

Министерство образования и науки РФ  
Федеральное агентство по образованию  
ГОУ ВПО  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ  
(РГГМУ)

На правах рукописи

УДК 551.511.072

Алталули Рами Абд Эль Малек

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ЧУВСТВИТЕЛЬНОСТИ ПРОГНОЗА  
ЛОКАЛЬНОГО ЗАГРЯЗНЕНИЯ АТМОСФЕРЫ К ПОГРЕШНОСТЯМ  
ИСХОДНЫХ ДАННЫХ

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

### **АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2009

Диссертация выполнена на кафедре Метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета.

Научный руководитель: Профессор, доктор физико-математических наук,  
А.С. Гаврилов

Официальные оппоненты: Доктор физико-математических наук, профессор  
В.И. Биненко

Кандидат физико-математических наук, доцент,  
Л.О. Неелова

Ведущая организация: Центр международного сотрудничества по пробле-  
мам окружающей среды ИНЭНКО РАН

Защита диссертации состоится “18” июня 2009 г. в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д212.197.01 в Российском государственном гидрометеорологическом университете по адресу:

**195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98, тел. (812) 444-41-63.**

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского государственного гидрометеорологического университета по адресу:

**195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.**

Автореферат разослан “18” мая 2009 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета,



доктор физ. - мат наук,  
профессор, А. Д. Кузнецов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы** определяется широким развитием промышленного производства в различных регионах мира с одной стороны и требованиями по обеспечению их экологической безопасности с другой.

Методы прогноза загрязнения атмосферы на синоптических масштабах в течение последних десятилетий, особенно после аварии на Чернобыльской АЭС в 1986 г., активно разрабатывались в различных странах и находят в настоящее время довольно широкое применение при решении таких задач, как трансграничный перенос антропогенных выбросов. Между тем, за исключением некоторых экстремальных ситуаций с выбросами радиоактивных или кислотообразующих примесей, такого рода загрязнение природной среды несопоставимо по вкладу с загрязнением атмосферы от выбросов локальных источников, таких, например, как промышленные предприятия, объекты энергетики и автотранспорт. Однако, именно этому направлению краткосрочного прогнозирования загрязнения окружающей среды в существующих исследованиях уделяется весьма скромное место.

На современном этапе развития разнообразных схем краткосрочного численного прогноза погоды, активно внедряемых в настоящее время в различных регионах мира, очень важно количественно оценить возможности использования получаемой с их помощью информации для диагноза и прогноза загрязнения атмосферы от выбросов локальных источников.

Следует отметить, что концентрация примеси даже от одного стабильного источника выбросов меняется на порядки величины и чрезвычайно чувствительна к метеоусловиям, так что даже при достаточно точном их задании из-за множества влияющих факторов и физического несовершенства математических моделей ошибки расчета оказываются достаточно большими (несколько десятков процентов), а это означает, что ошибки прогностические значений этих величин будут еще выше.

**Целью работы** является проведение комплекса расчетов по оценке чувствительности характеристик загрязнения атмосферы выбросами от локальных источников к ошибкам исходных данных применительно к краткосрочному прогнозу загрязнения атмосферы.

**Для достижения поставленных целей в диссертационной работе были сформулированы следующие задачи:**

- адаптировать разработанную ранее численную модель турбулентной диффузии в атмосферном пограничном слое (АПС) к расчету характеристик рассеивания примеси от выбросов локальных источников и осуществить с ее помощью оценку погрешностей расчета концентрации примесей в зависимости от ошибок исходных данных;
- провести изучение доступных информационных ресурсов и сформировать архивы исходных данных метеорологических наблюдений, а также архивы аэросиноптического анализа и прогноза для различных регионов мира;

- провести комплекс расчетов по оценке точности численного аэросиноптического анализа и прогноза метеорологических величин на основе непосредственного сопоставления с данными наблюдений на метеорологических станциях;
- на основании статистической обработки данных об ошибках анализа и прогноза получить количественные оценки точности прогноза приземной концентрации примеси от локальных источников.

**Методы исследования.** Основные методы исследования – компьютерное моделирование с использованием численной модели АПС, а также статистический анализ результатов.

**Научная новизна** состоит в том, что впервые проведено комплексное статистическое исследование возможных погрешностей прогноза характеристик загрязнения атмосферы от локальных источников, осуществляемого на основе наиболее доступного информационного ресурса аэросиноптического анализа и прогноза.

**Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Результаты исследования чувствительности погрешностей расчета концентрации примесей к ошибкам исходных данных.
2. Результаты расчетов по оценке точности синоптического анализа и прогноза метеорологических величин на основе непосредственного сопоставления с данными наблюдений на метеорологических станциях (на примере региона Восточного Средиземноморья и некоторых европейских стран).
3. Результаты статистической обработки данных об ошибках анализа и прогноза метеорологических параметров, определяющих перенос и рассеяния примеси, а также расчета и прогноза приземной концентрации примесей от локальных источников.

**Обоснованность и достоверность результатов** подтверждаются строгой математической постановкой задачи о турбулентной диффузии примесей в атмосферном пограничном слое, а также статистической обеспеченностью рассчитанных на основе архивов стандартной гидрометеорологической информации ошибок прогноза и прогноза характеристик загрязнения атмосферы.

**Теоретическая и практическая ценность** диссертации состоит в получении обоснованных количественных результатов по оценкам чувствительности различных моделей расчета загрязнения атмосферы от локальных источников и оценкам погрешностей такого рода расчетов на основе использования диагностической и прогностической аэросиноптической информации.

**Апробация диссертационной работы**

Основные результаты исследований, изложенные в диссертации, докладывались и обсуждались:

- на научном семинаре кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (2003-2008 гг.);
- итоговых сессиях ученого совета РГГМУ (2005, 2006 гг.);
- на заседаниях Международной научной конференции “Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон”, СПб, РГГМУ (2005 г.);
- на заседании международной конференции "Изменение климата и окружающая среда", СПб, РГГМУ, 06-09.12.2005 г.;

**Публикации:** Основные результаты диссертации опубликованы в 3-х печатных работах.

### **Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников, включающего 85 наименований. Общий объем работы составляет 133 страницы, включая 93 рисунков и 5 таблиц.

## **ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ**

**Во введении** обоснована актуальность темы диссертации, сформулированы цели и задачи исследования, приведены основные положения и результаты, выносимые на защиту, теоретическая новизна и практическая значимость работы, а также кратко излагается содержание диссертации.

**В первой главе**, носящей обзорный характер, последовательно рассматриваются доступные информационные ресурсы численного аэросиноптического прогноза применительно к расчету антропогенных загрязнений.

Единственный доступный для всей территории Российской Федерации информационный ресурс такого рода предоставляет разработанная и реализуемая в Гидрометцентре РФ в вычислительной среде ЭВМ CRAY UNICOS первая в стране оперативная технология выпуска гидродинамических прогнозов метеорологических полей с дискретностью по времени 6 часов и заблаговременностью 12 – 240 ч на основе глобальной спектральной модели атмосферы высокого пространственного разрешения T85L31 (А.В. Фролов, Е.Д. Астахова, И.А. Розинкина, В.И. Цветков, П.И. Свиренко, Т.Я. Пономарева, И.В. Рузанова, Ю.В. Алферов, Д.Б. Киктев, 2000). Координатная сетка по вертикали имеет 31 уровень со сгущением в нижних слоях, где всю толщу АПС (около 1.5 – 2км) описывают 7 – 8 счетных уровней.

Выходная продукция выпускается в оперативном режиме два раза в сутки: по исходному сроку 00:00 UTC (заблаговременность прогнозов до 84 ч) и по исходному сроку 12:00 UTC (заблаговременность прогнозов до 240 ч), включает полный набор прогностических полей компонент скорости ветра, температуры, влажности, а также среднее количество осадков (миллиметров за 12 часов) для ячеек размером около 100 км. Все пространственные данные заданы в широтно-долготной сетке

$2.5^0 \times 2.5^0$  на стандартных изобарических поверхностях и находятся в свободном доступе в Интернете.

Как показали исследования чувствительности этой модели к ошибкам в исходных данных (Г.П. Курбаткин, А.И. Дегтярев, А.В. Фролов, 1994), избыточная детализация свойств подстилающей поверхности в некоторых случаях может существенно ухудшить качество прогнозов. Это относится, в первую очередь, к заданию не вполне хорошо известных свойств водных массивов в зонах аридного климата, к которой, в частности, относится и регион Восточного Средиземноморья.

Наиболее перспективными в плане использования применительно к прогнозу загрязнения атмосферы от локальных источников являются активно развиваемые в США и Европе мезомасштабные модели прогноза. В диссертации анализируется опыт такого рода прогнозов с использованием известной модели MM-5 (США) и ее последующая модификация WRF (Weather Research and Forecasting), а также созданной европейскими исследователями прогностической системы HIRLAM, эталонная версия которой поддерживается в Европейском центре среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF).

В конце 90-х годов модель MM-5 была адаптирована в Тель-Авивском университете (TAU) для производства 48-часовых прогнозов в реальном масштабе времени применительно к Восточному Средиземноморью. В качестве начальных и граничных условий использовались данные авиационного анализа и прогноза национального центра по прогнозированию окружающей среды США (NCEP) с разрешением  $1.25^0$ . Расчет осуществлялся с горизонтальным разрешением  $60 \times 20 \text{ км}^2$  и вертикальным разрешением на 23 уровня (С.О. Кричак и П. Альперт, 1998).

Общим в развитии всех мезометеорологических моделей такого рода является непрерывное повышение детализации как по горизонтали, так и по вертикали. Наибольшие успехи достигнуты здесь в модели HIRLAM-7 (<http://hirlam.org/>), с возможным разрешением от 55 до 5 км по горизонтали и от 31 до 60 уровней по вертикали, так что в области АПС может быть при необходимости достигнуто вертикальное разрешение в несколько десятков метров. Все что требуется для той или иной схемы прогноза с точки зрения описания разного рода подсеточных эффектов в АПС (турбулентные потоки, высота слоя перемешивания и т.д.) с той или иной степенью успешности параметризуется.

Таким образом, даже наиболее современные прогностические модели, эксплуатируемые на самых лучших вычислительных средствах не в состоянии достаточно детально (до нескольких метров) описывать вертикальную структуру нижнего 100-150 метрового слоя, где и размещается подавляющее количество локальных антропогенных источников загрязнения. Необходимость прогнозирования таких, например, неблагоприятных метеорологических факторов для рассеяния примесей, как приземные или приподнятые инверсии, потребует размещения только в области АПС (до высоты 1.5 – 2 км) не менее 40 уровней с привлечением в этом случае уже не простейших параметризационных схем для описания характеристик турбулентности, а дополнительных дифференциальных уравнений переноса таких, например, величин, как вторые моменты турбулентных пульсаций.

В заключение 1 главы диссертации делается вывод, что для выхода из создавшегося положения есть два пути:

- существенная пространственная детализация используемых методов численного прогноза с подключением туда физически-содержательных схем описания атмосферной турбулентности;
- использование для этих целей дополнительной численной модели АПС высокого пространственного разрешения, базирующейся на использовании доступных данных анализа и прогноза лишь в качестве некоторого «фона».

Первый путь является хотя и возможным, но в ближайшие годы мало перспективным, поскольку существующие прогностические системы и так достаточно переусложнены. Реализация второго, альтернативного пути, как раз и является одной из задач настоящего диссертационного исследования.

**Вторая глава** посвящена исследованию чувствительности различных моделей расчета загрязнения атмосферы к ошибкам исходных данных. Первоначально, на основе литературных данных проведена некоторая классификация физических механизмов переноса и рассеяния примесей в атмосфере от локальных источников, а в разделе 2.2 дается развернутая классификация существующих математических моделей расчета загрязнения атмосферы.

В качестве объектов для последующего исследования выбраны, с одной стороны, наиболее простая и распространенная в мире гауссова модель Пэскуилла-Гиффорда-Бриггса (ПГБ – модель) – базовая регуляторная модель Агентства по охране окружающей среды США, а с другой – лагранжева стохастическая модель турбулентной диффузии, разработанная на кафедре метеорологии, климатологии и охраны атмосферы РГГМУ (далее – ГДМ+МК).

ПГБ - модель удобна тем, что базируется на прозрачных аналитических зависимостях, допускающих прямое получение соотношений, связывающих расчетные погрешности максимальных приземных значений концентрации примеси  $C_m$  от некоторого источника выбросов высотой  $h$  в поле ветра  $U$  с относительными погрешностями скорости ветра и такой величины, как  $f = \frac{A_z}{A_y}$  :

$$\frac{\delta C_m}{C_m} \leq \frac{\delta U}{U} + \frac{\delta f}{f}, \quad (1)$$

где  $\delta C_m, \delta U, \delta f$  – соответствующие абсолютные погрешности, а  $A_z$  и  $A_y$  – эмпирические коэффициенты модели ПГБ, зависящие от категории устойчивости атмосферы  $K$ , определяющие стандартные отклонения поперечного ( $\sigma_y \cong A_y x$ ) и вертикального ( $\sigma_z \cong A_z x$ ) растяжения факела примеси в зависимости от расстояния от источника  $x$  вдоль направления среднего ветра. Всего таких категорий 7 и они имеют следующие литеральные наименования: А, В, С (неустойчивая стратификация атмосферы в зависимости от степени развития конвекции), D (нейтральная стратификация), Е, F,G (устойчивая стратификация в зависимости характера приземной инверсии).

Если принять в качестве  $\delta f$  ошибку в определении категории со сдвигом на одну градацию, то можно получить зависимость такого рода относительной погрешности от категории устойчивости (рисунок 1). Как видно из данного рисунка,

вклад ошибок в определении категории устойчивости в общую погрешность прогноза приземной концентрации оказывается максимальным в условиях свободной конвекции при категории «А» (около 20 %) и особенно велик на границе нейтральной (категория «D») и слабоустойчивой (категория «E»), где эта погрешность достигает значений около 35 %. Последний результат вполне понятен, поскольку при переходе от нейтральной к устойчивой стратификации резко меняется характер рассеяния примесей из-за значительного снижения кинетической энергии турбулентных пульсаций.

Совершенно очевидно, что при ошибках расчета и прогноза категории устойчивости более чем на одну градацию, такого рода погрешность, как нетрудно показать, превышает 100 %.



Рисунок 1 – Расчетная зависимость вклада в относительную ошибку расчета приземной концентрации ошибки за счет неверного задания категории устойчивости атмосферы (в долях единицы).

Точность прогноза скорости ветра исследовалась в работах (Н.П. Шакина, М.А. Толстых, Л.В. Беркович, Г.С. Булдовский, 2000 – 2005), и составляет, в среднем, для некоторых типичных условий при скорости ветра около 4 м/с (среднеклиматическая скорость ветра во многих регионах) величину 30 – 50 %.

В разделе 2.4 дается краткое описание модели ГДМ+МК и приводятся результаты численных экспериментов по исследованию чувствительности расчетов максимальных значений концентрации примесей к исходным данным.

Следует отметить, что в отличие от упрощенной гауссовой модели, для которой еще нужно задавать скорость ветра на уровне высоты источника и категорию устойчивости, данная модель в блоке ГДМ (ГидроДинамическая Модель) реализует физически содержательную модель АПС высокого пространственного разрешения (40 уровней до высоты 2 км) со сгущением сетки у подстилающей поверхности. При этом привлекается схема замыкания на основе уравнений для вторых и третьих одноточечных моментов турбулентных пульсаций (А.С. Гаврилов, 1992).

В качестве исходных данных для такой модели используются внешние «фоновые» данные о строении нижней тропосферы (в простейшем случае – на основе аэросиноптического диагноза и прогноза на стандартных изобарических поверхностях скорости ветра, температуры и влажности), а также данные стандартных гидрометеорологических наблюдений температуры, скорости ветра в приземном слое.



Прогностический вариант этой модели предусматривает использование прогностических значений скорости ветра за два срока (дневной и ночной), а также амплитуды суточного хода температуры, на основании которых уже формируется соответствующие нижние граничные условия.

На основе рассчитанной таким образом детальной структуры турбулентности в АПС во втором блоке модели – МК (метод Монте-Карло) осуществляется воспроизведение псевдослучайного поля вектора скорости ветра, рассчитываются случайные траектории движения частиц примеси и, далее, на основе статистической обработки, воспроизводится трехмерное поле концентрации примеси от источника произвольной пространственной и временной структуры.

Таким образом, общий перечень исходных параметров, по которым следует оценивать чувствительность, включает: скорость ветра в приземном слое  $U_A \equiv U(Z_A)$ , его направление  $R_A$ , параметр шероховатости подстилающей поверхности  $Z_0$  и амплитуду суточного хода температуры  $A_m$ .

Появление в числе основных параметров такой величины, как амплитуда суточного хода оказывается вполне закономерным. Действительно, при малых значениях этой величины вблизи поверхности вертикальные градиенты температуры будут крайне незначительными, а стратификация, таким образом, близкой к нейтральной. При больших значениях  $A_m$  в дневное время (между восходом и заходом Солнца) будет наблюдаться конвекция, а в ночное, соответственно, инверсия.

На основе проведенных автором комплекса расчетов для некоторого фиксированного по высоте единичного источника выбросов, оценивалась относительная ошибка расчета максимальной приземной концентрации на оси струи над горизонтально-однородной подстилающей поверхностью. В качестве центральных значений исходных параметров принимались:  $Z_0=0.1$  м,  $U_A=3$  м/с,  $A_m=10$  C<sup>0</sup> и  $R_A=0$  (северный ветер).

Примеры полученных результаты расчета чувствительности расчета концентрации приведены на рисунках 2 и 3.

Величина уровня шероховатости задается, как известно, со значительным округлением для отдельных типов поверхностей (лес, трава, песок, пашня и пр.). Реальные поверхности оказываются, кроме того, еще и весьма неоднородными по этому параметру. Именно по этим причинам его величина при расчетах в реальных условиях может быть оценена весьма приблизительно (с точностью до коэффициента 2, т.е. с погрешностью 100 %). Тем не менее, как следует из рисунка 2 величина ошибки расчета концентрации за счет погрешности задания этого параметра оказывается незначительной: всего около 4 % и на фоне других погрешностей вообще может не рассматриваться.

Наиболее значительные погрешности, как можно видеть из приведенных рисунков, вносят ошибки в задании скорости ветра и амплитуды суточного хода температуры, которые даже при сравнительно небольших значениях погрешностей в скорости ветра и амплитуды суточного хода приводят к погрешностям в расчете концентрации в 10 – 30 %.

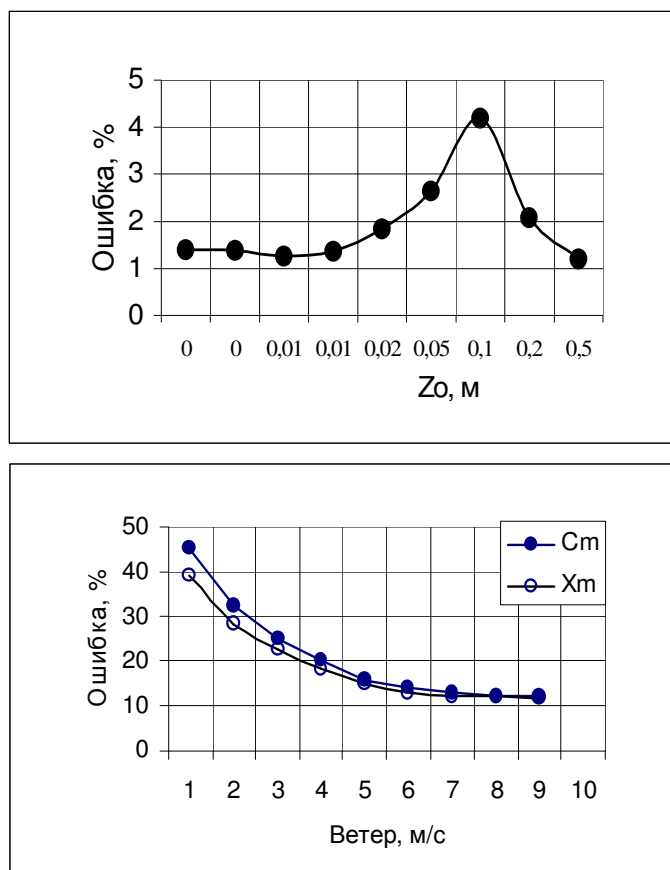


Рисунок 2 – Относительная ошибка расчета максимальной приземной концентрации на оси струи  $C_m$  в зависимости от уровня шероховатости (наверху) для уровня относительной погрешности задания этой величины в 100 %, и от скорости ветра при абсолютной ошибке задания последней  $\delta U_A = 1 \text{ м/с}$  (внизу). Величина  $X_m$  – расстояние от источника, на котором это максимальное значение наблюдается.

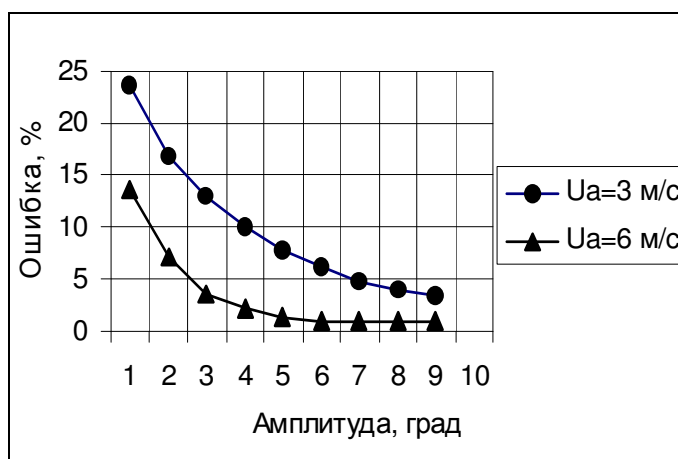


Рисунок 3 – Относительная ошибка расчета максимальной приземной концентрации на оси струи  $C_m$  в зависимости от амплитуды суточных колебаний для двух значений скорости ветра  $U_a$  при абсолютной ошибке задания амплитуды  $\delta A_m = 1^\circ \text{ С}$ .

**В третьей главе** излагаются результаты исследования фактических погрешностей расчета концентрации примесей от локальных источников на основе фонового аэросиноптического диагноза и прогноза.

В связи с ориентацией наших исследований на страны Восточного Средиземноморья, для которых прогноз с использованием моделей HIRLAM и WRF не производится, а прогнозы по модели MM-5 имеют пока краткую историю, мы базировались на единственно доступных для любой точки Северного полушария данных реанализа атмосферных процессов национального центра прогноза окружающей среды (NCEP) и национального центра атмосферных исследований (NCAR) США, находящихся в свободном доступе на сервере <http://www.ncep.noaa.gov>. Данные о температуре и скорости ветра интерполировались в точки расположения метеостанций и сравнивались с измеренными значениями этих величин.

В качестве данных наблюдений на метеостанциях привлекались имеющиеся в свободном доступе в Интернете (сервер <http://meteo.infospace.ru>) архивы срочных наблюдений на 14 метеостанциях региона за период 2001 – 2005 гг. (3 – Турция, 2 – Израиль, 3 – Египет, 3 – Сирия и по 1-й метеостанции в Ливане, Иордании и Палестине). Для сравнения с ситуаций в умеренной зоне указанный перечень был дополнен 3-я европейскими метеостанциями (Москва, Берлин и Париж).

Данные реанализа априори можно считать более точными, чем данные прогноза даже на минимальный срок, таким образом, получаемые в результате подобного сопоставления расхождения следует рассматривать как *нижний предел ошибок прогноза*.

Статистический анализ выполнялся как непосредственно для разностей значений амплитуды и скорости ветра по данным метеостанций, для относительных погрешностей «диагноза» этих величин, так и для относительной погрешности расчета максимальной концентрации, рассматриваемой в качестве верхней границы суммарной ошибки за счет ошибок в амплитуде суточного хода температуры и скорости ветра.

В качестве некоторой иллюстрации общего характера расхождений между данными реанализа и метеостанции на рисунке 4 приведен пример корреляционного графика амплитуд суточного хода температуры для метеостанции г. Каир.

Коэффициент корреляции для этого примера составляет 0.35, среднее значение – 9.8 °С, а среднеквадратическое отклонение – 2.2 °С. Таким образом, оказывается, что систематическая ошибка здесь практически отсутствует, а случайная оказывается около 3 градусов, что при средних для этого района значениях амплитуд суточного хода температуры воздуха составит для относительной погрешности этой величины около 30 %.

Аналогичное исследование проводилась также и для скорости ветра, причем отдельно для ночного и дневного времени суток (рисунок 5).

Как можно видеть из приведенного примера, реанализ скорости ветра для ночных условий имеет меньшую абсолютную погрешность, чем в дневное время, но и величина скорости ветра в это время суток оказывается по понятным причинам ниже, так что относительная погрешность оказывается во всех случаях достаточно высокой – около 80 % для ночных условий и 60 % для дневных.

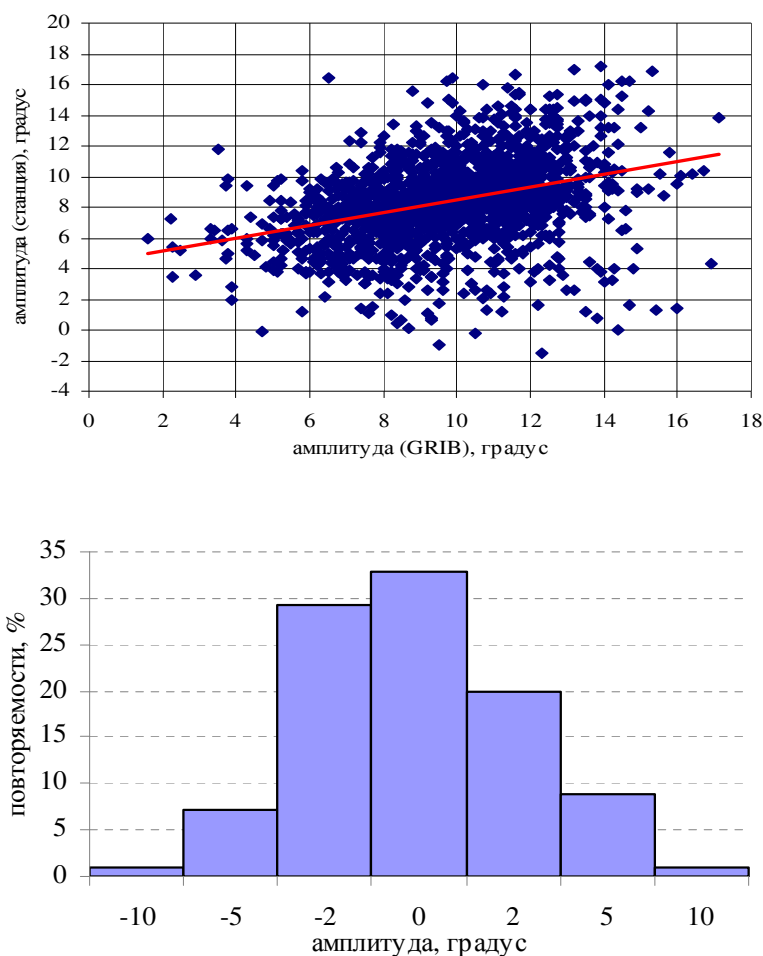


Рисунок 4 – Пример корреляционного графика амплитуды суточного хода температуры (наверху) и повторяемостей разностей значений амплитуд  $\delta A_m$  (внизу) между данными реанализа и метеостанции (г. Каир, период с 2001 по 2005).

Сводные данные по всем расчетам представлены в Таблице 1.

Как можно видеть из представленных результатов наиболее значительные относительные погрешности реанализа амплитуды суточного хода (выше 40 %) наблюдаются, преимущественно, в прибрежных городах (Анталья, Хайфа, Латакия, Бейрут, Порт-Саид), в то время как для метеостанций, удаленных от побережья, эти величины составляют 30 – 40 % (Каир, Исмаилия, Алеппо, Хама, Ирбид, Иерусалим).

Следует отметить, что, сравнивая этот результат с аналогичными данными для умеренной зоны (Москва, Париж и Берлин), оказывается, что вследствие более значительных абсолютных погрешностей в реанализе амплитуды суточного хода температуры с одной стороны и меньших значений собственно величин амплитуд, такого рода погрешность оказывается существенно выше - более 100 %.

Что касается относительных погрешностей реанализа скорости ветра, то, как следует и приведенной таблицы, эти величины варьируют от 50 до 80 % (за исключением метеостанции г. Хама в Сирии, где эта величина достигает 90 %). Аналогичные значения этих величин, как можно видеть, наблюдаются и в умеренной зоне.

Таким образом, оценивая верхнюю границу суммарной случайной ошибки при расчете максимальных значений приземной концентрации исходя из данных Таблицы 1 и произведенных оценок чувствительности в главе 2, можно сделать вывод, что эти величины в Восточном Средиземноморье оказываются около 100 %, что, в целом, не так плохо, поскольку как уже упоминалось выше, даже при задании точных исходных данных такого рода погрешность составляет несколько десятков процентов. В любом случае эти величины оказываются существенно ниже аналогичных значений для умеренной зоны.

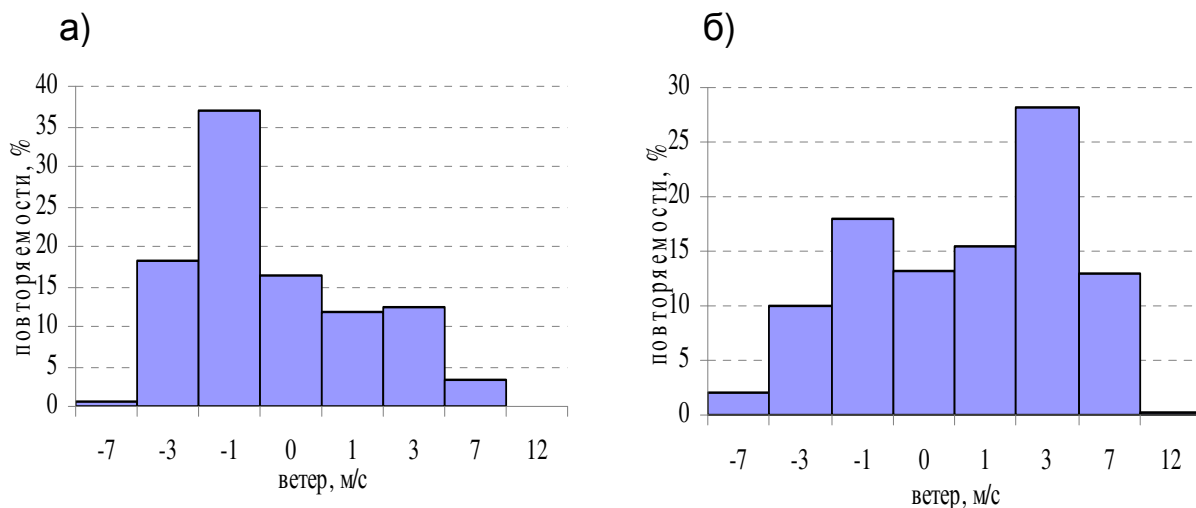


Рисунок 5 – Пример гистограммы повторяемостей разностей значений скорости ветра  $\delta U$  между данными реанализа и метеостанции (г. Хайфа, период с 2001 по 2005 гг.):  
а) ночное время; б) дневное время.

Наконец, в заключительном разделе этой главы приведены сведения о пространственном распределении относительных погрешностей расчетных значений максимальной приземной концентрации от локальных источников для всей территории Восточного Средиземноморья. Показано, что для всей территории региона эти погрешности оказываются достаточно значительными (варьируют в диапазоне 80 % – 140 %), что оказывается, однако, несколько меньше, чем в умеренной зоне. Это связано, разумеется, со значительно лучшей ожидаемой прогнозируемостью в этом регионе амплитуды суточного хода в связи с большей стабильностью погодных условий в целом.

Таблица 1 - Сводные результаты расчета относительных погрешностей.

№ п.п.	Страна	Метеостанция	$\frac{\delta A_m}{A_m}, \%$	$\frac{\delta U_a}{U_a}, \%$ (ночь)	$\frac{\delta U_a}{U_a}, \%$ (день)
1	Турция	Анталья	70	70	60
2		Искендерун	50	70	60
3		Адана-Инсирлик	50	70	60
4	Египет	Каир	30	60	50
5		Порт-Саид	50	70	50
6		Исмаилия	30	80	60
7	Сирия	Латакия	65	80	70
8		Алеппо	40	80	80
9		Хама	40	90	90
10	Израиль	Хайфа	55	80	60
11		Тель-Авив	40	80	60
12	Иордания	Ирбид	40	100	70
13	Ливан	Бейрут	50	90	70
14	Палестина	Иерусалим	40	80	70
15	Россия	Москва	105	80	80
16	Германия	Берлин	100	70	80
17	Франция	Париж	100	80	70

### В **Заключении** сформулированы основные результаты и выводы:

1. Исходя из существующего уровня развития моделей численного прогноза погоды, даже самые совершенные из них не в состоянии обеспечивать необходимую дискретность по вертикали в прогнозируемом поле температуры, а это означает, что такого рода модели целесообразно дополнять моделями АПС высокого пространственного разрешения с использованием данных прогноза в качестве «синоптического фона».
2. На основании исследования чувствительности погрешностей расчета концентрации примесей к ошибкам исходных данных показано, что наибольшее значение для прогноза максимальной приземной концентрации имеют погрешности в прогнозе амплитуды температуры и скорости ветра в приземном слое.
3. На основе расчетов по оценке точности данных реанализа атмосферных процессов на основе непосредственного сопоставления с данными наблюдений на метеорологических станциях установлено, что относительные погрешности в амплитуде суточного хода в Восточном Средиземноморье варьируют в пределах от 30 до 50 %, а в умеренной зоне – превышают 100 %; относительная погрешность в данных о скорости приземного ветра колеблется в пределах от 60 до 80 %.
4. На основании результатов оценки чувствительности максимальной приземной концентрации к ошибкам исходных данных и соответст-

вующих оценок погрешностей реанализа амплитуды суточного хода и скорости ветра установлено, что ожидаемая погрешность прогноза уровней загрязнения атмосферы от локальных источников составляет для Восточного Средиземноморья около 100 %, а для умеренной зоны – не менее 180 %.

### **Основные публикации по теме диссертации.**

#### **Статья в издании из списка ВАК**

1. Прогноз и климатологический анализ характеристик атмосферы, определяющих рассеяние антропогенных загрязнений // Естественные и технические науки. М., 2008. № 6 с. 221–225 (соавторы Гаврилов А.С, Мханна А.И.Н.).

#### **Статья в научно-техническом сборнике**

2. Численное моделирование атмосферного пограничного слоя применительно к прогнозу неблагоприятных метеорологических условий. // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз. темат. сб. тр. Вып. 10 / СПбГАСУ. – СПб, 2004, с. 99-108 (соавторы Гаврилов А.С, Мханна А.И.Н.).

#### **Публикация в материалах конференции**

3. Метод расчета метеорологического потенциала загрязнения атмосферы для крупного города // Материалы международной конференции "Изменение климата и окружающая среда", СПб, РГГМУ, 06-09.12.2005 г.; с. 107-108. (соавторы Баранова М.Е, Мханна А.И.Н.).