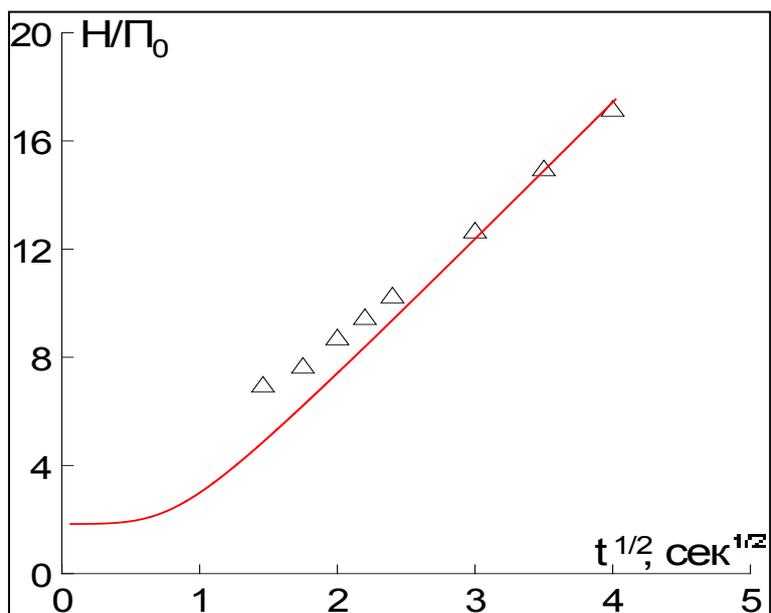


Гамбургский пожар. Натурные данные и расчет



Лесные пожары. Сравнение расчета с измерениями

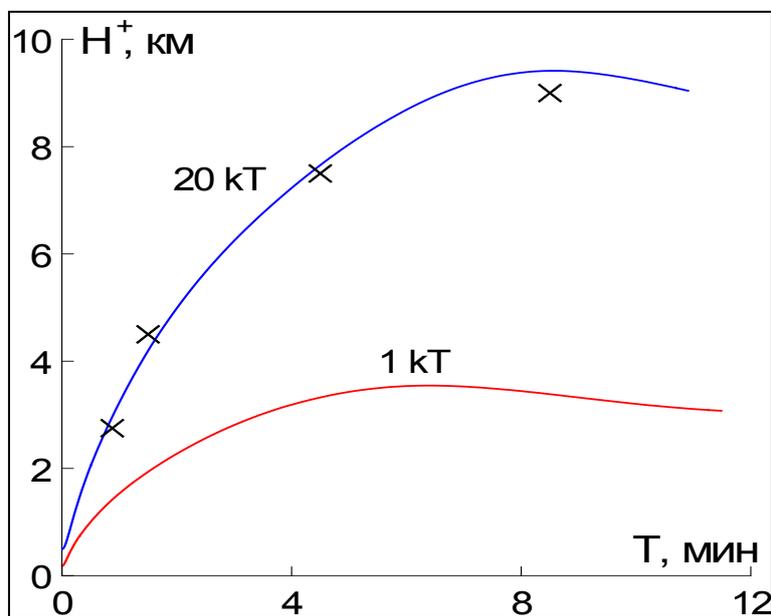
Модель «Взрыв»



Лабораторные эксперименты (30 кг тротила)

Автомодельный режим подъема термика.

$\Pi_0 = (Q\beta g/2\pi\rho_0 C_p)^{1/4}$ .  $H$  - высота,  $Q$  is заряд,  $\beta$  коэффициент теплового расширения. Маркеры – эксперимент Гостинцева.



Атомные взрывы (1 and 20 кт)

Подъем облака при энергии взрыва  $Q=20kT$  и  $Q=1kT$ .

## Лекция 5. Модели атмосферного переноса примесей. Адвекция и диффузия. Источники, стоки. Гауссовы модели. Стохастический подход. Метод блуждающих облаков

Уравнение переноса и диффузии, описывающее распространение одного радионуклида в атмосфере имеет вид:

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

В этом уравнении:

$c$  - объемная концентрация;

$U(x,y,z,t)$ ,  $V(x,y,z,t)$  - горизонтальные компоненты скорости ветра;

$W = W(x, y, z, t) - W_g$ ;  $W(x, y, z, t)$  - вертикальная компонента скорости ветра;

$W_g$  - скорость гравитационного осаждения;

$K_x(x, y, z, t)$ ,  $K_y(x, y, z, t)$  - коэффициенты горизонтальной диффузии;

$K_z(x, y, z, t)$  - коэффициент вертикальной диффузии;

$Q(x,y,z,t)$  - мощность источника выброса;

$S$  - член, учитывающий вымывание осадками, радиоактивный распад и появление радионуклида в результате реализации цепочек превращений других радионуклидов, содержащихся в источнике выброса.

Консервативная форма:

$$\frac{\partial m}{\partial t} + \oint c \bar{U} \cdot d\bar{S} = Q; \quad m = cV; \quad V - \text{контрольный объем (HX * HY * HZ)}$$

### Гауссовы модели

Непрерывный выброс из точечного источника

$$c(x, y, z) = Q \exp\left[-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right] \left\{ \exp\left[-\frac{(z-h)^2}{2\sigma_z^2}\right] + \exp\left[-\frac{(z+h)^2}{2\sigma_z^2}\right] \right\} / (2\pi\sigma_y\sigma_z\bar{u})$$

### Стохастическая модель

Это ядро, главный алгоритм системы.

Идея связи между подходами.

$$dX = Udt + \sigma_x da_x;$$

$$\sigma_x = \sqrt{2k_x \cdot dt}$$

$$\rho(x, t)$$

$$\rho(x, t + dt) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma}} \int \rho(\zeta, t) \exp\left(-\frac{(x-\zeta)^2}{2\sigma^2}\right) d\zeta$$

$$\rho(\zeta, t) = \rho(x, t) + (\zeta - x) \frac{\partial \rho}{\partial x} + \frac{(\zeta - x)^2}{2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} + \dots$$

$$\rho(x, t + dt) = \rho(x, t) + \frac{1}{2\sqrt{2\pi\sigma}} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} \int (\zeta - x)^2 \exp\left(-\frac{(x-\zeta)^2}{2\sigma^2}\right) d\zeta =$$

$$= \frac{\sigma^2}{2} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}$$

$$u = \frac{(x-\zeta)}{\sigma}$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = \frac{\sigma^2}{2 \cdot dt} \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2} = k \frac{\partial^2 \rho}{\partial x^2}; \quad \sigma^2 = 2k \cdot dt$$

В основу расчета концентрации радионуклида, распространяющейся в неоднородном поле скорости ветра, при неизотропной турбулентности (без учета вымывания и цепочек превращений) положена система стохастических уравнений для координат частиц:

$$\frac{dX}{dt} = U + U^1; \frac{dY}{dt} = V + V^1; \frac{dZ}{dt} = W + W^1$$

$$U(t, x(t, \alpha, \beta, \gamma), y(t, \alpha, \beta, \gamma), z(t, \alpha, \beta, \gamma));$$

$$V(t, x(t, \alpha, \beta, \gamma), y(t, \alpha, \beta, \gamma), z(t, \alpha, \beta, \gamma));$$

$$W(t, x(t, \alpha, \beta, \gamma), y(t, \alpha, \beta, \gamma), z(t, \alpha, \beta, \gamma));$$

$\alpha, \beta, \gamma$  - лагранжевы координаты частиц;

$U^1, V^1, W^1$  - компоненты пульсации скорости ветра вдоль траектории частиц - случайные функции;

$df/dt$  - субстанциональная производная

Перепишем систему стохастических уравнений в следующем виде

$$dX = Udt + \sigma_x da_x; \quad dY = Vdt + \sigma_y da_y; \quad dZ = \left( W + \frac{\partial K_z}{\partial z} \right) dt + \sigma_z da_z$$

где  $da_x, da_y, da_z$  - случайные величины с гауссовым распределением вероятности, с нулевым

математическим ожиданием и дисперсией  $\langle da_x^2 \rangle = dt$   $\langle da_y^2 \rangle = dt$   $\langle da_z^2 \rangle = dt$ .

В этом случае траектория любой лагранжевой частицы есть случайный Марковский процесс с независимыми приращениями.

Уравнения описывают изменения траектории любой лагранжевой частицы. Эйлеровы характеристики этого процесса - объемные концентрации радионуклида могут быть получены при помощи функции плотности вероятности  $\mu(x, y, z, t, x_0, y_0, z_0, t_0)$  - того, что частица, появившаяся в точке с координатами  $x_0, y_0, z_0$  в момент времени  $t_0$ , окажется в момент времени  $t$  в точке с координатами  $x, y, z$ .

Эйлерова объемная концентрация следующим образом выражается через функцию плотности вероятности:

$$c(x, y, z, t) = \int_0^t dt_0 \int_V \mu(x, y, z, t, x_0, y_0, z_0, t_0) S(x_0, y_0, z_0, t_0) dx_0 dy_0 dz_0 dt_0$$

где  $V$  - объем в атмосфере, который занимает источник.

Система стохастических уравнений (для объемных концентраций радионуклида) может быть сведена к решению уравнения адвекции-диффузии, если

$$\sigma_x^2 = 2K_x; \quad \sigma_y^2 = 2K_y; \quad \sigma_z^2 = 2K_z;$$

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial Uc}{\partial x} + \frac{\partial Vc}{\partial y} + \frac{\partial Wc}{\partial z} = \frac{\partial^2(K_x c)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2(K_y c)}{\partial y^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right)$$

или

$$\frac{\partial c}{\partial t} + \frac{\partial \left( U - \frac{\partial K_x}{\partial x} \right) c}{\partial x} + \frac{\partial \left( V - \frac{\partial K_y}{\partial y} \right) c}{\partial y} + \frac{\partial (W)c}{\partial z} =$$

$$\frac{\partial}{\partial x} \left( K_x \frac{\partial c}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( K_y \frac{\partial c}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( K_z \frac{\partial c}{\partial z} \right).$$

Как правило, производными от коэффициентов горизонтального турбулентного обмена по сравнению с горизонтальной скоростью ветра можно пренебречь.

## Метод облаков. Real Time! а) меньше частиц; и) сглаживание.

Основная идея методики состоит в том, что каждая пробная точка представляется как облако конечных размеров с гауссовым распределением плотности. При этом размеры облаков растут со временем в соответствии с диффузионным процессом. Можно сказать, что производится параметрическое разделение атмосферной дисперсии примеси на два процесса - случайные смещения центров облаков и рост их размеров. Суммарная дисперсия примеси в этих процессах должна быть равна исходной атмосферной дисперсии.

Смещения центров облаков определяются уравнениями:

$$dX = U dt + (2K'_x)^{1/2} da_{x,}, \quad dY = V dt + (2K'_y)^{1/2} da_{y,}, \quad dZ = W dt + (2K'_z)^{1/2} da_{z,}$$

( $da_{x,}, da_{y,}, da_{z,}$  – случайные гауссовы величины с нулевым математическим ожиданием)

Рост размеров облаков  $R$  и  $H$  (соответственно – горизонтального и вертикального) определяется соотношениями

$$d/dt (R^2) = 2 K''_x, \quad d/dt (H^2) = 2 K''_z,$$

Если  $H=1/3*$ (высота слоя перемешивания),  $K''_z$  кладется равным нулю.

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

$$\begin{aligned} K'_x + K''_x &= K_x, & K'_z + K''_z &= K_z \\ \text{или} & & & \\ K'_x &= K_x \beta, & K''_x &= K_x (1 - \beta), \\ K'_z &= K_z \beta, & K''_z &= K_z (1 - \beta) \end{aligned}$$

Концентрации в отдельном облаке  $i$  определяются следующим образом:

$$C_i = \frac{Q_i}{(2\pi)^{1.5} R^2 H} \exp \left[ -\frac{(x-x_i)^2}{2R^2} - \frac{(y-y_i)^2}{2R^2} - \frac{(z-z_i)^2}{2H^2} \right];$$

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

## Лекция 6. Расчет приземных концентраций и выпадений. Потери в облаке за счет сухого осаждения и вымывания осадками. Консервативность

Для вычисления приземной концентрации примеси каждому облаку наряду с нуклидным составом приписывается активность  $Q$ , так, чтобы суммарная активность всех облаков равнялась полной выброшенной активности. Приземная концентрация определяется как сумма приземных концентраций отдельных облаков выброшенной примеси.

Для каждого облака приземная концентрация определяется как средняя концентрация в контрольном объеме, представляющем собой прямоугольный параллелепипед с основанием, равным ячейке разностной сетки и некоторой высотой. Для облаков эта высота - 1м, для частиц - 20м (экспериментально подобрана, чтобы результаты по частицам и облакам были близкими).

$$\begin{aligned} C_0(x, y) &= \frac{Q}{V} * \left[ F \left( \frac{x_0 - x_c + h_x/2}{R_x} \right) - F \left( \frac{x_0 - x_c - h_x/2}{R_x} \right) \right] * \\ &* \left[ F \left( \frac{y_0 - y_c + h_y/2}{R_y} \right) - F \left( \frac{y_0 - y_c - h_y/2}{R_y} \right) \right] * \left[ F \left( \frac{z_0 - z_c + h_z/2}{R_z} \right) - F \left( \frac{z_0 - z_c - h_z/2}{R_z} \right) \right]; \end{aligned}$$

где  $x_c, y_c, z_c$  - центр облака;  
 $x_0, y_0, z_0$  - центр контрольного объема;  
 $h_x, h_y, h_z$  - размеры параллелепипеда;  
 $R_x, R_y, R_z$  - размеры облака;

$$F(z) = \int_{-\infty}^z \frac{1}{\sqrt{2\pi}} e^{-z^2/2} dz \quad \text{- функция ошибок.}$$

### Real Time!

Функция ошибок заменена в расчетах таблицей с постоянным шагом в диапазоне (3-5)  $\sigma$ .

- за несколько операций определяется значение (постоянный шаг таблицы!)

- не учитывается несущественная грязь за пределами (3-5)  $\sigma$ .

### Консервативность (в смысле выполнение законов сохранения)

$$\sum c_k V_k = Q, \quad V_k = (H_x \cdot H_y \cdot H_z)$$

При подсчете интенсивности выпадений за счет сухого осаждения полагалось, что в контрольном объеме высоты  $h$ , за временной шаг  $dt$  теряется на осаждение часть активности

$$F = c V_d S = \frac{Q_v}{Sh} V_d S$$

$$dQ_d = (Q_v/h) V_d dt$$

$Q_v$  - активность в контрольном объеме;

$$Q_v = Q[F(..X)][F(..Y)][F(..Z)]/(H_x * H_y * H_z)$$

$dQ_d$  - осажденная активность;

$V_d$  - скорость сухого осаждения.

Интенсивность вымывания осадками определялась аналогично, При этом рассматривался объем с высотой, равной высоте облаков (по  $z$  до бесконечности).

$$dQ_w = Q_w dt V_w P;$$

$Q_w$  - активность в контрольном объеме с высотой, равной высоте облаков;

$$Q_w = Q[F(..X)][F(..Y)]/(H_x * H_y)$$

$dQ_w$  - осажденная активность за счет вымывания;

$V_w$  - константа вымывания [час/сек/мм];

$P$  - интенсивность осадков [мм/час].

Плотность выпадений на поверхность земли определялась делением выпавшей активности на площадь основания контрольного параллелепипеда. Такая аппроксимация сохраняет суммарную активность в облаке и на земле (вернее изменение суммарной активности определяется только распадом нуклидов).

$$\frac{dQ}{dt} = -(C_d + C_w)Q$$

$$\frac{\hat{Q} - Q}{\tau} = -K\hat{Q}, \quad \hat{Q} = \frac{Q}{1 + K\tau} > 0$$

## Консервативность

Баланс потерь и выпадений (то что потеряло облако осело на земле).

$$\Delta C_{\text{вып}} = -\frac{\dot{Q} - Q}{S}$$

## Лекция 7. Радиоактивный распад. Цепочки. Разветвления. Моделирование распада в «Нострадамусе». Распад после прохождения облака – долговременные последствия

### Простейший распад

$N$  – число ядер изотопа

$$dN / dt = -\lambda N, \quad \lambda = \ln(2) / T_{0.5}$$

$T_{0.5}(\text{Cs137}) = 30$  лет

$T_{0.5}(\text{I131}) = 8$  суток

$T_{0.5}(\text{Kr89}) = 1$  мин.

$A = \lambda N$  - активность [Бк], 1Ки =  $3.7 \cdot 10^{10}$  Бк

### Простая цепочка

$$dN_1 / dt = -\lambda_1 N_1$$

$$dN_2 / dt = \lambda_1 N_1 - \lambda_2 N_2$$

· · ·

$$dN_{n-1} / dt = \lambda_{n-2} N_{n-2} - \lambda_{n-1} N_{n-1}$$

последний

$$dN_n / dt = -\lambda_n N_n$$

### Метод решения

Идея как в решении систем линейных уравнений для верхне (или нижне) треугольных матриц.

$$N_i(t) = \left( N_i^0 + \sum_{m=1}^{i-1} d_{m,i} N_m^0 \right) \exp(-\lambda_i t) - \sum_{m=1}^{i-1} d_{m,i} N_m(t),$$

$$N_i^0 = N_i(0)$$

$$N_i' = -\lambda_i \left( N_i^0 + \sum_{m=1}^{i-1} d_{m,i} N_m^0 \right) \exp(-\lambda_i t) - \sum_{m=1}^{i-1} d_{m,i} N_m'(t) =$$

$$= -\lambda_i N_i + \sum_{m=1}^{i-1} d_{m,i} N_m - \sum_{m=1}^{i-1} d_{m,i} (\lambda_{m-1} N_{m-1} - \lambda_m N_m) =$$

$$(\lambda_{i-1} N_{i-1} - \lambda_i N_i)$$

Откуда :

$$d_{i-1,i} = \lambda_{i-1} / (\lambda_{i-1} - \lambda_i)$$

$$d_{m,i} = \lambda_m / (\lambda_m - \lambda_i) \cdot d_{m+1,i}, m = 1, \dots, i-2$$

Итого :

$$N_i(t) = \sum_{m=1}^{i-1} A_{m,i} N_m(0)$$

Учет разветвлений.

$$dN_n/dt = \sum_m g_{m,n} \lambda_m N_m - \lambda_n N_n$$

Опуская выкладки (вопрос к экзамену)

$$d_{m,i} = \lambda_m / (\lambda_m - \lambda_i) \cdot \left( g_{m,i} + \sum_j g_{m,j} d_{j,i} \right)$$

### Real Time!

На самом деле цепочки не очень длинные и суммы короткие (см. примеры цепочек в конце лекции).

Распад в «Нострадамусе» - изменение долей по нуклидам на каждом облаке (группе). Все облака в группе выпускаются с одним нуклидным составом и этот состав меняется одинаково во всех облаках данной группы – потери пропорциональны. Распад нужно считать лишь для одного представителя каждой группы!

$$d_G = d_G(t)$$

$$Q = Q(\text{cloud})$$

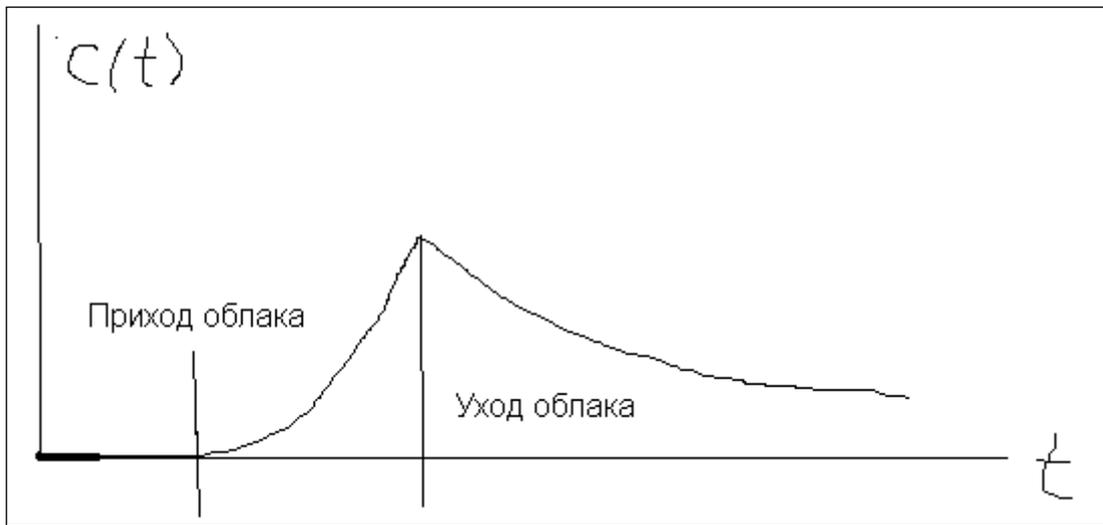
$$TIC_G = TIC_G(x, y, t) = \int_t C_G(x, y, t) dt$$

$$C_G = C_G(x, y, t)$$

- dt фиксирован => один раз в начале расчета считается матрица распада
- независимо в каждой (фазе-группе)
- равное распределение при переходе из группы в группу

### Распад после прохождения облака – долговременные последствия

После того, как все облака покинули расчетную область (нет облаков – нет потерь, выпадений на поверхность) – концентрации на земле считаются аналитически на любой последующий период времени. Это необходимо, чтоб сосчитать дозы за сутки, год, 10 лет, и т.п.

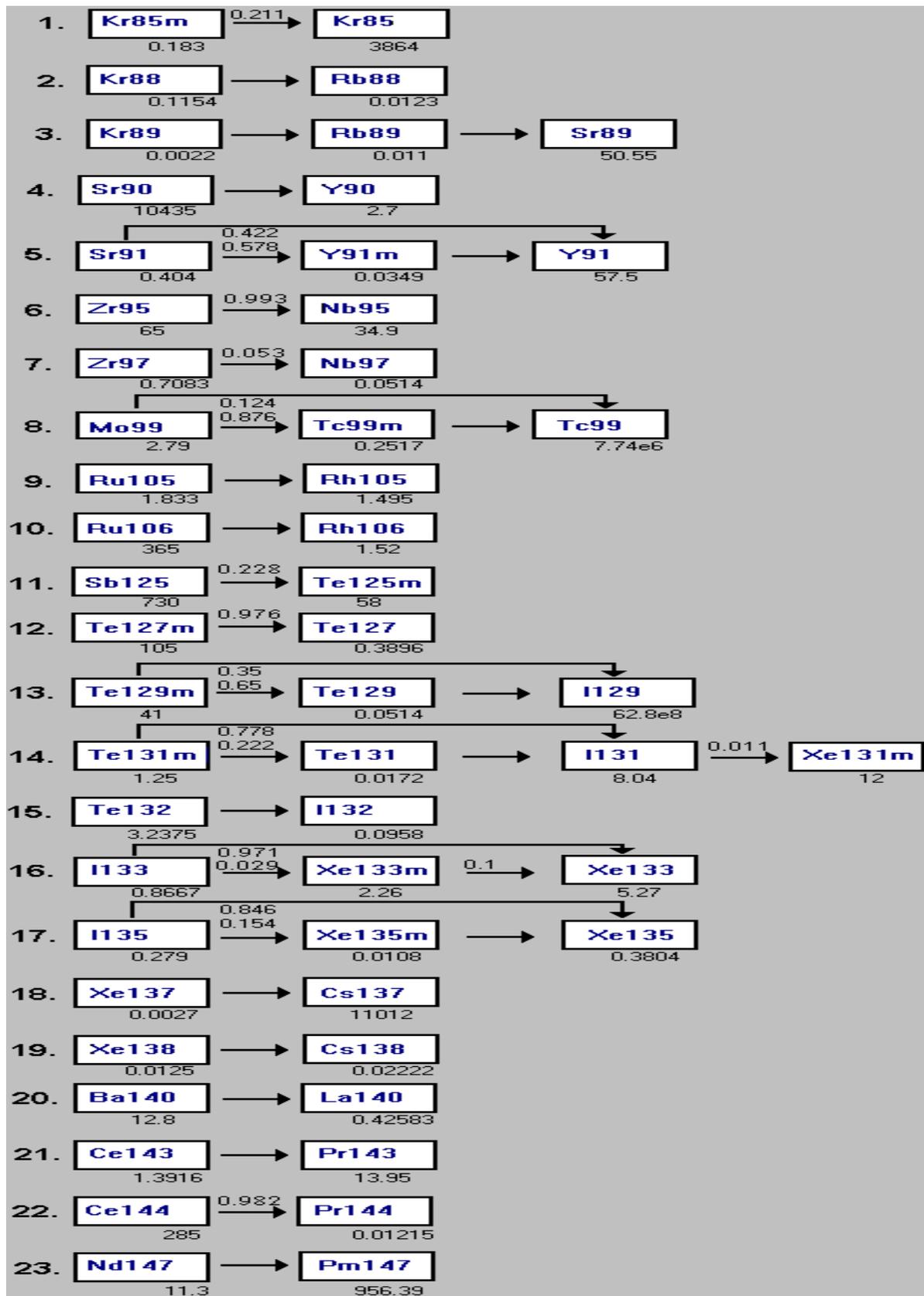


Изменение концентраций – «массы» в облаках и на поверхности (ТГС) + доли по группам

$$dC/dt = Q - \lambda C$$

$$C_n(t) = \sum_m (B_{m,n}(t) \exp(-\lambda_m t)) C_m(0)$$

$$D = K_n \int_t C_n(t) dt = K_n \sum_m (B_{m,n}(t) (1 - \exp(-\lambda_m t)) / \lambda_m) C_m(0)$$



## Лекция 8. Пути облучения. Целевые функции. Расчет доз и выпадений. Уточненная дозиметрическая модель

### Описание источника

$$A = \sum_t A_t \quad A_t = \sum_g A_{t,g} \quad A_{t,g} = \sum_n A_{t,g,n}$$

$$G = (t, g)$$

$$A = \sum_G A_G \quad A_{G,n} = d_{G,n} \cdot A_G$$

К частицам относятся

- суммарная активность («масса»)
- групповые характеристики (время выброса, продолжительность фазы, скорости выпадения и вымывания)
- доли по нуклидам

В расчете имеем в памяти машины трехмерные массивы

В любой момент времени  $t$

- $C(G, x, y)$ , концентрации
- $E(G, x, y)$ , выпадения
- $T(G, x, y)$ , ТИС – интеграл от концентрации

### Пути облучения

- внешнее (от облака, от поверхности)
- внутреннее (ингаляционный, пироральный)

### Целевые функции пакета «Нострадамус»

- дозы
- концентрации
- ТИС
- Выпадения
- Мощности дозы

Дозы:

- от облака
- от поверхности
- ингаляционная
- внешняя (облако + поверхность)
- полная (внешняя + ингаляционная)

По нуклидам:

- конкретный нуклид
- суммарный (по всем нуклидам)

Дозы по органам:

- эффективная (усредненная по органам)
- гонады
- красный костный мозг
- легкие
- щитовидная железа
- толстая кишка
- кожа

Ингаляционная доза – по возрастам

- до года
- 1-2
- 2-7
- 7-12
- 12-17
- > 17

Для концентраций, ТИС, выпадений и доз – срок (учет долговременного распада).

## Расчетные формулы

Для быстрого расчета пространственных распределений – приближения:

- полубесконечное облако (дозы лишь внутри облака, пропорционально концентрации)
- приближенный расчет распадов:

$$D = \int C_g d_{g,n} dt \approx d_{g,n} \cdot \int C_g dt = d_{g,n} \cdot T_g$$

Обозначения:

- C – концентрации (насчитываются суммированием по облакам)
- T – ТИС, интеграл от концентрации
- E – выпадения (поверхностная концентрация)
- O – облако, И – ингаляция, П – поверхность.
- d – доля, D – интеграл от доли.

В индексах:

G – группа, n – нуклид, o – орган, a – возраст, d – срок, дни

Дозы:

$$DO_{n,o} = \sum_g O_{n,o} T_g d_{g,n}$$

$$DI_{n,o,a} = \sum_g I_{n,o,a} T_g d_{g,n}$$

$$DPI_{n,o,d} = \sum_g \Pi_{n,o} E_g D_{g,n,d}, \quad D_{g,n,d} = \int d_{g,n} dt$$

Концентрация приземная.

$$C_{n,o} = \sum_g C_g d_{g,n}$$

ТИС

$$T_{n,o} = \sum_g T_g d_{g,n}$$

Мощность дозы.

$$MO_{n,o} = \sum_g O_{n,o} C_g d_{g,n}$$

$$MI_{n,o,a} = \sum_g I_{n,o,a} C_g d_{g,n}$$

$$MPI_{n,o,d} = \sum_g \Pi_{n,o} E_g d_{g,n,d}$$

Выпадения.

$$B_{n,d} = \sum_g E_g d_{g,n,d}$$

Суммарные дозы определяются суммированием по нуклидам в группах.

## Уточненная дозиметрическая модель

При мощном выбросе «под трубой» полубесконечная модель дает нулевые дозы. В «Нострадамусе» в этом случае пользователь может использовать более точную, но вычислительно более трудоемкую модель.

Мощность дозы от каждого облака рассчитывается как сумма мощности от сферы некоторого радиуса и мощность от остального пространства (две точные модели, два предельных случая аналитических выражений).

Радиус определяется как минимум из радиуса облака, радиуса нуклида и некоторого минимального радиуса (50м по умолчанию).

$$P_n = P1_n + P2_n$$

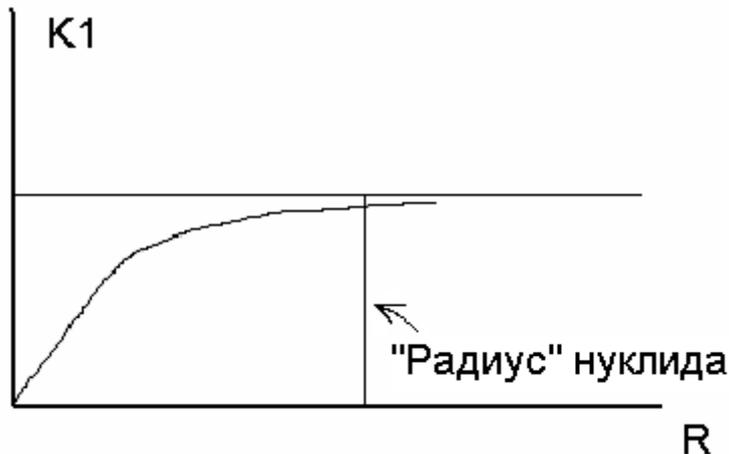
$P1$  – мощность от сферы радиуса  $R$

$P2$  – мощность от остального пространства

$$P1 = K1_n(R) \cdot C_n$$

$$P2 = K2_n(R) / R^2 \cdot A_n$$

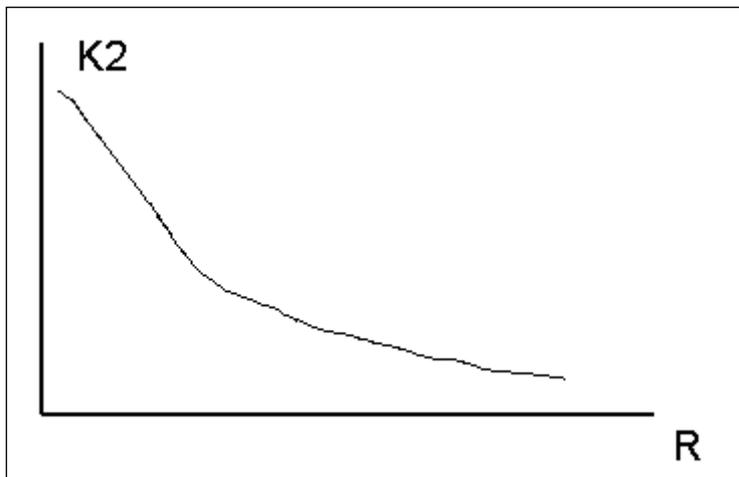
Мощность от сферы рассчитывается в приближении модели постоянной плотности (пропорционально концентрации – аналитическое выражение).



*Мощность в центре сферы постоянной плотности для данного нуклида. Предельное значение – мощность бесконечной сферы (полное пространство) постоянной плотности*

«Радиус» нуклида – расстояние где коэффициент практически равен предельному значению.

Мощность от остальной активности в облаке аппроксимируется мощностью от точечного источника этой (суммарной) активности, расположенного в центре облака (Аналитическое выражение).



*Мощность дозы на расстоянии  $R$  от точечного источника активности  $A$ .*

Коэффициенты пропорциональности для каждого нуклида рассчитываются по специальной программе, учитывающей спектр излучения/поглощения, и табулируются в зависимости от расстояния.

## Расчет по точечным объектам

В определенных пользователем (до расчета) точечных объектах (населенных пунктах, например) рассчитываются заданный набор целевых функций. Интегрирование (учет распадов) в этом случае производится точно (используется уточненная дозиметрическая модель), в отличие от пространственных распределений, где используются приближенные модели.

## Лекция 9. Метеорология. Сценарий. Классы устойчивости. Коэффициент диффузии атмосферы. Вертикальный профиль. Орографическое приспособление ветрового поля

### Важность метеорологии

Погода – определяющий фактор воздействия аварийного выброса на окружающую среду. Направление ветра, устойчивость и осадки решающим образом определяют направление, протяженность распространения и интенсивность разбавления и выпадений, а значит и дозы.

### Сценарий погоды в пакете «Нострадамус»

Временные фазы. Определяющие параметры метеосценария. Задание ветрового поля.

1 Tbeg- Tend скорости:  $V_x, V_y$  Устойчивость: St Шероховатость: Sh

2 . . . таких строк можно задать произвольное количество.

Может быть 2Д ветер и 2Д шероховатость.

**Real Time!** Важны обе части, и реальность (изменчивость сценария) и простота (чтоб считать быстрее времени реального процесса).

- достаточно простой, в то же время произвольный сценарий погоды.

- иерархическая модель сценария, можно простейший (константа), можно увеличить размерность, можно запросить готовый сценарий гидрометеослужбы.

### Классы устойчивости. Определение стабильности

Три класса по старой, упрощенной классификации (см. лекцию по начальной стадии).



- неустойчивая (конвекция)

- нейтральная (изотермия – постоянство потенциальной температуры)

- устойчивая (инверсия). Если приземная устойчивая, в среднем – неустойчивая, то есть место где переходит на неустойчивую – инверсия.

Семь классов Пасквилла-Тернера и их характерные признаки (визуальное определение).

1. Очень неустойчивое состояние, сильно развитая конвекция.

Очень солнечная летняя тихая погода.

Скорость 1 м/с

Град t-ры < -1.9

Класс А

2. Неустойчивое состояние, умеренная конвекция  
солнечно и тепло  
Скорость 2м/ с  
Град -1.8 - -1.7  
Класс В
3. Слегка неустойчивое состояние, слабая конвекция  
переменная облачность в течение дня  
Скорость 3м/ с  
град. -1.6 - -1.5  
класс С
4. Безразличное, нейтральное состояние, нейтральная стратификация  
облачный день или облачная ночь  
Скорость 5м/ с  
град. -1.4 -0.5  
класс D
5. Слегка устойчивое состояние, слабая устойчивость  
переменная облачность в течение ночи  
Скорость 3м/ с  
град. -0.4 +1.5  
класс E
6. Устойчивое состояние , умеренная устойчивость  
ясная ночь  
Скорость 2м/ с  
град. +1.6 -4.0  
класс F
7. Очень устойчивое состояние , сильная устойчивость  
ясная ночь  
  
Скорость 2м/ с  
град. >4.0  
класс G

Определения класса устойчивости в пакете «Н» (справочный диалог, если не знаешь, но вообще метеорологи должны сообщить).

- дата, время: есть (учет солнца, день/ночь)
- облачность, видимость

## **Горизонтальный и вертикальный коэффициенты диффузии. Вертикальный профиль ветра**

Конечно, пользователь не может ввести столько данных. Как поступать?

- данные получить от гидромета (ЗД с прогнозом)
- данные получить с локальной мачты (есть на каждой станции, аэродроме и т.п.)
- использовать типичные затабулированные, осредненные данные.

Все эти возможности реализованы в пакете.

## **Типичные затабулированные, осредненные данные**

Функции подобия для коэффициентов вертикального турбулентного обмена в зависимости от типа поверхности (шероховатости), ветра на высоте 10м, стратификации для теплого и холодного времени года, основаны на способе восстановления вертикальных профилей вектора скорости ветра, коэффициента вертикальной турбулентной диффузии. Справочник по атмосфере определяет типовые безразмерные вертикальные профили модуля скорости, угла поворота, вектора скорости ветра, коэффициента вертикальной диффузии для разных классов устойчивости в теплый и холодный период.

Типовые безразмерные профили получены на основе использования модели пограничного слоя атмосферы, учитывающей влияние перечисленных факторов на параметры ПСА (приземного слоя атмосферы). Входными параметрами для модели послужили данные измерений на метеорологической мачте в Обнинске.

Хотя входные данные для настройки модели получены на основе данных измерений для поверхности с шероховатостью определенного типа (шероховатость 0.5,-1м), полученные безразмерные профили находятся как в качественном, так и в количественном плане близкими с экспериментальными оценками полученными для поверхностей в том числе и с другими уровнями шероховатости .

## Основные масштабы

Масштабом скорости является величина пропорциональная динамической скорости (скорости трения)  $2.5U_*$ ,

масштабом длины – величина  $\lambda = 0.4U_*/f$ , где  $f$  - параметр Кориолиса,

масштабом коэффициента вертикальной диффузии – величина  $K_d = 0.004\lambda U_*$

Расчет скорости трения через скорость на высоте 10 м основан на использовании формулы .

$$U_* = \frac{0.4 \cdot U_{10}}{\ln\left(\frac{10}{z_c}\right) + A_s}$$

Для определения горизонтального коэффициента турбулентной диффузии используется параметризация горизонтальной дисперсии, в виде [40]:

$$\sigma_y = a D^\alpha,$$

где  $D$  - расстояние от источника, а и  $\alpha$  – параметры, зависящие от класса стабильности атмосферы. Отсюда, используя соотношение

$$2K_y = d(\sigma_y^2)/dt = /Vet/ d(\sigma_y^2)/dD,$$

получаем:

$$K_y = /Vet/ b D^\beta, \quad b = 2\alpha^2, \quad \beta = 2\alpha - 1.$$

( $/Vet/$  - модуль скорости ветра).

В модели предполагается, что  $K_x = K_y$

Из таблиц для разных классов устойчивости и для двух сезонов (холодного и теплого) берутся вертикальная зависимость безразмерной скорости ветра и угла разворота ветра – всего  $7*2 = 14$  таблиц.

Таким образом, скорость определяется из соотношения (в правых частях – табулированные функции в зависимости от безразмерной высоты, класса устойчивости (7 классов) и сезона (2 сезона)):

$$U(z)/\bar{U} = F_u(z/\lambda)$$

$$\Phi(z)/\bar{\Phi} = \dots$$

$$K(z)/\bar{K} = \dots$$

Итого.

Горизонтальная диффузия определяется скоростью ветра и прошедшим расстоянием. Вертикальный профиль ветра (абсолютная величина и поворот) и вертикальная диффузия определяются из 14 таблиц.

### Пример таблицы для теплого периода, класса устойчивости А.

	1	2	3	4	5	6	7	8
$z$	0.01	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5	0.6	0.7
$U$	3.2	4.7	5.2	5.4	5.6	5.8	5.9	6.0
$Fi$	0	2	3	4	5	6	7	8
$Kz$	0.015	0.148	0.238	0.269	0.272	0.255	0.227	0.196
$Dk/Dz$	1.7	1.2	0.6	0.14	-0.08	-0.23	-0.3	-0.32

## Техника использования криволинейных координат

Незначительные неровности в общем плоской поверхности (до десятков метров) можно учесть с помощью шероховатости. Однако при расчете распространения на поверхности земли со значительными неровностями или на дальние расстояния необходимо учесть изменения направления и величины ветра. И при использовании даже прогноза гидромета это также необходимо проделать.

Для орографического приспособления ветра будут использованы криволинейные координаты.

Мы умеем аппроксимировать производные на равномерной одномерной сетке:

$$\left\langle \frac{df}{dx} \right\rangle = \frac{f_{i+1} - f_i}{h}$$

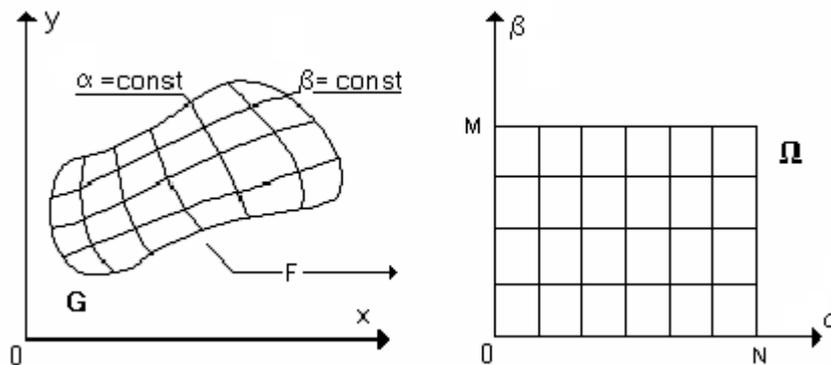
$$\left\langle \frac{d^2 f}{dx^2} \right\rangle = \frac{f_{i+1} - 2f_i + f_{i-1}}{h^2}$$

Более сложно, но возможно определить (аппроксимировать) производные на неравномерной одномерной сетке.

Как быть, если сетка не одномерна и неравномерна?

Ответ - использование преобразования координат на «удобную» область, прямоугольник, где это позволяет топология и отображение достаточно гладкое.

Аналитически это давно используется с применением радиальных, цилиндрических и других криволинейных систем координат.



$$(X, Y) \rightarrow (\alpha, \beta)$$

$$x = x(\alpha, \beta)$$

$$y = y(\alpha, \beta)$$

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{\partial(f, y)}{\partial(x, y)} = \frac{\partial(f, y)}{\partial(\alpha, \beta)} \Big/ \frac{\partial(f, y)}{\partial(\alpha, \beta)}$$

$$\alpha, \beta \in (1, N) * (1, M), h_\alpha = h_\beta = 1$$

$$\frac{\partial f}{\partial \alpha} = f_{i+1} - f_i$$

Т.е. техника аппроксимации в криволинейной области:

- отображение на прямоугольник с построением сетки
- аппроксимация на равномерной сетке в пространстве индексов.

Отображение (2Д случай)

$$x = x(\alpha, \beta)$$

$$y = y(\alpha, \beta)$$

Пример радиальной сетки

$$x = \beta \frac{R}{M} \cos\left(\alpha \frac{2\pi}{N}\right)$$

$$y = \beta \frac{R}{M} \sin\left(\alpha \frac{2\pi}{N}\right)$$

$$\alpha \in [0, N]$$

$$\beta \in [0, M]$$

Отображение (3Д случай)

$$x = x(\alpha, \beta, \gamma)$$

$$y = y(\alpha, \beta, \gamma)$$

$$z = z(\alpha, \beta, \gamma)$$

Ковариантный базис

$$e_i = \left( \frac{\partial x}{\partial x^i}, \frac{\partial y}{\partial x^i}, \frac{\partial z}{\partial x^i} \right), x^i = (\alpha, \beta, \gamma)$$

Физический смысл – касательный вектор

$$e_\alpha = \left( \frac{\partial x}{\partial \alpha}, \frac{\partial y}{\partial \alpha}, \frac{\partial z}{\partial \alpha} \right), (\beta, \gamma) = const$$

Метрический тензор

$$g_{i,j} = (e_i \cdot e_j)$$

$$\det(g_{i,j}) = V^2, V = \sqrt{g}$$

2D

$$V = \sqrt{g_{11}g_{22} - g_{12}g_{21}}$$

$$g_{11} = \left( \frac{\partial x}{\partial \alpha} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial \alpha} \right)^2$$

$$g_{22} = \left( \frac{\partial x}{\partial \beta} \right)^2 + \left( \frac{\partial y}{\partial \beta} \right)^2$$

$$g_{12} = \left( \frac{\partial x}{\partial \alpha} \right) \left( \frac{\partial x}{\partial \beta} \right) + \left( \frac{\partial y}{\partial \alpha} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial \beta} \right)$$

$$V = \frac{\partial(x, y)}{\partial(\alpha, \beta)} = \left( \frac{\partial x}{\partial \alpha} \right) \left( \frac{\partial y}{\partial \beta} \right) - \left( \frac{\partial y}{\partial \alpha} \right) \left( \frac{\partial x}{\partial \beta} \right)$$

3D

$$V = \frac{\partial(x, y, z)}{\partial(\alpha, \beta, \gamma)}$$

Контрвариантный базис

$$Ve^\alpha = [\vec{e}^\beta \times \vec{e}^\gamma] = \begin{pmatrix} i \\ \frac{\partial x}{\partial \beta} \\ \frac{\partial x}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} j \\ \frac{\partial y}{\partial \beta} \\ \frac{\partial y}{\partial \gamma} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} k \\ \frac{\partial z}{\partial \beta} \\ \frac{\partial z}{\partial \gamma} \end{pmatrix} = \\ = \vec{S}^\alpha = \left( \frac{\partial(y,z)}{\partial(\beta,\gamma)}, \frac{\partial(z,x)}{\partial(\beta,\gamma)}, \frac{\partial(x,y)}{\partial(\beta,\gamma)} \right)$$

Ортогональность и нормировка

$$(\vec{e}^i, \vec{e}^j) = (\vec{e}_i, \vec{e}^j) = \delta_{i,j}$$

Разложение произвольного вектора

$$\vec{F} = F_x \vec{i} + F_y \vec{j} + F_z \vec{k} \\ (F_x, F_y, F_z) - \text{физические компоненты} \\ \vec{F} = \sum F_i e^i = \sum F^k e_k \\ F_i - \text{ковариантная компонента} \\ F^k - \text{контрвариантная компонента} \\ F_i = (\vec{F} \vec{e}_i), \quad F^k = (\vec{F} \vec{e}^k) \\ F_x = (\vec{F} \cdot \vec{i}) = \sum F^k (e_k \cdot \vec{i}) = \sum F^k (e_k)_x$$

Инвариантное определение

$$\nabla F = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\int F \cdot d\vec{S}}{V} \\ \text{div} \vec{F} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\int (\vec{F} \cdot d\vec{S})}{V} \\ \text{rot} \vec{F} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\int [\vec{F} \times d\vec{S}]}{V}$$

Пример – дивергенция в цилиндрических координатах

$$\text{div} \vec{F} = \lim_{V \rightarrow 0} \frac{\int (\vec{F} \cdot d\vec{S})}{V} = \\ \frac{d\varphi \cdot dz \cdot [(F_r \cdot r)(r + dr) - (F_r \cdot r)(r)] + \\ r \cdot d\varphi \cdot dr \cdot [(F_z)(z + dz) - (F_z)(z)] + \\ dr \cdot dz \cdot [(F_\varphi)(\varphi + d\varphi) - (F_\varphi)(\varphi)]}{r \cdot d\varphi \cdot dr \cdot dz} = \\ \left( \frac{1}{r} \frac{\partial(F_r r)}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial(F_\varphi)}{\partial \varphi} + \frac{\partial F_z}{\partial z} \right)$$

## Орографическое приспособление ветра

### Постановка задачи

Пусть задано поле  $U = (u_x, u_y, u_z)$  в области:

$$D : [x_1 \leq x \leq x_2] \cdot [y_1 \leq y \leq y_2] [z \geq Z_0(x, y)]$$

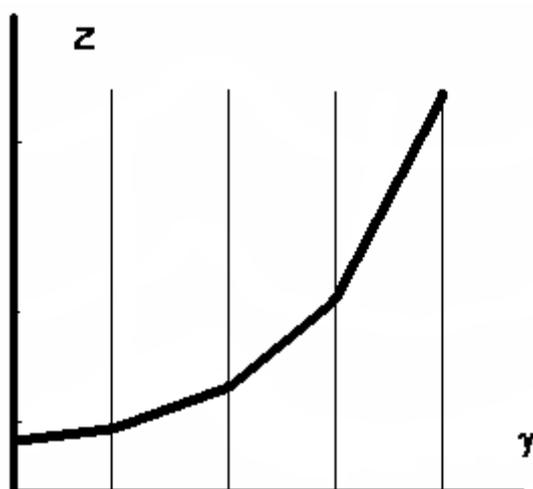
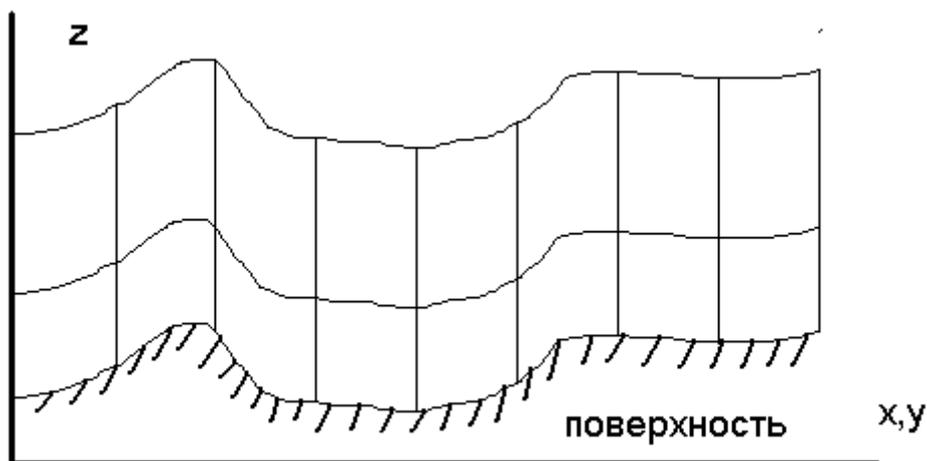
$Z_0$  – двумерный профиль нижней границы – орография. Это поле получено из «глобального» прогноза, может иметь ненулевой поток «внутри» поверхности и быть не дивергентным.

Необходимо рассчитать ближайшее в некоторой норме поле, удовлетворяющее граничным условиям и имеющее нулевую дивергенцию.

Для решения этой задачи будем использовать технику криволинейных координат.

### Преобразование системы координат

Отображение области.



Отообразим область  $D$  на параллелепипед  $\Omega(\alpha, \beta, \gamma)$

$$\alpha \in [0, N], \beta \in [0, M], \gamma \in [0, L]$$

в соответствии с формулами

$$x(\alpha, \beta, \gamma) = \alpha h^x + x_1, \quad h^x = (x_2 - x_1) / N$$

$$y(\alpha, \beta, \gamma) = \beta h^y + y_1, \quad h^y = (y_2 - y_1) / M$$

$$z(\alpha, \beta, \gamma) = Z^0(\alpha, \beta) + Z(\gamma)$$

где  $Z(\gamma)$  определяет нелинейное преобразование по высоте

Ковариантный базис

$$e_\alpha = (h^x, 0, Z_\alpha^0)$$

$$e_\beta = (0, h^y, Z_\beta^0)$$

$$e_\gamma = (0, 0, Z_\gamma)$$

Якобиан преобразования

$$\Delta = (e_\alpha, e_\beta, e_\gamma) = h^x h^y Z_\gamma$$

Контрвариантный базис

$$S^\alpha = [e_\beta \times e_\gamma] = (h^y Z_\gamma, 0, 0), \quad e_\alpha = S^\alpha / \Delta$$

$$S^\beta = [e_\gamma \times e_\alpha] = (0, h^x Z_\gamma, 0), \quad e_\beta = S^\beta / \Delta$$

$$S^\gamma = [e_\alpha \times e_\beta] = (-h^y Z_\alpha^0, -h^x Z_\beta^0, h^x h^y), \quad e_\gamma = S^\gamma / \Delta$$

Преобразование скоростей

$$U = U_x \cdot i + U_y \cdot j + U_z \cdot k = U^\alpha \cdot \varepsilon_\alpha + U^\beta \cdot \varepsilon_\beta + U^\gamma \cdot \varepsilon_\gamma$$

$$W = \Delta \cdot U$$

$$W^\alpha = \Delta(U, \varepsilon^\alpha) = (U, S^\alpha) = U_x h^y Z_\gamma$$

$$W^\beta = \Delta(U, \varepsilon^\beta) = (U, S^\beta) = U_y h^x Z_\gamma$$

$$W^\gamma = \Delta(U, \varepsilon^\gamma) = (U, S^\gamma) = -U_x h^y Z_\alpha^0 - U_y h^x Z_\beta^0 + U_z h^x h^y$$

$$U_x = W^\alpha h^x / \Delta$$

$$U_y = W^\beta h^y / \Delta$$

$$U_z = (W^\alpha Z_\alpha^0 + W^\beta Z_\beta^0 + W^\gamma Z_\gamma) / \Delta$$

2. Искомое поле  $w$  будем определять как минимизатор функционала

$$\Phi = \iiint d\alpha d\beta d\gamma [(W^\alpha - w^\alpha)^2 + (W^\beta - w^\beta)^2 + (W^\gamma - w^\gamma)^2]$$

при условии:

$$\frac{\partial w^\alpha}{\partial \alpha} + \frac{\partial w^\beta}{\partial \beta} + \frac{\partial w^\gamma}{\partial \gamma} = 0 \quad (\text{баланс}) \sim \text{div} U = 0$$

3. Численная аппроксимация

Будем считать  $W$  (заданное поле) и  $w$  (искомое поле) заданными в узлах равномерной разностной сетки по  $\alpha$ ,  $\beta$  и  $\gamma$ . Функционал естественно аппроксимируется выражением

$$\Phi^h = \sum_{i,j,k} \frac{1}{2} [(W_{i,j,k}^\alpha - w_{i,j,k}^\alpha)^2 + (W_{i,j,k}^\beta - w_{i,j,k}^\beta)^2 + (W_{i,j,k}^\gamma - w_{i,j,k}^\gamma)^2]$$

при условиях:

$$\begin{aligned} & (w_{i+1,j,k}^\alpha + w_{i+1,j+1,k}^\alpha + w_{i+1,j,k+1}^\alpha + w_{i+1,j,k+1}^\alpha) - (w_{i,j,k}^\alpha + w_{i,j+1,k}^\alpha + w_{i,j,k+1}^\alpha + w_{i,j+1,k+1}^\alpha) + \\ & (w_{i,j+1,k}^\beta + w_{i+1,j+1,k}^\beta + w_{i+1,j+1,k+1}^\beta + w_{i,j+1,k+1}^\beta) - (w_{i,j,k}^\beta + w_{i+1,j,k}^\beta + w_{i+1,j,k+1}^\beta + w_{i,j,k+1}^\beta) + \\ & (w_{i+1,j,k+1}^\gamma + w_{i+1,j+1,k+1}^\gamma + w_{i,j,k+1}^\gamma + w_{i,j+1,k+1}^\gamma) - (w_{i+1,j,k}^\gamma + w_{i+1,j+1,k}^\gamma + w_{i,j,k}^\gamma + w_{i,j+1,k}^\gamma) = 0 \end{aligned}$$

Обозначим через шаблон  $\Pi_{i,j,k}$  узлы отдельной ячейки с локальной нумерацией

(i,j,k), 2- (i+1,j,k), 3- (i+1,j+1,k), 4- (i,j+1,k) – нижний слой и

5- (i,j,k+1), 6- (i+1,j,k+1), 7- (i+1,j+1,k+1), 8- (i,j+1,k+1) – верхний слой

Тогда условия нулевой дивергенции на шаблоне  $\Pi_{i,j,k}$  можно записать в виде:

$$4 \langle \text{div } w \rangle_{i,j,k} = w_{2,3,6,7}^\alpha - w_{1,4,5,8}^\alpha + w_{3,4,7,8}^\beta - w_{1,2,5,6}^\beta + w_{5,6,7,8}^\gamma - w_{1,2,3,4}^\gamma = 0;$$

где  $w_{i_1 i_2 i_3 i_4} = w_{i_1} + w_{i_2} + w_{i_3} + w_{i_4}$

Используя метод неопределенных множителей Лагранжа, поиск условного минимума функционала по переменным  $w$  заменяем на поиск безусловного минимума расширенного функционала по переменным  $w$  и  $\lambda$ :

$$\Phi^h = \sum_{i,j,k} \frac{1}{2} \left[ (W_{i,j,k}^\alpha - w_{i,j,k}^\alpha)^2 + (W_{i,j,k}^\beta - w_{i,j,k}^\beta)^2 + (W_{i,j,k}^\gamma - w_{i,j,k}^\gamma)^2 + \lambda_{i,j,k} \cdot \langle \text{div } w \rangle_{i,j,k} \right]$$

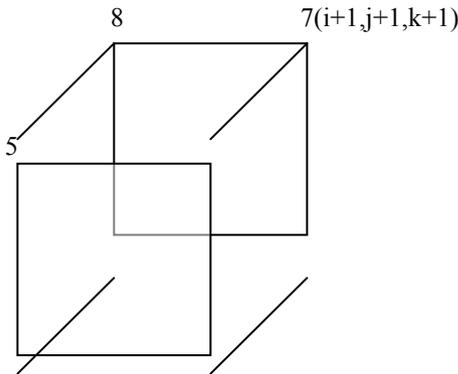


Рис.1 Шаблон ячейки  $\Pi_{i,j,k}$

Выпишем необходимые условия экстремума функционала

$$\frac{\partial \Phi^h}{\partial w_{i,j,k}^\alpha} = 0; \quad \frac{\partial \Phi^h}{\partial w_{i,j,k}^\beta} = 0; \quad \frac{\partial \Phi^h}{\partial w_{i,j,k}^\gamma} = 0; \quad \frac{\partial \Phi^h}{\partial \lambda_{i,j,k}} = 0;$$

или в безиндексной записи на шаблоне  $\Pi_{i,j,k}$  (шаблон  $\Pi_2$  – это шаблон  $\Pi_1$ , только вершины куба на рисунке относятся к центрам ячеек, а узел (i,j,k) расположен в центре куба)

$$w^\alpha = W^\alpha + \lambda_{2,3,6,7} - \lambda_{1,4,5,8}; \quad w^\beta = W^\beta + \lambda_{3,4,7,8} - \lambda_{1,2,5,6}; \quad w^\gamma = W^\gamma + \lambda_{5,6,7,8} - \lambda_{1,2,3,4}$$

Подставляя эти выражения в условия нулевой дивергенции, получим следующие уравнения для  $\lambda$  (выписанные также в локальной индексации на шаблоне  $\Pi_3$  из 27 ячеек, прилежащих к ячейке (i,j,k)):

$$24\lambda_0 + 4\lambda_{1,3,5,7,10,20} - 3\lambda_{12,14,16,18,22,24,26,28} - 2\lambda_{2,4,6,8,11,13,15,17,21,23,25,27} - 4 \langle \text{div } W \rangle = 0$$

Последняя система линейных уравнений решается методом верхней релаксации

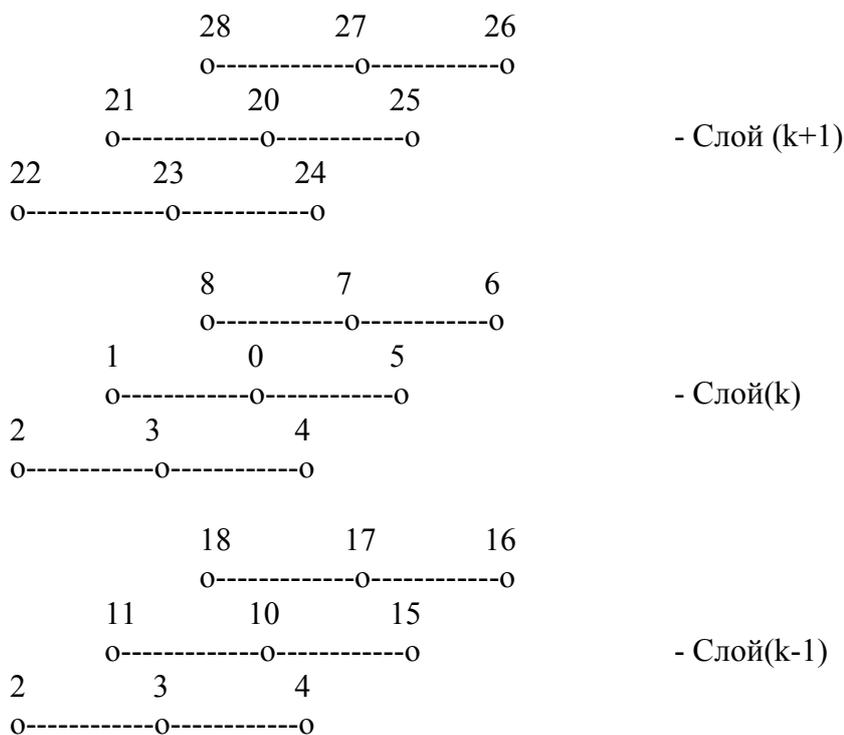


Рис. 3 Шаблон ШЗ<sub>ij,k</sub>

### Граничные условия

Без изменения результата минимизации можно в функционал добавить дополнительные члены с  $\lambda = 0$  по фиктивным ячейкам, прилегающим к области, тем самым сохранив вид уравнений для  $\lambda$  в боковых и верхних граничных ячейках области.

Минимизация расширенного функционала по скоростям  $w^\alpha$  и  $w^\beta$  осуществляется по всем узлам области, в то время как  $w^\gamma$  на нижней границе (т.е. при  $k=0$ ) известна и равна 0 (непротекание на поверхности земли). Это изменяет вид уравнения для нижнего слоя:

$$20\lambda_0 - 2\lambda_{21,23,25,27} + 2\lambda_{1,3,5,7} - 3\lambda_{2,4,6,8,22,24,26,28} + 4\lambda_{20} - 4 < div W > = 0$$

### Особенности алгоритма

Матрица = *const*, зависит лишь от числа узлов, потому можно обратить один раз (**Real Time**). Расчет скоростей сводится только к умножению на обратную матрицу и преобразования к контрвариантному базису и обратно.

## Лекция 10. Обратная задача. Мониторинг. Восстановление характеристик источника

### Постановка задачи

Имеем данные измерений.

$$F = F(\text{тип функции}, X, Y, Z, t)$$

- мощность внешней дозы (измеряет дозиметр)
- поверхностная концентрация (собирают пробы грунта и анализируют)
- объемная приземная концентрация (воздуходувки) с определением нуклидного состава

Имеем неопределенные параметры источника.

$$Q(G, t)$$

(Группа отвечает за взаимодействие с поверхностью – сухое выпадение и вымывание осадками.)

Для простоты рассмотрим «полку» активности - считаем источник постоянный в течение некоторого промежутка времени.

Имеем модель («Н») которая по параметрам источника определяет аналогичные данные, т.е. имеем

$$Q(G, t) \rightarrow "H" \rightarrow \tilde{F} = \tilde{F}(\text{тип функции}, X, Y, Z, t, Q)$$

Задача состоит в определении параметров  $Q$  из условия

$$Q: \min \|F - \tilde{F}\|$$

Проблемы:

- определение нормы (данные отличаются на порядки);
- плохая определенность матрицы при минимизации;
- нелинейные зависимости.

## Идея метода

Расчетная формула для активностей. В силу линейности по активности (нелинейность по высоте):

$$a_k = \sum_g A_{k,g}(h) q_g$$

$q_g, h$  – параметры источника

$A_{k,g}$  – матрица влияния.

В этой формуле все измерения, – в разных точках, разные функции, на разные времена, – равноправны.

Элементы матрицы влияния – посчитанные значения от единичного источника данной группы, т.е. задаем источник в каждой группе по 1 и определяем вклад в сумму по группам для данной измеряемой величины.

Минимизация среднеквадратичного отклонения.

$$S = \sum (a_k - \tilde{a}_k)^2 \cdot \rho_k$$

$$\rho_k = \frac{1}{r_k + a_k}$$

$a_k$  – расчет

$\tilde{a}_k$  – измерения

$r_k$  – расстояние от источника

уже нелинейность

$$Q: \min S$$

## Теория

$$z = \bar{P} \cdot \bar{a} \text{ нормировка!}$$

$$\bar{X} = \bar{P} \cdot \bar{A}$$

$$S = (z - Xq)^T (z - Xq)$$

$$P_{kk} = \rho_k$$

$$\min S :$$

$$X^T Xq = X^T z$$

$$\Omega = P^T P = P^2 \text{ нелинейность (итерации)}$$

$$q = (A^T \Omega A)^{-1} (A^T \Omega) a$$

## Свойства распределений

Предполагаем, что расчет дает несмещенную оценку с одинаковой дисперсией во всех точках (экспериментальный факт).

$$\{a_n\} = \{A_n\}q$$

$$a_n = Bq + \varphi_n$$

$$E\varphi_n = 0$$

$$D\varphi_n = \text{const}$$

эксперимент!

## Оценка точности

$$D = F(P) \cdot S$$

$P$  – вероятность

$F$  – распределение Фишера

## Алгоритм расчета

- сбор данных мониторинга
- расчет аналогичных данных
- определение параметров источника (итерации по предыдущему и данному пункту)

Схема простой итерации для решения уравнения  $x = F(x)$ .

$$a_k = a^0_k \Rightarrow P^0 \Rightarrow \Omega^0 \Rightarrow q^0 \Rightarrow a^1_k \Rightarrow \dots$$

Минимизация по высоте выброса – метод перебора.

Отображение результатов, оценка точности.

## Реализация в пакете

По сбору данных мониторинга.

Реализовано чтение файла стандартного формата системы АСКРО (отдельно описание пунктов измерений и функций, отдельно файла с сообщениями с данными измерений)

Фрагмент БД пунктов измерения – название, координаты, что меряет.

'1','1','1','1','Парнас, База АТЦ','60.0550003051758','30.3530006408691'

'1','2','1','1','Красное Село, 19-й мостоотряд','59.75','30.0669994354248'

Фрагмент стандартного сообщения системы АСКРО – с какого пункта, что измерено, когда, значение,...

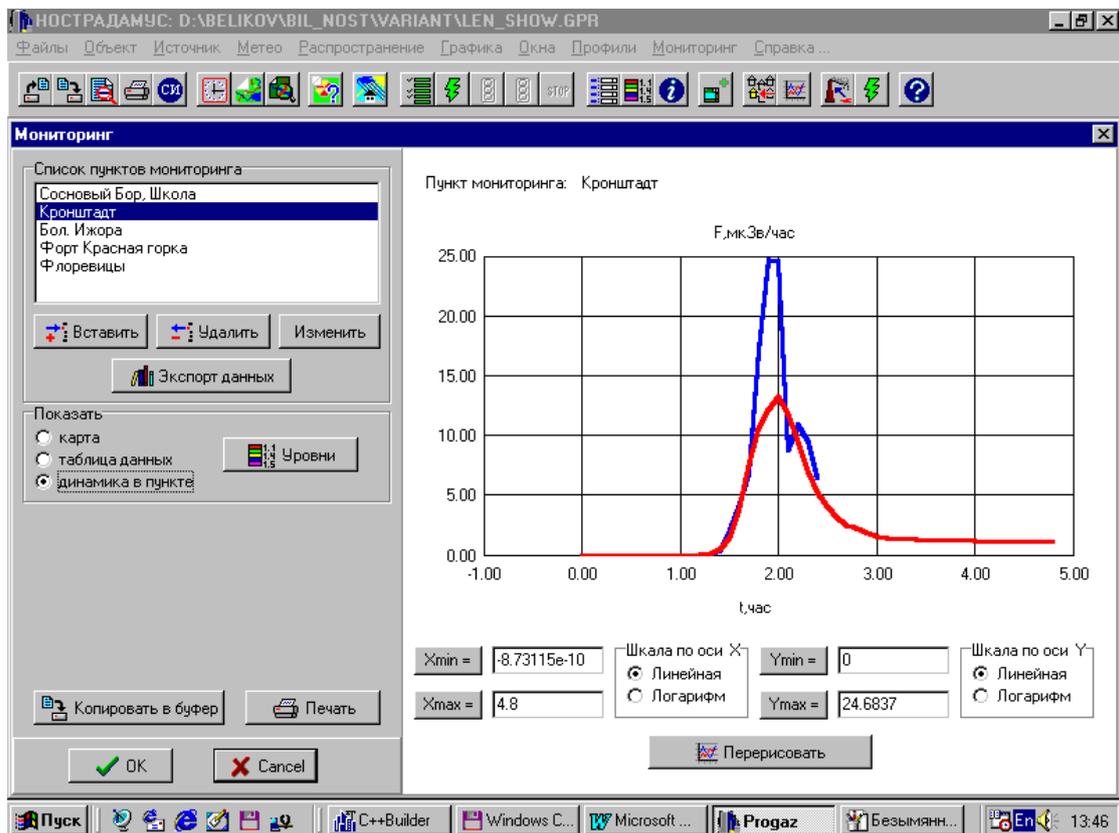
From: "ASKRO" <postmaster@askro.atom.nw.ru>  
To: boris@atom.nw.ru  
Date sent: Thu, 15 Jul 1999 12:57:16 SPb  
Subject: ASKRO\_1  
Priority: normal

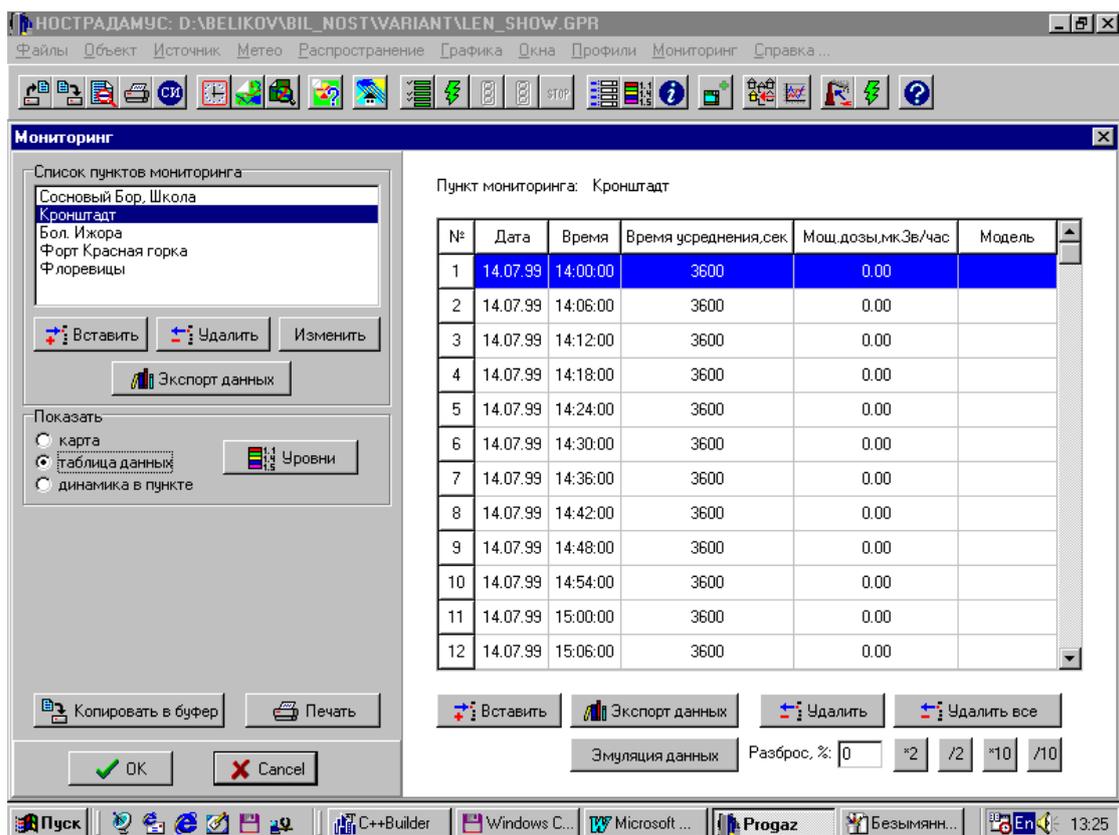
'1','1','1','1999.07.14 13:05','14.6','512S'

'1','1','1','1999.07.14 13:14','12.3','512S'

По отображению результатов.

Сделано графическое и табличное представление и сравнение результатов расчетов с измеренными данными.





## Лекция 11. Контрмероприятия на острой фазе радиационной аварии. Йодистая профилактика, укрытие, эвакуация. Модели риска. Оценка ущерба

### Возможности уменьшения полученных доз на острой фазе

- Йодистая профилактика (ингаляционная доза на щитовидную железу). Действует через 2 часа в течение суток, уменьшает дозу в 20 раз.
- Укрытие (все дозы). В зависимости от типа строения уменьшает дозы в 2-5 раз.
- Эвакуация (отселение). Сильно зависит от времени и пути.

### Уровни вмешательства

Разработаны документы (в том числе международные) по уровням вмешательства. Для наиболее значимых доз введены два уровня

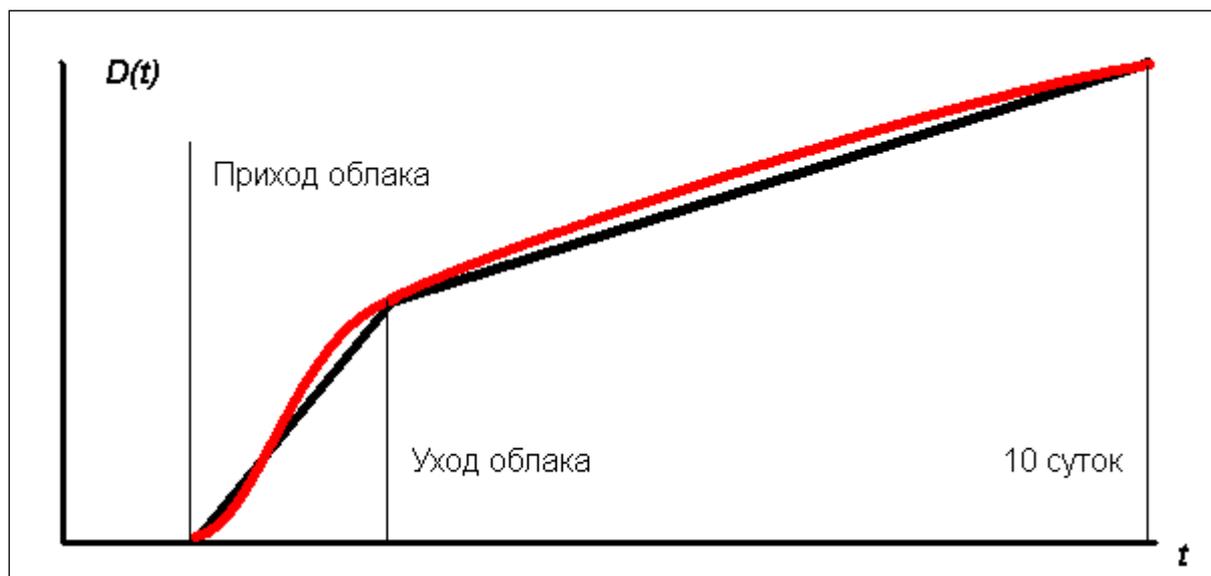
- возможного вмешательства (нижний уровень)
- обязательного вмешательства при превышении верхнего уровня.

### Аппроксимация временной зависимости доз в «Н»

В каждом пункте доза полная и щитовидная для детей представлены, как кусочно-линейные с заданием значений в узлах

- 0, приход облака
- уход облака

- 10 суток

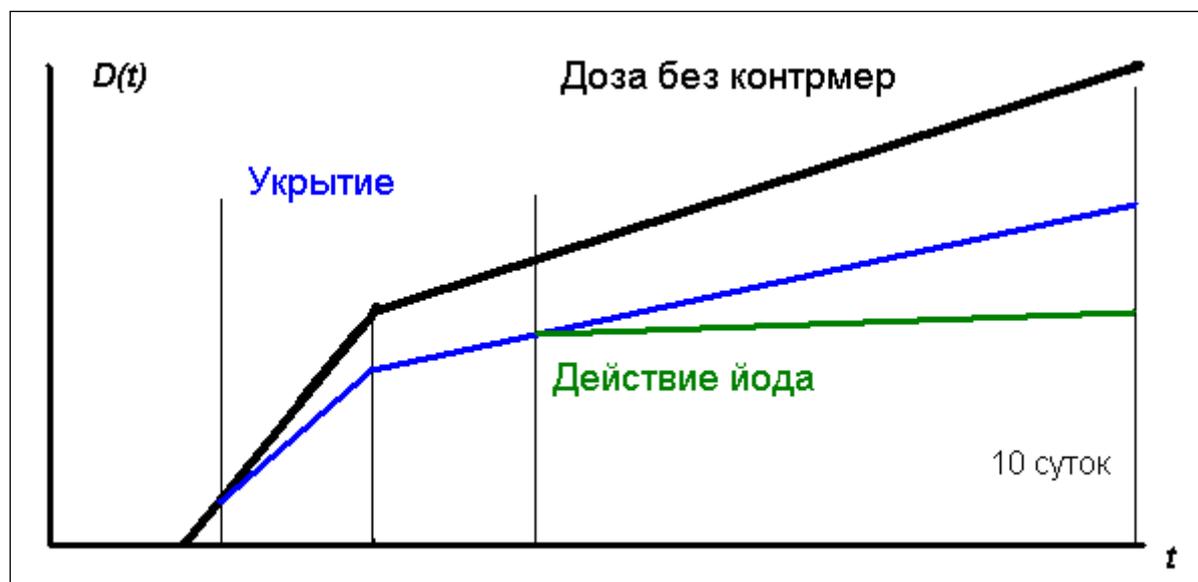


### Сценарий контрмероприятий

Для каждого населенного пункта сценарий содержит

- время приема йодных таблеток и их количество
- время начала и окончания укрытия, тип укрытия (или ослабление)
- время начала отселения или эвакуации, маршрут и скорость движения

### Ослабление доз при применении контрмероприятий



Доза при эвакуации – интеграл от мощности вдоль пути эвакуации:

$$D = \int_s P ds$$

Приближенный расчет - при расчете доз предполагается, что мощность дозы падает линейно до нуля во время эвакуации.

$$D_{evac} = (D_{start} + D_{end}) / 2$$

## **Режимы рекомендаций и анализа в пакете «Нострадамус»**

Режим рекомендаций – автоматическое создание наиболее приемлемого сценария для каждого (или для выбранного) населенного пункта. Имеются критерии уровней вмешательства и пробуются возможные мероприятия для выхода за нижний предел.

- а) Сначала пробуются обойтись йодной профилактикой, принятием таблеток за 2 часа до прихода облака.
- б) Если не получилось – то пробуются укрытие до прихода облака.
- в) Если критерии вновь не выполнены – то эвакуация.

Результаты рекомендаций печатаются для каждого пункта, где необходимо вмешательство (превышен нижний уровень вмешательства).

Режим анализа – эксперт отвечает за сценарий (меняет рекомендуемый). Система проводит перерасчет изменения доз и сравнивает с критериями.

## **Понятие о моделях риска и оценке ущерба (не реализовано в пакете)**

Риск рассчитывается как доля населения заболевших или умерших в зависимости от коллективной дозы (разработаны соответствующие модели, аддитивная и мультипликативная).

В настоящее время (за рубежом) разрабатываются модели для оценки ущерба. Используются средние цифры «стоимости жизни» для летальных исходов, стоимости лечения для заболевших, стоимости отселения и проживания, стоимости психологического стресса. В этом случае возможна оптимизация контрмероприятий по затратам.

## **Лекция 12. Модели непрерывных выбросов. Экологическое воздействие работающих станций**

### **Исходные данные**

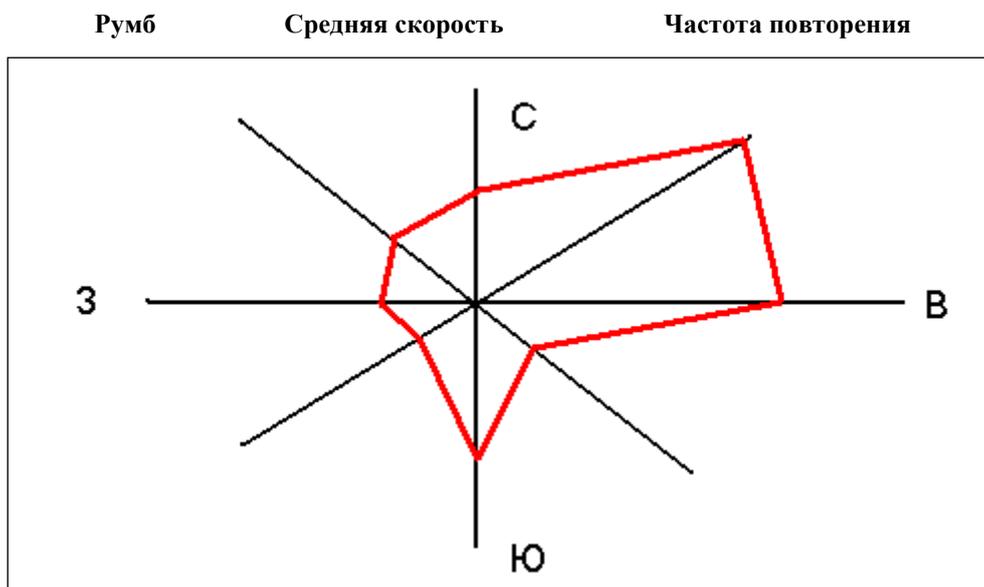
- а) модель расчета концентраций («Н»)
- б) данные по источнику
- в) погода

### **Простейшая модель**

Прикидочные или срочные расчеты - ручная реализация небольшого ввода с помощью диалогов.

Источник выброса задается единичный (далее можно умножать для расчета за нужный период времени).

Используется «роза ветров» из метеорологического справочника – многолетняя усредненная информация.



Вся эта информация заносится в метеосценарий.

Исключаются из выброса короткоживущие нуклиды.

Каждая временная фаза погоды задается достаточно длинной и временной выброс источника достаточно короткий, чтоб облака вылетели за область до расчета следующего угла выброса.

**Рассчитываются достаточное количество вариантов по углам (сценарий погоды), результаты автоматом умножаются на частоты повторения (заданием источника), и суммируются.**

### Уточненная модель

#### Описание метеорологии

Для получения средних концентраций и выпадений за определенный, достаточно продолжительный период времени использовались данные **реальных** метеонаблюдений на ближайшей метеостанции (для Рязанской ГРЭС – это м./ст. Старожилово). Метеоданные за каждый месяц наблюдаемого периода содержатся в отдельном файле и формат файла следующий.

Расшифровка таблицы данных восьмисрочных **стандартных** метеонаблюдений м/ст Старожилово

ПЕРВАЯ СТРОКА:

- 1) НОМЕР МЕТОДИКИ (1 - ПАСКУИЛА-ТЕРНЕРА + ПАСКУИЛА-УЛИГА;  
2 - ПАСКУИЛА-ТЕРНЕРА;  
3 - ПАСКУИЛА-УЛИГА)

2) КОЛИЧЕСТВО НАБЛЮДЕНИЙ

3) НОМЕР МЕСЯЦА

4) ГОД

ПОСЛЕДУЮЩИЕ СТРОКИ:

1) НАЧАЛЬНЫЙ СРОК НАБЛЮДЕНИЙ (ЧАС)

2) ЧИСЛО (ДАТА)

3) ТЕМПЕРАТУРА ВОЗДУХА (ДЕСЯТЫЕ ДОЛИ ГРАДУСА ЦЕЛЬСИЯ)

4) ВИДИМОСТЬ (ШИФР)

5) ОБЩАЯ ОБЛАЧНОСТЬ (БАЛЛЫ)

6) НИЖНЯЯ ОБЛАЧНОСТЬ (БАЛЛЫ)

7) НИЖНЯЯ ВЫСОТА ОБЛАКОВ (М)

8) ШИФР ПОГОДЫ

9) ШИФР ПОГОДЫ

**10) НАПРАВЛЕНИЕ ВЕТРА (ГРАДУСЫ)**

**11) СКОРОСТЬ ВЕТРА (М/С)**

**12) ОСАДКИ (ММ)**

Фрагмент файла за январь 1990 г. (M0190.dat) приведен ниже.

1 248 1 90

0 1	-26	84	10	10	310	2	2	250	7	0
0 2	-67	84	10	10	660	7	2	300	7	
0 3	-78	84	10			7	71	310	5	
0 4	-161	84					2	320	7	
0 5	-160	84					2	290	3	
0 6	-100	84	10			7	2	210	7	
0 7	-47	84	10	10	940	7	71	280	6	
0 8	-154	84					2	320	2	
0 9	-24	84	10	10	470	2	2	225	4	
0 10	-16	84	10			2	2	270	4	
0 11	-13	84	8	8	910	7	2	280	6	
0 12	-7	50	10			7	71	180	1	
0 13	-243	84				3	2	290	5	
0 14	-233	84					2	310	6	
0 15	-212	84	10	10	290	2	2	80	1	
0 16	-161	59	10	10	340	7	71	140	3	
0 17	-59	62	10	10	160	2	2	120	4	
0 18	-59	84	10	10	320	2	2	190	2	
0 19	20	84	6			1	2	230	5	
0 20	1	84	10			2	2	230	6	
0 21	-35	84	10	10	1400	1	2	185	3	
0 22	-6	84	10			2	2	170	3	
0 23	-24	56	10	10	210	7	71	200	1	
0 24	-207	84					2	160	2	
0 25	-16	57	10	10	170	7	10	175	6	
0 26	2	22	10	10	100	7	73	200	6	
0 27	17	84	10	10	380	2	2	170	10	
0 28	9	84	10			2	2	210	3	
0 29	-14	69	4	4	800	1	2	210	2	
0 30	-16	84	10			2	2	180	5	
0 31	-22	84	10	10	220	7	2	150	4	
3 1	-49	84	10	10	200	2	2	250	8	
3 2	-67	84	10	10	340	7	71	270	5	

... и т.д.

### Определение эффективной высоты выброса

Для единичного выброса – высота определяется пользователем, для вариантных расчетов используется специальная модель.

Высота подъема определяется суммой гидродинамического и теплового подъема.

Высота гидродинамического подъема не зависит от устойчивости атмосферы и определяется формулой:

$$H_{GD} = 1.5 \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^{0.62} \frac{v_s d}{v_h}$$

В этой формуле:

$T_a$  – температура окружающего воздуха,

$T_s$  – температура истекающих из трубы газов,

$d$  – диаметр трубы,

$v_h$  – скорость ветра на высоте трубы,

$v_s$  – скорость истекающих газов.

Для неустойчивых ситуаций тепловой подъем определяется формулой:

$$H_Q = \frac{0.115 g (T_s - T_a) d^2 \sqrt{v_s} \left( \frac{T_a}{T_s} \right)^{0.25}}{\epsilon_y(s) \epsilon_z(s) T_a v_h^{2.5}}$$

где

$g$  – ускорение свободного падения,

$s$  – класс устойчивости

$\epsilon_y, \epsilon_z$  – параметры турбулентности атмосферы, определяются в соответствии с таблицей:

Класс устойчивости $s$	A	B	C
$\epsilon_y(s)$	0.2	0.16	0.12
$\epsilon_z(s)$	0.12	0.1	0.07

Для нейтральной стратификации используется формула:

$$H_Q = 27.6 \cdot Ar \cdot J^{1.25} \cdot d$$

$$Ar = \frac{g(T_s - T_a)d}{T_a v_s^2}$$

$$J = \frac{\rho_s v_s^2}{\rho_a v_h^2}$$

$\rho_a, \rho_s$  – плотности окружающего воздуха и истекающих газов (в расчетах считаются равными).

Для устойчивых ситуаций применяется формула:

$$H_Q = \frac{27.6 \cdot Ar \cdot J^{1.25} \cdot d \cdot \exp(1.16\chi)}{1 - 1.709\chi^{0.33} + 3.035\chi^{0.25}}$$

$$\chi = \frac{\left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right)}{v_h^2}, \quad \left(\frac{\partial\theta}{\partial z}\right) = 0.004 \text{ } ^\circ K/m.$$

Как уже указывалось, величина начального подъема равна сумме гидродинамического и теплового подъемов:

$$H = H_{GD} + H_Q$$

#### А. Дискретизация по направлениям ветра, окружающей температуре, классу устойчивости, осадкам

Общее число вариантов, которые необходимо просчитать даже для периода в один год составляет порядка 3000. Расчетное время даже для достаточно быстрых алгебраических методик, типа гауссовых, достаточно велико. Вместе с тем зависимости от некоторых параметров (например, температуры окружающего воздуха) достаточно слабы. С другой стороны, варианты, отличающиеся только направлением ветра (румбом), не имеет смысла пересчитывать – достаточно сосчитать одно направление и результаты наложить с поворотом для учета всех направлений.

Учитывая вышесказанное, разработан специальный алгоритм для уменьшения числа рассчитываемых вариантов. Для этого каждый из определяющих параметров (класс устойчивости, скорость ветра, температура воздуха и осадки) разделялся на несколько интервалов и параметр внутри данного интервала приравнялся к среднему значению интервала. Например, температура воздуха считалась равной  $-10^\circ C$ , если в исходных файлах она была меньше  $-5^\circ C$ , равной нулю для диапазона от  $-5^\circ C$  до  $+5^\circ C$ , и равной  $+10^\circ C$  для остальных вариантов. Конечно, выбор интервалов для каждой величины определялся эмпирически из компромисса точность – расчетное время. Это позволило на порядок уменьшить число расчетных вариантов (для периода от месяца до года). При дальнейшем увеличении периода осреднения число вариантов перестает расти.

Пусть  $c(r, \varphi)$ ,  $e(r, \varphi)$  – концентрация и выпадения для одного набора исходных данных (класса устойчивости, скорости ветра, температуры воздуха и осадков) и для фиксированного направления ветра ( $\varphi_0=45^\circ$ ). Пусть  $R_k$  определяет повторяемость этого набора для разных направлений (румбов)  $\varphi_k$ . Изменение средних концентраций  $C(r, \varphi)$  и выпадений  $E(r, \varphi)$  за период времени от  $T$  до  $T + (\sum R_k)\Delta T$  определяется по формулам:

$$\hat{C}(r, \varphi) = \frac{C(r, \varphi) \cdot T + \sum_k c(r, \varphi + \varphi_k - \varphi_0) \cdot R_k \cdot \Delta T}{T + \sum_k R_k \cdot \Delta T}$$

$$\hat{E}(r, \varphi) = E(r, \varphi) + \sum_k e(r, \varphi + \varphi_k - \varphi_0) \cdot R_k$$

#### В. Свертка по углу - окончательное определение концентраций и выпадений

Направления ветра в исходных метеофайлах определено с точностью до румба – юг, юго-восток, восток и т.д. (45 градусов), что часто много шире горизонтальных размеров следа, поэтому для получения средних концентраций стандартной считается процедура свертки по углу. Эта процедура применяется как для средних концентраций, так и для выпадений.

Пусть  $f(r, \varphi)$  – несглаженная функция - «роза». Сглаженная функция  $F(r, \varphi)$  определяется, как свертка исходной, с ядром, линейно спадающим от единицы до нуля, при изменении угла от нуля до  $\pm 45^\circ$ .

$$F(r, \varphi) = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (1 - \alpha_k) [f(r, \varphi + \alpha_k \cdot \Delta\varphi_0) + f(r, \varphi - \alpha_k \cdot \Delta\varphi_0)]$$

$$\alpha_k = \frac{(k - 0.5)}{N}, \quad \Delta\varphi_0 = \pi / 4.$$

Отметим, что операция свертки (и предложенная разностная аппроксимация) сохраняют интеграл по области. Если исходные распределения имеют ярко выраженные максимумы по углу (при ширине следа от варианта - меньше румба), то свертка приводит и к уменьшению максимума функции.

### С. Определение санитарной зоны

Если имеется набор из  $M$  опасных веществ с  $d_m$  – долями в выбросе и  $p_m$  – предельно допустимыми концентрациями, то можно определить функцию

$$P(r, \varphi) = C(r, \varphi) \cdot \sum_{m=1}^M \frac{d_m}{p_m}$$

используемую, согласно нормативной методике для определения санитарной зоны. Для одного вещества эта функция равна единице, где концентрация достигает предельно допустимую, двойке - где концентрация равна двум предельным и т.д. Согласно нормативной методике, радиус санитарной зоны определяется как расстояние, равное удвоенному расстоянию, при котором концентрация достигает 0.8 от предельно допустимой, т.е. определяется единичным значением функции:

$$\hat{P}(r, \varphi) = P(r/2, \varphi) / 0.8$$

При определении опасной зоны при аварийных выбросах рассматривается не среднегодовая концентрация, определяемая согласно описанной выше процедуре, а максимальная концентрация. При этом применяется не свертка концентрации, а сглаживание:

$$C^{\max}(r, \varphi) = \sum_{k=1}^N (1 - \alpha_k) [C(r, \varphi + \alpha_k \cdot \Delta\varphi_0) + C(r, \varphi - \alpha_k \cdot \Delta\varphi_0)]$$
$$\alpha_k = (k - 0.5) / N, \quad \Delta\varphi_0 = \pi / 4.$$

Реальная метеоинформация при этом рассматривается как аппроксимация функции распределения при вероятном выбросе.

### Определение концентраций и выпадений в модуле «Прогноз»

Ниже описаны основные шаги определения средних концентраций и суммарных выпадений и выполненные модификации системы «Нострадамус».

1. Обработываются файлы метеоданных для уменьшения числа рассчитываемых вариантов. Выполняется дискретизация основных параметров, определяющих процесс дисперсии в атмосфере - класса устойчивости, скорости ветра, температуры воздуха и осадков. При этом значения этих параметров внутри наперед заданных интервалов приравнивался к среднему значению интервала (более подробно процедура описана в п. А).
2. Организуется цикл по вариантам. Для каждого варианта просматриваются все метеозаписи во всех файлах и определяется сколько раз встречается такой вариант по каждому румбу направления (определяются частоты по румбам  $R_k$  в п. В).
3. При определенных таким образом классе устойчивости, скорости ветра, температуре воздуха и осадкам производится моделирование переноса в атмосфере и расчета выпадений при заранее заданном направлении. При этом выброс делается залповым (длительность много меньше интервала метеоданных 3 часов), а средняя концентрация определяется как рассчитанная в прогнозе интегральная концентрация, поделенная на интервал метеоданных.
4. В соответствии с частотами по румбам  $R_k$  рассчитанные распределения поворачиваются до нужного направления. Концентрации и выпадения модифицируются согласно формулам п. А.
5. Определяется следующий необработанный вариант метеоданных и повторяются пункты 2,3,4, пока не исчерпаются все варианты.
6. К полученным «розам» концентраций и выпадений применяется операция свертки – рассчитываются средние по углу и за период моделирования приземные концентрации и суммарные выпадения. Формулы свертки приведены в п. В.
7. Заканчивается расчет определением санитарной зоны согласно формулам п. С.

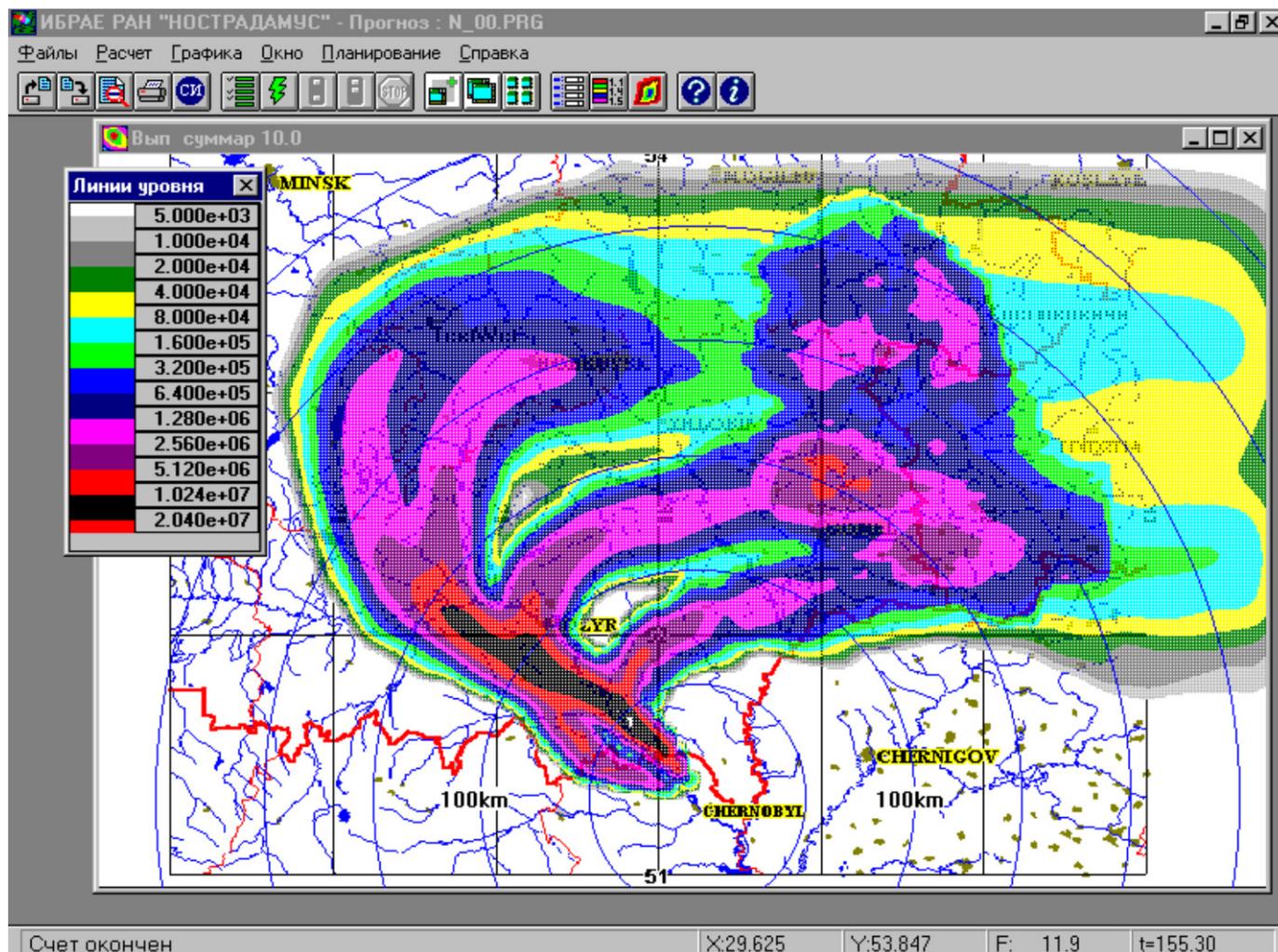
## Лекция 13. Практическое участие системы «Нострадамус» в проектах. Аварийное реагирование. Чернобыльский след. Рязанская ГРЭС. RealTime модель (Игналинская АЭС)

### Чернобыльский след

Определялся сценарий источника и погоды в течение нескольких суток..

Результаты расчета – выпадения по I-131 и Cs-67 сравнивались с результатами измерений.

Основной вывод – удовлетворительное согласие при неполноте данных, несмещенность расчетов (равенство средних по ансамблю).

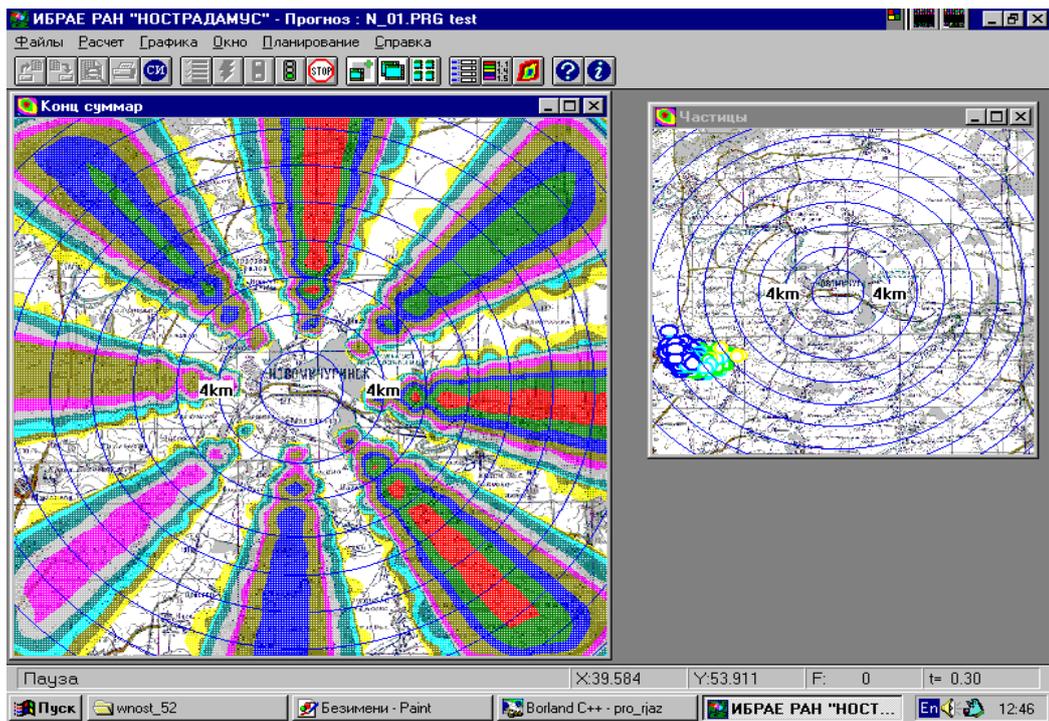


*Чернобыль. Плотность выпадений I-131 на 10 мая 1986 г.*

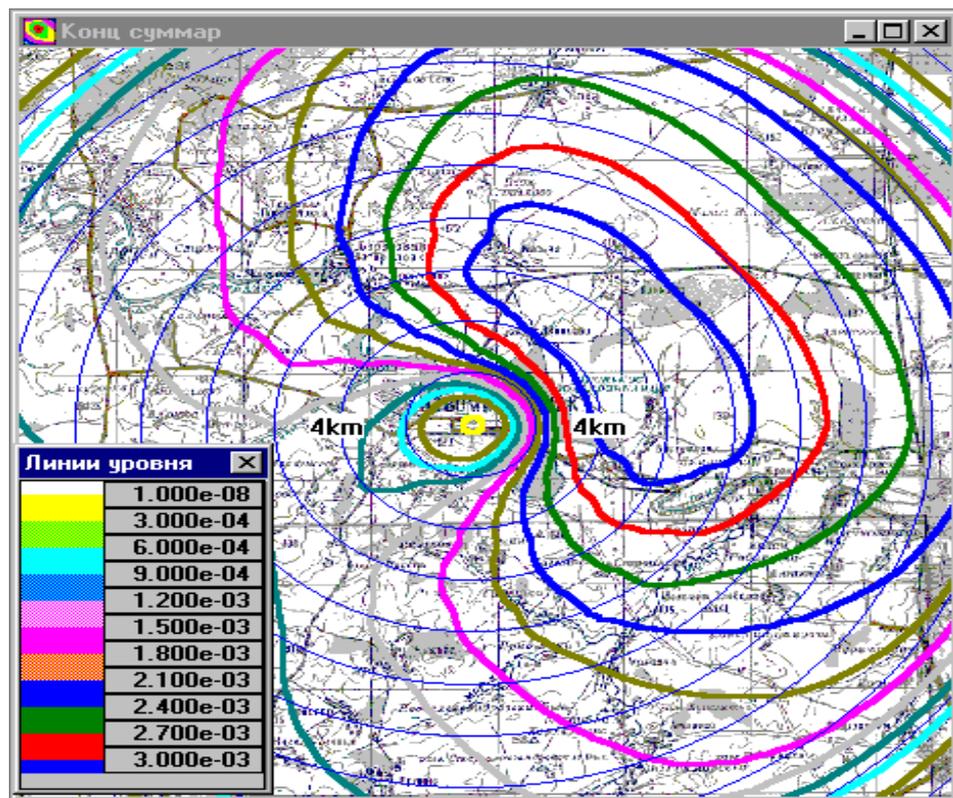
### Рязанская ГРЭС

Этот вариант рассчитывался как образец экологического расчета за длительный период времени с использованием реальной метеорологии. Выброс – полидисперсный (разные фракции – разные свойства выпадений).

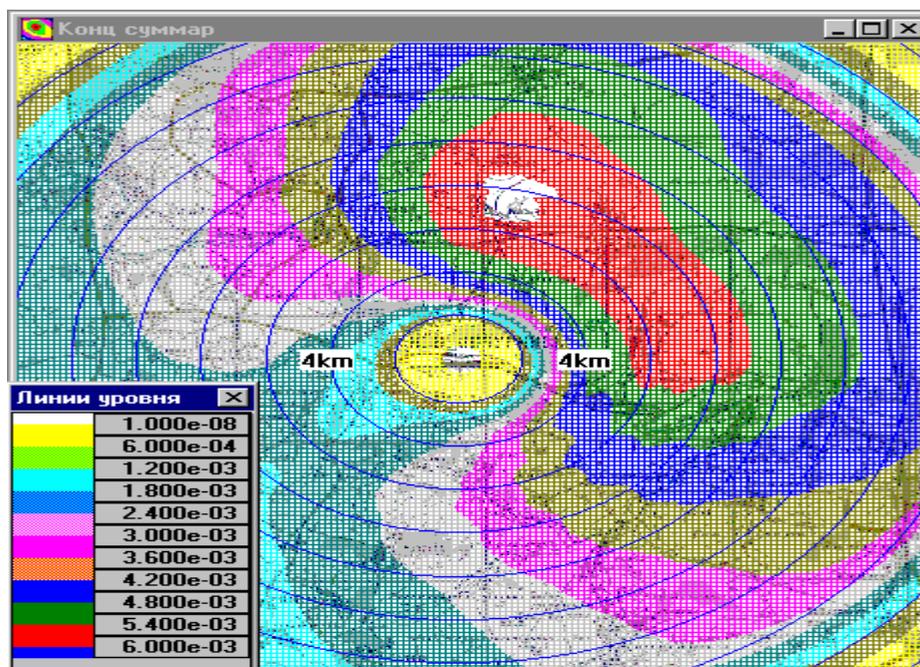
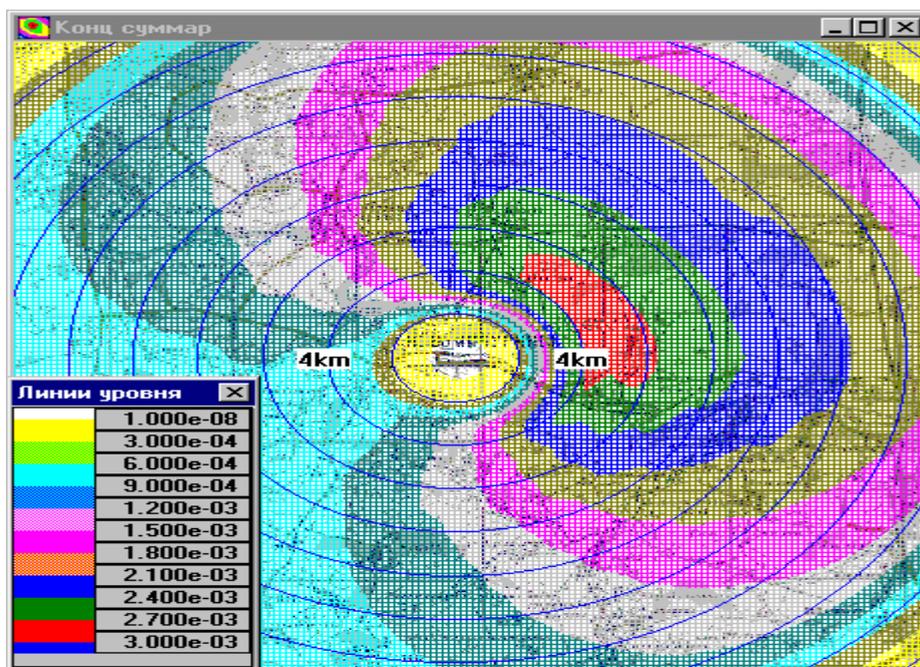
Демонстрирует использование системы для нерадиоактивных выбросов.



Рязанская ГРЭС. «Роза» концентраций и след облака в модуле «Прогноз»



Рязанская ГРЭС. Приземные концентрации при учете полидисперсности



Рязанская ГРЭС. Приземные концентрации для различных фракций

### RealTime модель (Игналинская АЭС)

Установлено как штатное средство расчета доз и выпадений.

- с датчиков данные в БД
- «Н» берет данные через запрос из БД каждые 15 мин.
- запуск с 15 мин скважностью прогноза, накопление выпадений
- результаты расчета – в БД

## Лекция 14. Расчет и анализ варианта выброса

Практикум по работе с пакетом в кризисном центре.

### Вопросы по курсу

Всем знать общий сценарий выброса. Ответ начинать с него. Далее более подробно осветить часть этого сценария, сформулированного в следующих вопросах.

1. Начальная стадия выброса. Стационарная модель «Пожар». Уравнения баланса. Вовлечение. Стационарный профиль температуры. Потенциальная температура. Малые отклонения. Устойчивость атмосферы. Частота Брандта- Вайселя.
2. Уравнение атмосферного переноса. Адвекция, диффузия. Стохастический подход. Вывод уравнения адвекции-диффузии из стохастического подхода. Метод блуждающих облаков.
3. Расчет приземных концентраций и выпадений в методе облаков. Сухие и влажные потери. Монотонность. Консервативность.
4. Радиоактивный распад. Цепочки, разветвления. Расчет распада для простой цепочки. Распад после прохождения облака – долговременные последствия.
5. Пути облучения. Целевые функции. Расчет доз и выпадений. Полубесконечная и уточненная дозиметрические модели.
6. Обратная задача. Мониторинг. Восстановление источника.
7. Контрмероприятия на острой фазе радиологической аварии. Йодистая профилактика, укрытие, эвакуация. Возможный и обязательный критерии вмешательства.

### Литература

1. Арутюнян Р.В. Беликова Г.В. Головизнин В.М. Киселев В.П. Семенов В.Н. Сорокикова О.С. Стародубцева Л.П. Фокин А.Л. Компьютерная система «Нострадамус» для поддержки принятия решений при аварийных выбросах на радиационно опасных объектах. Известия Академии наук, сер. Энергетика, №4, 1995, стр. 19-31.
2. Арутюнян Р.В. Беликова Г.В. Головизнин В.М. Семенов В.Н. Сорокикова О.С. Стародубцева Л.П. Фокин А.Л. Новые эффективные численные методики моделирования процессов распространения радионуклидов в атмосфере и их практическое использование. Известия Академии наук, сер. Энергетика, №4, 1995, стр. 31-45.
3. Справочник. Атмосфера. –Л.: Гидрометеиздат. 1991.
4. Методика расчета концентраций в атмосферном воздухе вредных веществ, содержащихся в выбросах предприятий // (ОНД-86).- Л. Гидрометеиздат, 1987, 94стр.
5. Общие положения безопасности АЭС. Методы расчета распространения радиоактивных веществ с АЭС и облучения окружающего населения. // Безопасность в атомной энергетике: Нормативно- технический документ 38.220.56-84. М.: Энергоиздат. 1984, т.1, ч.1, 52с.
6. Верификационный отчет – там полный список ссылок.