

В статье дано описание версии гидродинамической модели, методика определения коэффициентов вертикальной и горизонтальной турбулентности для расчетов переноса примесей в атмосфере.

Дана оценка прогностического ветра в сравнении с эталонным экспериментом, в котором использовались величины наблюдавшегося ветра, с целью выбора оптимальных начальных и краевых условий для расчета концентраций примесей, а также оптимального набора методов параметризации физических процессов.

**К.Г. Рубинштейн<sup>1</sup>, Е.В. Набокова<sup>1</sup>, Р.Ю. Игнатов<sup>1</sup>,  
М.М. Смирнова<sup>1</sup>, Р.В. Арутюнян<sup>2</sup>, В.Н. Семенов<sup>2</sup>,  
О.С. Сороковикова<sup>2</sup>, А.В. Фокин<sup>2</sup>**

## **ВЛИЯНИЕ МЕТОДОВ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ПРОЦЕССОВ В ПОГРАНИЧНОМ СЛОЕ В МОДЕЛИ WRF НА ПРОГНОЗ ВЕТРА И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ РАСПРОСТРАНЕНИЯ ПРИМЕСЕЙ**

### **Введение**

В настоящей статье предпринята попытка использования региональной гидродинамической модели WRF (Weather Research and Forecasting Model), [[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get\\_source2.html](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/download/get_source2.html)], версии 3.1 для испытания, настройки и развития модели переноса примесей в атмосфере из пакета «НОСТРАДА-МУС» [1].

Одной из важнейших задач работы является определение оптимального набора методов параметризации физических процессов, прежде всего описание процессов в планетарном пограничном слое в региональной гидродинамической модели прогноза погоды.

Эксперименты с трассерами, с помощью которых проводилась валидация моделей переноса примесей, были организованы в течение 1983–1985 гг. вблизи г. Карлсруэ (Германия) [1]. Было проведено четыре запуска трассеров с фиксированным источником и измерениями концентрации в атмосфере на определенных расстояниях.

### **1. Версия 3.1 гидродинамической прогностической модели**

Версия 3.1 региональной негидростатической модели WRF была создана специально для прогнозов по региону Южной Германии (Карлсруэ). В данном регионе весьма сложный рельеф местности, этим была обусловлена необходимость высокого пространственного разрешения в модели – 2 км.

В версии модели используется 25 слоев в атмосфере от поверхности земли до нижней стратосферы, из них 15 слоев расположены в пограничном слое атмосферы.

Шаг интегрирования по времени составляет 10 секунд.

На рис. 1 показан рельеф местности и область прогнозов. Крестиком обозначен центр прогностической области – источник трассеров (мачта) располагался в точке с координатами 49,05° с.ш. и 8,39° в.д. На рисунке показано расположение измерительной сети концентрации газа в Карлсруэ (башни) во время натурных экспериментов (рис. 1 б).

В качестве начальных и краевых условий для модели использовались три набора данных:

- реанализ NCAR/DOE (США) [7] с пространственным разрешением 2,5° на 18 изобарических поверхностях от 1000 до 10 гПа;
- реанализ ECMWF [4] с пространственным разрешением 2,5° на 23 изобарических поверхностях от 1000 до 10 гПа;
- реанализ JMA (Япония) [8] с пространственным разрешением 1,25° на 25 уровнях от 1000 до 10 гПа.

<sup>1</sup> ГУ «Гидрометцентр России».  
<sup>2</sup> ИБРАЭ РАН.

## 2. Используемые методы параметризации физических процессов в приземном и пограничном слоях

В рамках модели WRF имеется обширная библиотека процедур, описывающих физические процессы в пограничном слое, на подстилающей поверхности и в почве. Наличие различных процедур для описания одних и тех же физических процессов дает возможность подобрать комбинацию, наилучшим образом описывающую физические процессы в атмосфере с учетом местных условий и заданных пространственных масштабов.

Так как источник трассеров находился на небольшой высоте, перенос примеси протекал в приземном и пограничном слоях атмосферы. В ходе экспериментов выяснилось, что описание процессов в почве заметно влияет на результаты. Поэтому были проведены эксперименты с использованием в гидродинамической модели различных методов описания процессов в приземном и планетарном пограничном слоях (ППС), на поверхности и внутри почвы.

Методы параметризации других физических процессов в экспериментах не менялись. Параметризация конвекции в данной версии не использовалась. Предполагалось, что модель с таким пространственным разрешением явно воспроизводит конвекцию.

### Методы параметризации процессов в почве

1. Метод параметризации процессов в почве, обозначаемый «LSM» [3]. Позволяет прогнозировать влагу и температуру в четырех слоях почвы толщиной 10, 30, 60 и 100 см, а также водный эквивалент и толщину снега. Включены процессы формирования поверхностного и внутрипочвенного стоков.

2. Метод параметризации Pleim-Xiu, изложенный в работе [10]. В почве расчеты ведутся для двух слоев: поверхностного слоя толщиной 1 см и для зоны корней толщиной до 1 м. Для каждого слоя решаются prognostические уравнения теплопроводности и переноса влажности в почве, а также уравнение переноса влаги растительностью. В поверхностном слое почвы время релаксации процессов составляет сутки, а в метровом слое — 10 дней. Испарение представлено суммой испарения из поверхностного слоя почвы и испарения влаги, перехваченной растительностью.

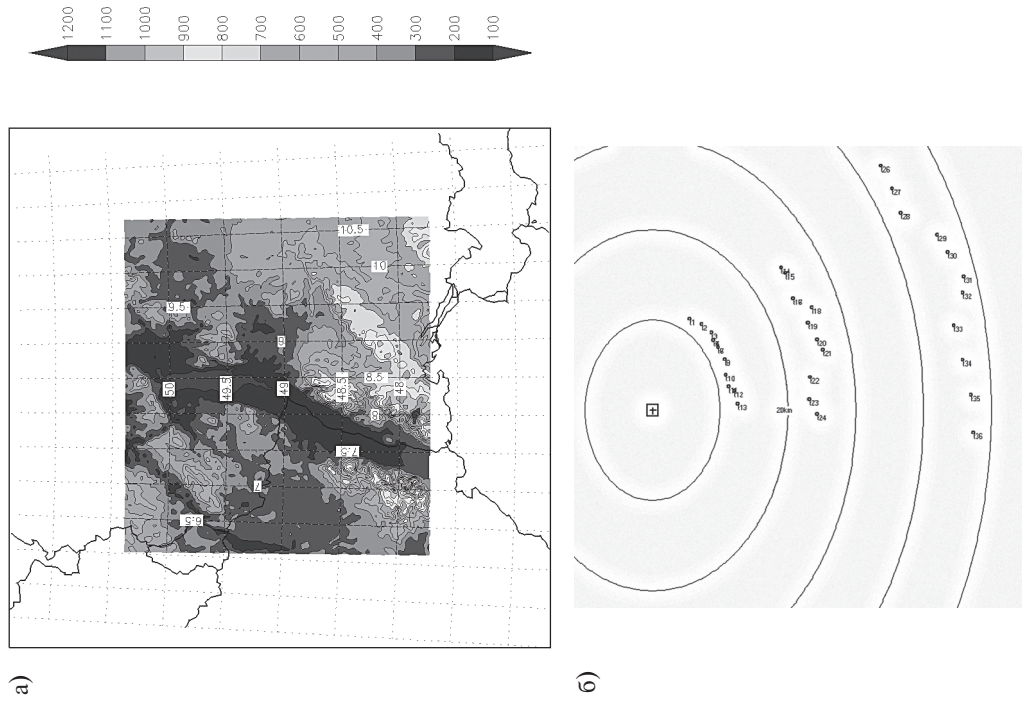


Рис. 1. Рельеф местности, м (а), и область прогноза (б) в регионе полигона в г. Карлсруэ, Германия

## Методы параметризации процессов в приземном слое

Численные эксперименты проводились для двух не очень сильно отличающихся методов параметризации приземного слоя.

1. Метод параметризации приземного слоя, базирующийся на теории подобия. При расчетах коэффициентов обмена для потоков тепла, влаги и количества движений использованы методы из работы [5]. Для реалистичного описания приземных потоков тепла и влаги рассчитывается конвективная скорость по [2]. Над водной поверхностью соотношение между параметром шероховатости и скоростью трения получается из формулы Чарнока. Выделяется четыре режима устойчивости по Жангу и Энтесу [11].

2. Модель приземного слоя «Eta», которая базируется также на теории подобия, но имеет некоторые отличия от первой, включает в себя параметризацию вязкого подслоя. Над водной поверхностью вязкий подслей описывается явно по Яничу [5]. Над сушей влияние вязкого подслоя учитывается путем введения переменной шероховатости при расчете потоков тепла и влаги в соответствии с методикой Зилитинкевича [12]. Потоки на поверхности описываются итерационным методом.

## Методы описания процессов в планетарном пограничном слое

1. Метод параметризации ППС описан подробно в [5, 6]. Разработан для модели среднесрочного прогноза NCEP. Относится к классу так называемых нелокальных диффузионных схем. На ее основе определялись коэффициенты вертикальной и горизонтальной турбулентности для расчетов турбулентного переноса трассеров.

2. Модель ППС Мелора–Ямады–Янича [11, 12]. Представляет собой вариант замыкания турбулентности уровня 2,5 для полного диапозона атмосферной турбулентности.

## Расчет коэффициента вертикального турбулентного обмена

Схема замыкания в методе параметризации [5, 6] построена на решении уравнения:

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[ K_c \left( \frac{\partial C}{\partial z} - \gamma_c \right) - \overline{(w'c')_h} \left( \frac{z}{h} \right)^3 \right].$$

Здесь  $C$  — прогностическая переменная ( $u, v, \theta, q$ );  $K_c$  — соответствующий коэффициент турбулентности;  $\gamma_c$  — поправка к локальному вертикальному градиенту переменной, учитывает вклад в общий поток от крупных горизонтальных вихрей;  $z$  — высота над поверхностью;  $h$  — высота пограничного слоя;  $\overline{(w'c')_h}$  — средний поток в слое инверсии.

Член  $-\overline{(w'c')_h} \left( \frac{z}{h} \right)^3$  описывает эффект вовлечения на верхней границе ППС, который предполагается пропорциональным силе плавуности в приземном слое. Высота ППС определяется как высота, на которой существует минимальный поток в слое инверсии.

Коэффициент вертикального турбулентного обмена в ППС  $K_{zm}$  для количества движения записывается в виде

$$K_{zm} = \kappa w_s z (1 - z/h)^p.$$

Здесь  $p=2$  — константа, определяющая форму профиля;  $\kappa=0,4$  — постоянная Кармана.

Вертикальная скорость в приземном слое  $w_s$  представлена выражением

$$w_s = \left( u_*^3 + \varphi_m \kappa w_*^3 z / h \right)^{1/3},$$

где  $u_*$  — приземная скорость трения;  $w_*$  — вертикальная скорость конвекции;  $\varphi_m = 8$  — константа.

В свободной атмосфере коэффициент турбулентности для момента количества движения имеет вид:

$$K_{m,t} = l^2 f_{m,t} (Rig) \left( \frac{\partial U}{\partial z} \right).$$

Для расчета числа Ричардсона  $Rig$  в безоблачном слое используется выражение

$$Rig = \frac{g}{\theta_v} \left[ \frac{\partial \theta_v / \partial z}{(\partial U / \partial z)^2} \right],$$

а в облачном слое:

$$Rig_c = \left( 1 + \frac{L_v q_v}{R_d T} \right) \left[ Rig - \frac{g^2}{|\partial U / \partial z|^2} \frac{1}{C_p T} (1 + A) \right],$$

где  $A = L_v^2 q_v / C_p R_v T^2$  и  $B = L_v q_v / R_d T$ ;  $R_d$  – газовая постоянная для сухого воздуха;  $R_v$  – газовая постоянная для влажного воздуха.

$$\text{Масштаб длины} \quad \frac{1}{l} = \frac{1}{kz} + \frac{1}{\lambda_0}, \quad \lambda_0 = 30 \text{ м.}$$

$$\text{При устойчивых условиях (Rig > 0)} \quad f_r(\text{Rig}) = \frac{1}{(1 + 5\text{Rig})^2}$$

$$\text{При неустойчивых условиях (Rig < 0)} \quad f_m(\text{Rig}) = 1 - \frac{8\text{Rig}}{(1 + 1,746\sqrt{-\text{Rig}})}$$

### Расчет коэффициента горизонтального турбулентного обмена

Расчет коэффициента горизонтального турбулентного обмена  $K_h$  проводится в соответствии с методикой Смагоринского, где коэффициент принимается пропорциональным горизонтальной деформации, с использованием замыкания первого порядка в соответствии с уравнением:

$$K_h = C_s^2 l^2 \left[ 0,25(D_{11} - D_{22})^2 + D_{12}^2 \right]^{1/2}$$

Здесь  $D_{11}$ ,  $D_{22}$  и  $D_{12}$  – компоненты тензора деформации;  $l = (\Delta x \Delta y)^{1/2}$  – масштаб длины;  $C_s = 0,25$ . Для переноса скаляров рассчитанное значение  $K_h$  для количества движения делится на турбулентный аналог числа Прандтля.

## 3. Описание экспериментов

### 3.1. Описание натурных экспериментов

Серия из четырех мезомасштабных натурных экспериментов по распространению трассеров была проведена в Германии, вблизи Карлсруэ, в апреле 1983 года, в марте 1984 года и два эксперимента – в марте 1985 года.

Во всех экспериментах источник газа помещался на мачту 100–150 м. Эмиссия газа производилась в течение восьми временных интервалов по 30 минут.

Концентрация газа в атмосфере измерялась в пунктах, расположенных на расстоянии 10–70 км друг от друга на трех дугах с радиусами

10–12, 20–23 и 43–49 км (рис. 1б). В третьем эксперименте вторая и третья дуги имели радиусы 30–33 и 52–69 км. В пунктах располагались переносные измерительные станции, которые в течение 3–5 часов в каждом эксперименте измеряли концентрацию трассеров у поверхности, усредненную за получасовые промежутки времени. Всего в одном натурном эксперименте было использовано от 20 до 50 станций.

Пробы воздуха набирались в течение 30 минут. Приближенно можно считать, что измеренные величины представляли собой приземную концентрацию трассеров, усредненную за 30-минутный интервал. Эти величины сравнивались с концентрациями, вычисленными с помощью комплекса моделей.

Одновременно на башне высотой 200 м, расположенной рядом с мачтой источника, с интервалом 10 мин проводились измерения метеорологических параметров, которые обеспечивали получение вертикальных профилей температуры и ветра в пограничном слое атмосферы во время натурных экспериментов. Характеристики ветра фиксировались на высотах 40, 100 и 160 м.

Перед оценкой качества расчета концентраций проводилось сравнение прогностического ветра в различных экспериментах с данными наблюдений.

### 3.2. Описание численных экспериментов

В работе [1] приведены результаты испытания модели переноса примесей в атмосфере на тех же данных натурных экспериментов. При испытаниях метеорологические параметры в каждый момент времени задавались одинаковыми величинами в пространстве, равными изменным на вышках.

Основным отличием тестирования транспортной модели в данной работе является использование не измеренных, а прогностических метеорологических параметров и неоднородных по пространству полей, соответствующих реалистичной орографии.

Численные эксперименты проводились с гидродинамической прогностической моделью WRF в виде прогнозов полей метеорологических элементов и коэффициентов турбулентности, которые использовались для расчета приземных концентраций трассеров с помощью транспортной модели. Задача тестирования заключалась в получении



прогностических метеорологических полей, обеспечивающих наиболее оптимальное приближение к условиям наблюдений. Для сравнения качества воспроизведения температуры и ветра использовались измерения на башнях.

При постановке экспериментов возникла значительная проблема, связанная с начальными и краевыми условиями для расчетов.

Дело в том, что за годы натурных экспериментов (1983–1985 гг.) в России отсутствуют объективные метеорологические данные с высоким пространственным разрешением и высокого качества. Как уже упоминалось в разделе 1, в нашем распоряжении имелись данные трех реанализов различных мировых центров. Данные реанализов имели пространственное разрешение  $2,5^\circ$  (т.е. около 250 км) и  $1,25^\circ$  (порядка 125 км), т.е. с весьма грубым разрешением.

В связи с таким разрешением и с тем, что натурные эксперименты проводились в течение весьма короткого интервала времени (всего 3–4 часа), в исходных данных даже небольшая локальная ошибка в величине и направлении ветра могла заметно исказить результаты расчетов концентраций. Поэтому первая серия экспериментов была направлена на подбор оптимальных начальных и граничных условий.

Другая серия экспериментов была посвящена подбору оптимального набора методов параметризации физических процессов в приземном и пограничном слоях атмосферы, позволяющих получить наиболее близкие к наблюдениям результаты приземных концентраций.

Во всех экспериментах для согласования весьма грубых начальных данных с моделью высокого пространственного разрешения использовались предварительные прогнозы на 20–24 часа. Таким образом устаревал так называемый «spin-up». Двадцатый час прогноза совпал с началом натурного эксперимента. Ниже приведен анализ результатов прогноза, начиная с заблаговременности 20 часов.

#### **4. Анализ результатов расчетов с помощью версии региональной гидродинамической модели WRF для модели переноса примесей в атмосфере**

Результаты численных экспериментов с использованием разных методов параметризации процессов в пограничном слое и почве сравнивались между собой, с данными измерений ветра на башне и с результатами

переноса примеси, полученными с помощью транспортной модели по метеорологическим данным измерений на башне без учета орографии и неоднородности распределения ветра в пространстве.

#### **4.1. Оценки прогностического ветра**

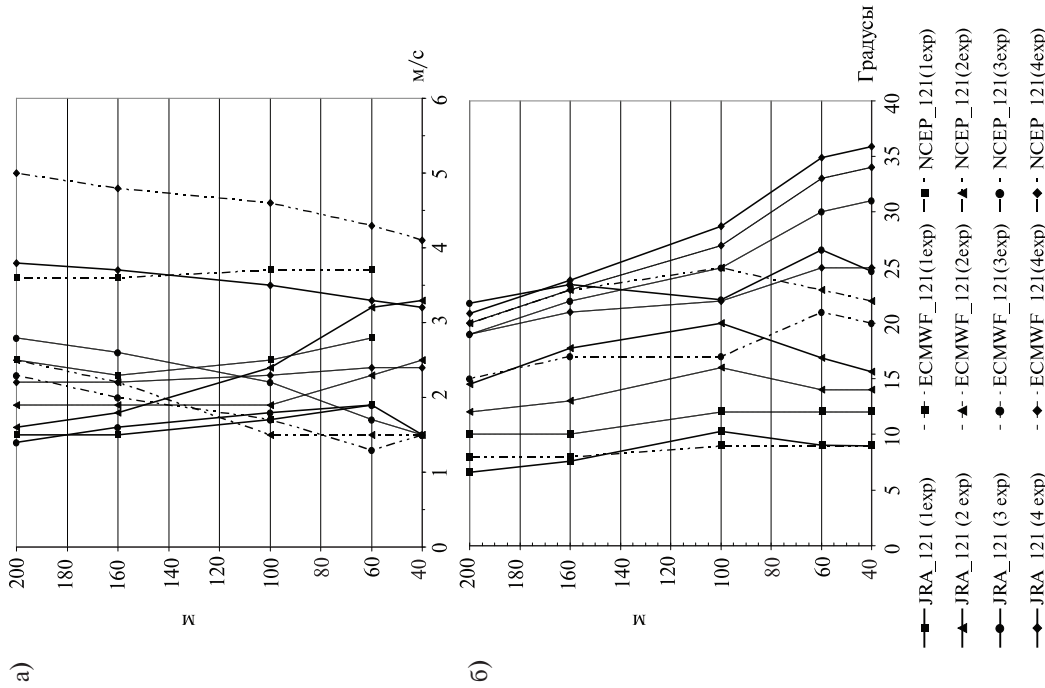
Оценить качество воспроизведения горизонтальных полей ветра нет возможности, так как ветер измерялся только вблизи мачты с некоторым точником.

Рассмотрим оценки вертикального профиля прогностического ветра в точке с координатами башни. Качество воспроизведения вертикального профиля ветра моделью в большой степени определяет качество результатов расчетов распределения концентраций трассеров.

На рис. 2 приведены профили вертикального распределения средних абсолютных ошибок прогноза модуля скорости и направления ветра за интервалы натурных экспериментов (около трех часов) в экспериментах с начальными данными из различных реанализов.

Рис. 2а отражает зависимость ошибок в модуле скорости прогностического ветра для четырех натурных экспериментов. Индексы отражают методы параметризации: первый индекс – выбранный метод параметризации процессов в приземном слое, второй индекс – процессов в почве, третий индекс – процессов в пограничном слое. Все модули скорости ветра были рассчитаны для комбинации: метод параметризации приземного слоя (1), основанный на теории подобия; метод параметризации процессов в почве (2), в котором расчеты велись для двух слоев; метод параметризации пограничного слоя (1). Разброс ошибок модуля скорости ветра составил от 1,5 до 5 м/с.

Для первого натурного эксперимента наименьшие ошибки получены для реанализа JRA с пространственным разрешением  $1,25^\circ$ , причем с высотой ошибки уменьшались. Для второго натурного эксперимента характерно, что в нижней атмосфере (до 140 м) наименьшие ошибки были при расчетах с реанализами NCEP, а выше – с реанализами JRA. Для третьего натурного эксперимента результаты практически такой же: в нижней атмосфере (до 100 м) – наименьшие ошибки с реанализом NCEP, а в верхней – с реанализом JRA. Для четвертого эксперимента характерны самые большие ошибки в модуле скорости ветра, причем наименьшие ошибки при начальных данных ECMWF.



**Рис. 2. Вертикальное распределение средних за период натуральных экспериментов ошибок прогноза модуля скорости ветра (а) и направления ветра (б) в экспериментах с данными различных реанализов. Первый индекс — метод параметризации процессов в приземном слое, второй индекс — метод параметризации процессов в почве, третий индекс — метод параметризации процессов в пограничном слое**

Итак, по результатам четырех натуральных экспериментов для нижней атмосферы по модулю скорости ветра наиболее удачным в качестве начальных данных оказался реанализ NCEP.

Рис. 2б отражает качество воспроизведения направления ветра с высотой в той же серии экспериментов. Можно видеть, что средняя ошибка направления ветра лежит в диапазоне 10–45°.

Практически одинаковые ошибки направления ветра в первом натурном эксперименте с реанализами NCEP и JRA, во втором эксперименте лучшее описание направления ветра показала модель с использованием реанализа ECMWF, в третьем — наименьшие ошибки с реанализом NCEP, в четвертом — наилучшее описание направления также с использованием реанализа NCEP, при этом ошибки в направлении ветра были большими, чем в остальных случаях.

Таким образом можно считать, что при использовании реанализа NCEP в среднем удалось получить наилучшее описание ветра в нижней тропосфере. В связи с этим эксперименты по выбору оптимального набора методов параметризации проводились на данных реанализа NCEP.

Другая серия численных экспериментов была посвящена подбору оптимальных методов параметризации физических процессов в приземном и пограничном слоях, позволяющих получить наиболее близкие к наблюдениям результаты расчета приземных концентраций трассеров.

На рис. 3 приведено вертикальное распределение осредненных за период натуральных экспериментов ошибок прогноза модуля скорости и направления ветра для численных экспериментов, отличающихся описанием приземного и пограничного слоя на данных реанализа NCEP. Как видно из рисунка, комбинация NCEP\_121 имела несколько меньшие ошибки в описании модуля скорости ветра, чем NCEP\_222.

#### 4.2. Анализ карт приземной концентрации трассеров

На рис. 4 приведены карты приземной концентрации трассеров для каждого из четырех натуральных экспериментов. В левом столбце приведены карты концентраций трассеров комплексом моделей с данными реанализа ECMWF, в среднем столбце — с данными реанализа JRA, в правом столбце — расчет концентраций по модели переноса примесей с данными наблюдений за ветром на башне.

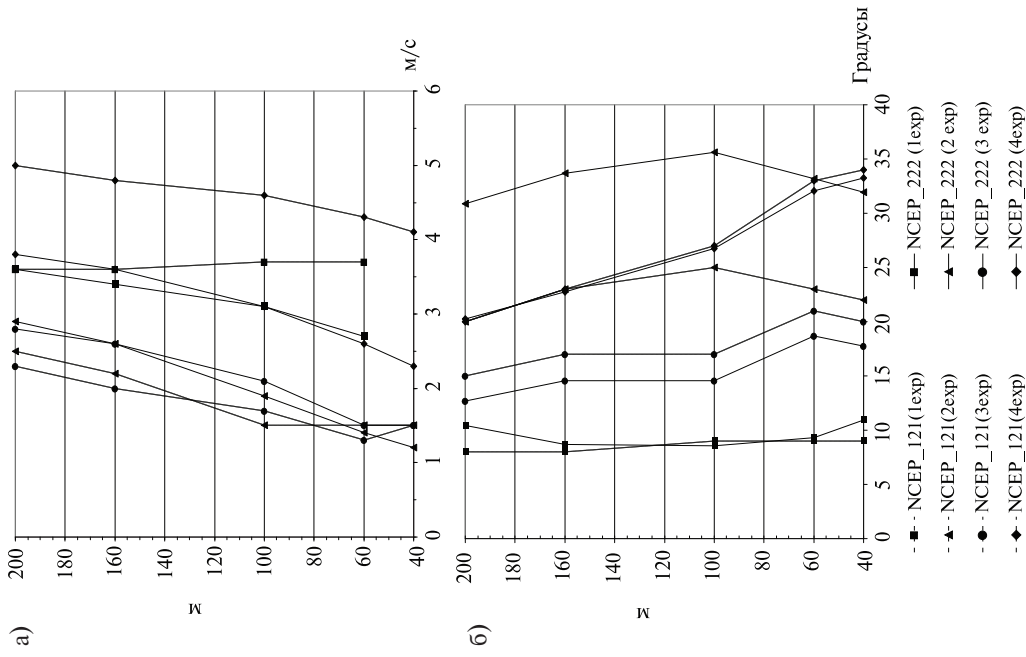


Рис. 3. Вертикальное распределение средних за период натуральных экспериментов ошибок прогноза модуля скорости ветра (а) и направления ветра (б) в экспериментах, отличающихся описанием приземного и пограничного слоя, на данных реанализа NCEP. Первый индекс — метод параметризации процессов в приземном слое, второй индекс — метод параметризации процессов в пограничном слое, третий индекс — метод параметризации процессов в пограничном слое

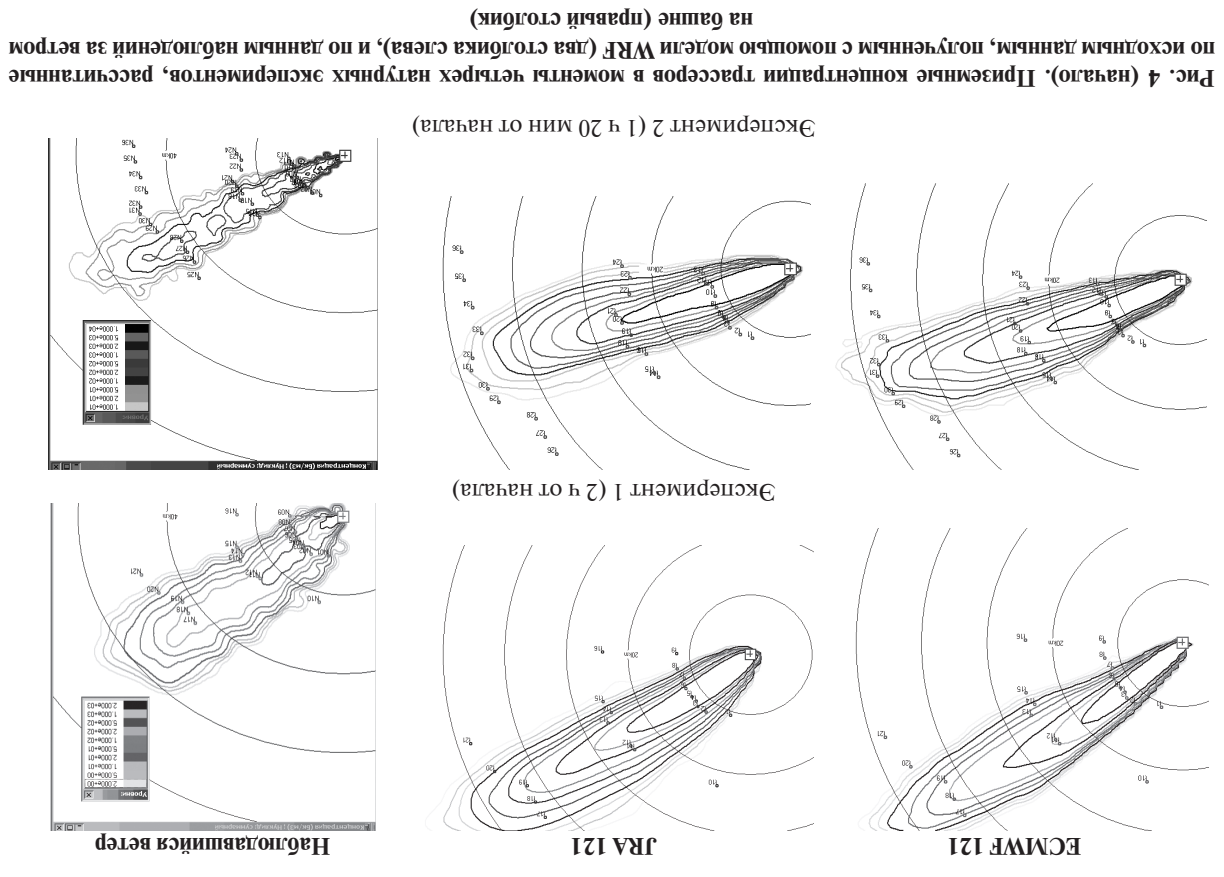


Рис. 4 (начало). Приземные концентрации трассеров в моменты четырех натурных экспериментов, рассчитанные по исходным данным, полученным с помощью модели WRF (два столбика слева), и по данным наблюдений за ветром на бапше (правый столбик)

Из рис. 4 можно видеть, что концентрации, рассчитанные в первом и четвертом экспериментах, наиболее близки к концентрациям трассеров по данным наблюдений. Это соответствует приведенному выше сравнению вертикальных профилей ошибок прогноза модуля скорости и направления ветра для четырех натуральных экспериментов (рис. 2 и 3).

Наихудшие результаты в расчетах по данным реанализа ECMWF в третьем эксперименте. В нем след от распространения трассера не достиг дальней линии измерительных станций, что не соответствовало наблюдениям и расчетам по другим начальным данным. Практически все следы концентраций, рассчитанные по прогнозным данным, имеют несколько большую ширину, чем рассчитанные по фактическому ветру с принятыми в этих расчетах методами параметризации турбулентности. Скорее всего, это связано с некоторым завышением горизонтальной турбулентности. Можно видеть также, что конфигурация следа концентраций трассеров заметно зависит от использованных начальных и краевых данных в экспериментах.

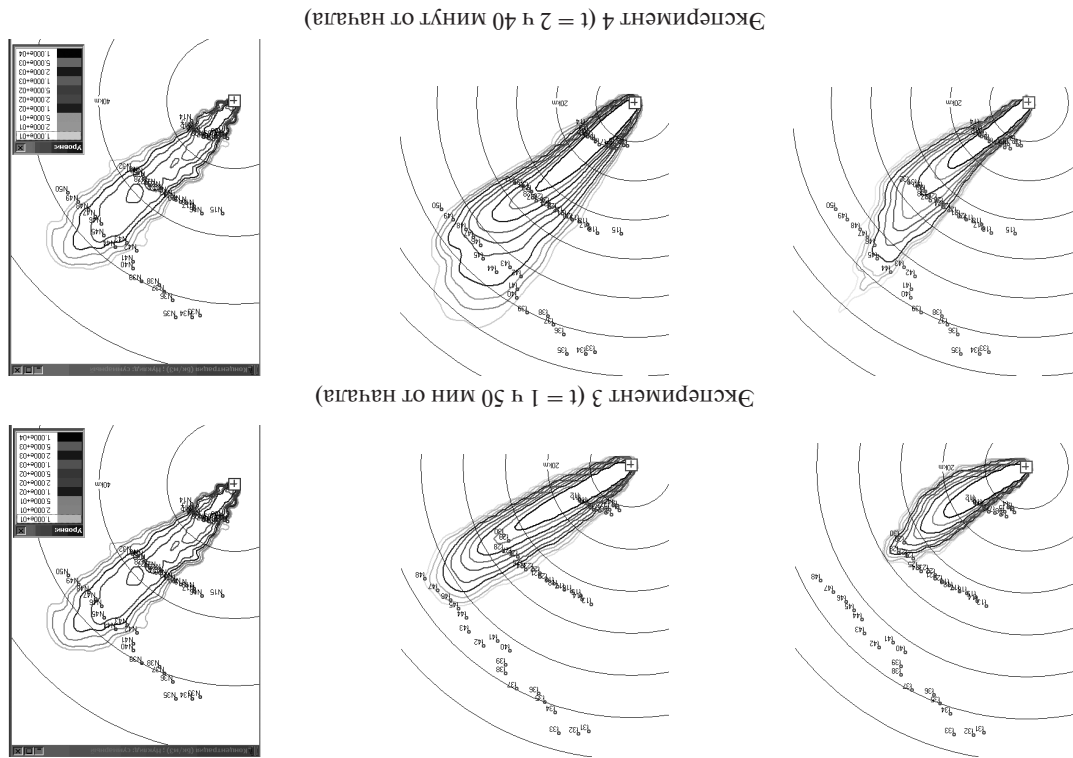
### Выводы

В статье представлены результаты численных экспериментов с региональной гидродинамической моделью WRF. С целью анализа чувствительности результатов прогноза характеристик ветра к изменению начальных и краевых условий и методов параметризации физических процессов в атмосфере, в регионе южной Германии (вблизи г. Карлсруэ) проводились натурные эксперименты по измерению концентрации трассеров и вертикального профиля ветра.

После экспериментов с данными различных реанализов, взятых в качестве начальных и краевых условий для гидродинамической модели, было показано, что наилучшее воспроизведение вертикального профиля модуля скорости и направления ветра получается при использовании реанализа NCEP.

Показано также, что ошибки в распределении характеристик ветра также зависят от метода параметризации приземного и пограничного слоев в модели. Вывод о том, что комбинация метода параметризации процессов приземного слоя, базирующаяся на теории подобия (1),

Рис. 4 (продолжение). Приземные концентрации трассеров в моменты четырех натуральных экспериментов, рассчитанные по исходным данным, с помощью модели WRF (два столбика слева), и по данным наблюдений за ветром на башне (правый столбик)





метода параметризации почвы (2), в котором расчеты велись для двух слоев и метода параметризации пограничного слоя (1), носит предпочтительный характер.

В работе показано, что, используя модель WRF с оптимальным набором методов описания физических процессов в нижних слоях атмосферы, возможно получение прогноза следов концентраций трасеров вполне реалистичного вида, с несколько более широким следом, чем при расчете с наблюдавшимся ветром. Более широкий след может быть связан с завышенными коэффициентами горизонтальной турбулентности.

Работа частично поддержана фондом РФФИ. Гранты 09-05-00652-а и 10-08-00493-а.

#### Список литературы

1. *Беликов В.В., Головинин В.М., Катмышков Ю.В., Семенов В.Н., Стародубцева Л.П., Сорокина О.С., Фокин А.Л.* НОСТРАДАМУС – компьютерная система прогнозирования радиационной обстановки. Верификация модели атмосферного переноса примеси // Труды ИБРАЭ. Моделирование распространения радионуклидов в окружающей среде. – М., 2008. – С. 41–103.
2. *Beljaars A.C.M.* The parameterization of surface fluxes in large-scale models under free convection // Quart. J. Roy. Meteor. Soc. – 1994. – Vol. 121. – P. 255–270.
3. *Chen F., Dudhia J.* Coupling an advanced land-surface/hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model implementation and sensitivity // Mon. Wea. Rev. – 2001. – Vol. 129, N 4. – P. 569–585.
4. *Engelen R. J., Stephens G. L.* Use of the ECMWF reanalysis data in the assessment of the role of the hydrological cycle in the tropical intraseasonal oscillation // Proceedings of the second WCRP international conference on reanalyses (Wokefield Park, nr. Reading, UK, 23–27 August 1999), January 2000, WCRP-109 (WMO/TD-985). – P. 201–204.
5. *Janjic Z.I.* The step-mountain eta coordinate model: further development of the convection, viscous sublayer, and turbulent closure schemes // Mon. Wea. Rev. – 1994. – Vol. 122, N 5. – P. 927–945.
6. *Janjic Z.I.* The step-mountain coordinate: physical package // Mon. Wea. Rev. – 1990. – Vol. 118, N 7. – P. 1429–1443.
7. *Kanamitsu M., Ebisuzaki W., Woollen J., Potter J., Fiorino M.* Overview of NCEP/DOE Reanalysis-2 // Proceedings of the Second WCRP International Conference on Reanalyses, WCRP-109 (WMO/TD-985). – P. 1–4.

8. *Onogi K. et al.* The JRA-25 Reanalysis // J. of the Meteorol. Soc. of Japan. – 2007. – Vol. 85, N 3. – P. 369–432.

9. *Thomas P., Vogt S.P.* Gaglione Mesoscale Atmospheric Experiment Using Tracer and Tetraons Simultaneously at Kernforschungszentrum // Karlsruhe. KfK 4147 EUR 10907 EN. – P. 112.

10. *Xiu A., Pleim J.E.* Development of a land surface model. Part I: Application in a mesoscale meteorological model // J. Appl. Meteorol. – 2001. – Vol. 40, N 2. – P. 192–209.

11. *Zhang D.L., Anthes R.A.* A high-resolution model of the planetary boundary layer – sensitivity tests and comparisons with SESAME-79 data // J. Appl. Meteorol. – 1982. – Vol. 21, N 11. – P. 1594–1609.

12. *Zilitinkevich S.S.* Non-local turbulent transport: pollution dispersion aspects of coherent structure of convective flows, Air Pollution III. Volume I. Air Pollution. Theory and Simulation / eds. H. Power, N. Moussiopoulos, C.A. Brebbia // Computational Mechanics Publications, Southampton. – Boston. – 1995. – P. 53–60.