

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



На правах рукописи

УДК 551.511.072

Мханна Аасд Исмаил Назир

**МЕТОД РАСЧЕТА И КЛИМАТОЛОГИЧЕСКОГО АНАЛИЗА  
ХАРАКТЕРИСТИК АТМОСФЕРЫ, ОПРЕДЕЛЯЮЩИХ  
ПЕРЕНОС И РАССЕЯНИЕ ПРИМЕСИ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата физико-математических наук

29 МАЙ 2009

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  
*А.Д. Егоров*

Кандидат физико-математических наук, доцент,  
*А.Г.Попов*

Ведущая организация: Санкт-Петербургский научно-исследовательский  
центр экологической безопасности РАН (НИЦЭБ  
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.** В развивающихся странах за последние десятилетия достигнут существенный прогресс в развитии промышленности и энергетики. Это ставит их перед теми же проблемами в области охраны окружающей среды, что и развитие в промышленном отношении страны Европы и Северной Америки.

Между тем, в этих регионах практически полностью отсутствуют систематические исследования в области изучения рассеивающих способностей атмосферы, для которых требуется проведение достаточно обширной программы градиентных измерений в слое до 100 – 150 м над поверхностью. Вышеизложенное приводит к необходимости поиска способов получения достоверных оценок рассеивающих свойств атмосферы на основании косвенной, но единственно доступной на настоящий момент информации – стандартных метеорологических наблюдений и аэросиноптических данных, что оказывается возможным с использованием методов математического моделирования.

**Целью работы** является: разработка модели и проведение комплекса расчетов основных параметров, определяющих рассеивающие свойства атмосферы применительно к такому интенсивно развивающемуся региону, как Восточное Средиземноморье, их статистическое обобщение и построение, в итоге, набора климатических карт этих параметров.

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

- определить перечень параметров, характеризующих рассеивающие способности атмосферы исходя из сложившейся практики принятия управленческих решений в области природопользования;
- адаптировать разработанную ранее численную модель атмосферного пограничного слоя (АПС) к расчету характеристик рассеивания и осуществить ее верификацию;
- провести анализ доступных информационных ресурсов и сформировать архивы исходных данных для расчета в достаточном для статистического и пространственного анализа количестве;
- провести комплекс расчетов и построить климатические карты параметров, определяющих рассеивающие способности атмосферы.

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

**Научная новизна** состоит в том, что впервые на примере Восточного Средиземноморья проведен комплексный статистический анализ и построены климатические карты основных параметров, характеризующих рассеивающие способности атмосферы с использованием единственно доступных для этих целей архивов стандартных метеорологических и аэросиноптических данных.

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

1. Уточненный метод расчета характеристик рассеивающей способности атмосферы на базы модели АПС с использованием стандартной метеорологической и аэросиноптической информации, а также результаты его верификации.
2. Результаты статистического анализа временной изменчивости характеристик рассеивающей способности атмосферы на различных территориях.
3. Климатические карты характеристик рассеивающей способности атмосферы для Восточного Средиземноморья.

**Обоснованность и достоверность результатов** подтверждаются строгой математической постановкой задачи о численном моделировании АПС, результатами верификации модели АПС, а также статистической обеспеченностью рассчитанных на основе архивов стандартной гидрометеорологической информации статистических характеристик рассеивающей способности атмосферы.

**Теоретическая и практическая ценность** диссертации состоит в разработке оригинальных методов, позволяющих лишь на основе стандартной гидрометеорологической информации рассчитывать характеристики рассеивающих способностей атмосферы и, в итоге, построить климатические карты такого рода характеристик применительно к интенсивно развивающемуся в промышленном отношении региону, которые могут найти применение при размещении новых промышленных производств, объектов традиционной и ядерной энергетики и элементов транспортной инфраструктуры.

**Апробация диссертационной работы**

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

- на научных семинарах кафедры метеорологи, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета (2003-2008 гг.).
- на заседании Итоговых сессий Ученого совета РГГМУ (2005, 2006 гг.);
- на заседаниях Международной научной конференции "Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон", СПб, РГГМУ (2005г.);
- на заседании международной конференции "Изменение климата и окружающая среда", СПб, РГГМУ, 06-09.12.2005 г.;

**Публикации:** Основные результаты диссертации опубликованы в 7 печатных работах.

**Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения, списка использованных источников, включающего **63** наименований, и двух приложений. Общий объем работы составляет **129** страницы, включая 63 рисунков и 6 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** рассмотрены существующие проблемы и применяемые в различных странах методы оценки качества атмосферы. Особое внимание уделено природоохранной практике стран Восточного Средиземноморья (Турция, Сирия, Ливан, Египет, Израиль, Палестина, Иордания). Сделан краткий анализ имеющихся в литературе сведений о суммарных выбросах загрязняющих веществ в атмосферу в этих странах и существующих тенденциях такого рода за последние годы.

Загрязнение атмосферы в городах Восточного Средиземноморья, как и южной Европы, за последние десятилетия значительно возросло. По свидетельству Всемирной Организации Здравоохранения (ВОЗ), к числу основных загрязняющих примесей здесь следует отнести окись углерода (СО), оксиды азота ( $\text{NO}_x$ ) и оксиды серы ( $\text{SO}_x$ ). Установлено, что наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха на территории упомянутых стран вносит теплоэнергетика, автотранспорт и химическая промышленность.

Так, например, в Турции, за период 1980 – 2005 гг. суммарный годовой выброс оксидов азота вырос почти в 3 раза, а оксидов серы – примерно в 1.8 раза. Интенсивный рост выбросов в атмосферу отмечен в Ливане: лишь за 3 года с 1997 по 2000гг количество выбросов  $\text{NO}_x$  увеличилось почти в 2.5 раза, а  $\text{SO}_x$  – почти в 3 раза. За последние годы за счет интенсивного расширения автопарка столицы Египта г. Каира, концентрация  $\text{NO}_x$  выросла в несколько раз, что совместно с эффектом непрерывного поступления из прилегающей пустыни взвешенных аэрозолей привело к образованию почти непрерывно висящего над городом облака загрязнения.

Существующий уровень исследований качества атмосферы в этом регионе заметно отстает от стремительного роста загрязнения. Из стран региона в настоящее время системы атмосферного мониторинга существуют лишь в нескольких крупных промышленных центрах, таких, например, как Каир, где в 2001 г. при поддержке западных стран была создана современная система мониторинга атмосферы на базе 42 станций.

Это приводит к необходимости в дополнение к существующим прямым методам измерения чистоты атмосферы развивать и косвенные методы такого рода оценок, основанные на расчетах собственно рассеивающих способностей атмосферы.

За последние десятилетия неоднократно осуществлялись попытки установления некоторых интегральных показателей, характеризующих климатические условия загрязнения атмосферы. Так, Э.Ю. Безуглая (1980) предложила методологию использования такого показателя, как потенциал загрязнения атмосферы (ПЗА). Кроме того, для прогноза неблагоприятных метеорологических условий (НМУ) были сформулированы так называемые «индексы НМУ» для шести групп источников (высокие горячие, высокие холодные, средние горячие, средние холодные, низкие и

специальные низкие) для составления предупреждений предприятий трех степеней опасности. Применительно к потенциально опасным ядерным объектам в этом отношении действует единая методология, сформулированная в документах по безопасности МАГАТЭ, предусматривающая использование таких показателей, как категория устойчивости атмосферы Пэскуилла-Гиффорда, градиент температуры и высота слоя перемешивания.

Для проведения климатологического анализа рассеивающей способности атмосферы для региона Восточного Средиземноморья существует, между тем, проблема информационного обеспечения. Действительно, если сформулировать основные требования к качеству информации об атмосфере, необходимой для расчета перечисленных выше параметров, то можно прийти к следующему перечню:

- значения скорости ветра в приземном слое для использования при расчете индекса НМУ;
- данные о температуре до высоты несколько сотен метров над подстилающей поверхностью с вертикальным разрешением несколько метров для последующей оценки градиента температуры, высоты слоя перемешивания, а также верхней и нижней границ температурных инверсий;
- вертикальные градиенты скорости ветра и температуры для расчета категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда.

Известно, что данные вертикального зондирования атмосферы оказываются недостаточно точными для нижнего слоя тропосферы, поскольку радиозонд не дает возможности корректно оценить вертикальный профиль температуры в нижнем 100-200 м слое и высоту слоя перемешивания, да и производятся они на очень небольшом числе станций зондирования. Другие методы (содарное и лидарное зондирование, высотные градиентные мачты) предоставляют вообще лишь эпизодический материал и непригодны для получения надежной статистики и последующего пространственного анализа.

Скорость ветра в приземном слое атмосферы определяется стандартными измерениями на метеостанциях, остальная дополнительная информация для проведения климатологического анализа рассеивающей способности атмосферы может быть получена двумя способами:

- организация специальных масштабных экспериментальных исследований для каждой территории;
- путем расчета с использованием математических моделей атмосферы на основе стандартной гидрометеорологической информации.

Совершенно очевидно, что первый путь оказывается чрезвычайно затратным и требует длительного времени накопления данных. Реализация альтернативного, второго пути, как раз и является целью настоящего исследования.

**Во второй главе** излагается метод расчета характеристик рассеивающей способности атмосферы на основе численной модели атмосферного пограничного слоя (АПС) и некоторые его уточнения, реализованные в настоящей работе.

Известно, что основным источником экспериментальных данных в части оценки ее рассеивающих способностей (в первую инверсий и категорий устойчивости) до сих пор являлись лишь градиентные измерения в приземном слое, охват вы-

сот которых, как правило, невелик, а накопленных рядов наблюдений оказывается крайне недостаточно для удовлетворения все возрастающих требований практики.

По этой причине возникает проблема разработки таких методов анализа, которые позволили бы использовать для расчета различных климатических характеристик АПС данные стандартных метеорологических наблюдений – единственной информации, которая имеется на настоящий момент в количестве, обеспечивающем получение достоверных статистических оценок. Между тем, они проводятся на одном уровне (температура и влажность измеряются на высоте 2 м, а скорость и направление ветра – 10 м) и, таким образом, впрямую оказываются непригодными изучения вертикальной структуры.

В данной главе предложен и апробирован метод восстановления вертикальной структуры АПС по рядам наблюдений на одном уровне в атмосфере с привлечением физически содержательной численной модели, корректно описывающей суточные колебания. Метод базируется на том очевидном предположении, что именно суточные колебания температуры воздуха, обязанные своим происхождением колебаниям инсоляции, как раз и являются ответственными за формирование вертикальных градиентов температуры в нижней части АПС и, как следствие, определяют вертикальную структуру атмосферной турбулентности, скорости и направления ветра.

В разделе 2.2 данной главы сформулированы исходные уравнения, а в пункте 2.3 – описана модель суточных колебаний. Для АПС над достаточно однородной подстилающей поверхностью систему уравнений динамики для отклонений  $u = U_1 - U_G$ ,  $v = U_2 - V_G$  можно записать:

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K_v \frac{\partial u}{\partial x_3} + 2\omega_2 v \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K_v \frac{\partial v}{\partial x_3} - 2\omega_2 u \quad (2)$$

Здесь ось  $x_1$  декартовой системы координат направлена на восток, ось  $x_2$  – на север, ось  $x_3$  – вертикально вверх,  $U_1, U_2$  – горизонтальные компоненты скорости ветра, а  $U_G, V_G$  – соответствующие компоненты геострофического ветра,  $\omega_2 = \omega \sin \varphi$  ( $\omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\varphi$  – широта).

Особенностью используемого подхода является то, что уравнение для потенциальной температуры  $\theta$  записывается здесь следующим образом:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x_3} + \Psi_\theta \quad (3)$$

где функция  $\Psi_\theta(x_1, x_2, x_3, t)$  – совокупность всех остальных членов уравнения притока тепла, не учитываемых в явной форме в (3). В данной интерпретации это уравнение не представляют собой ничего нового по сравнению с обычным до тех пор, пока не будет указан способ определения этой функции.

В этой связи следует отметить, что за исключением радиационных притоков тепла, все остальные компоненты  $\Psi_\theta$  обусловлены в значительной степени процессами синоптического масштаба, которые охватывают по вертикали весь атмосферный пограничный слой в целом. Что касается первой величины, то, как показали

специальные исследования (А.С. Гаврилов, Д.Л. Лайхтман, 1973 и др.), ее вертикальный профиль имеет целый ряд характерных особенностей, причем максимальные по модулю значения достигаются в непосредственной близости к подстилающей поверхности (за счет интенсивного длинноволнового излучения вследствие значительных локальных градиентов температуры). Если выбрать нижнюю границу области расчета совпадающей с высотой измерения температуры на уровне  $Z_k \approx 2$  м (высота метеобудки), то влияние радиационных притоков тепла на формирование вертикальной структуры поля температуры уже не будет столь существенным.

В отличие от проведенных ранее исследований (И.Н. Липовицкая, 2008г.), где для расчета  $\Psi_\theta(t)$  в уравнении (3) привлекались лишь данные стандартных гидрометеорологических измерений на метеостанциях, в нашей работе предпринята попытка использования для этих целей трехмерных синоптических полей температуры (данные анализа температуры на уровнях 1000, 925 и 850 гПа), синхронизированные по времени с данными метеостанций.

Учитывая, что в имеющихся данных реанализа проявляются суточные колебания температуры, здесь следует предварительно их обработать путем выделения тренда. Для этой цели по данным анализа на стандартных изобарических поверхностях за период несколько суток методом скользящего сглаживания определялся текущий полиномиальный тренд потенциальной температуры:

$$\tilde{\Theta}_m(t) = B_0^{(m)} + B_1^{(m)} t + B_2^{(m)} t^2, \quad (4)$$

где  $m$  определяет здесь номер поверхности ( $m=2$  для 925 гПа,  $m=3$  – для 850 гПа). На нижнем уровне с  $m = 1$  используются данные обработки аналогичным способом результатов измерений на метеостанциях (4).

Определение коэффициентов  $B_i$  осуществляется здесь методом наименьших квадратов из условия минимальной среднеквадратической ошибки представления:

$$\sum_{k=1}^{N_T} \left[ \theta(t_k) - B_0 - B_1 t_k - B_2 t_k^2 \right]^2 = \min(B_i). \quad (5)$$

Дифференцируя это выражение последовательно по  $B_0, B_1, B_2$  и приравнявая результаты нулю, получаем в итоге систему трех линейных уравнений для вычисления необходимых коэффициентов.

Вычисление искомым значений функции  $\Psi_\theta(x_1, x_2, x_3, t)$  осуществляется после линейной интерполяции значений (4) в расчетную сетку модели АПС с координатами сеточных узлов:

$$X_i = X_0 + \Delta_x(i-1); \quad Y_j = Y_0 + \Delta_y(j-1); \quad Z_k = Z_1 \exp[\Delta_h(k-1)], \quad (6)$$

где для горизонтальных координат  $X, Y$  приняты постоянные шаги сетки  $\Delta_x, \Delta_y$ , а для вертикальной координаты  $Z$  – так называемая логарифмическая сетка, в которой постоянным является шаг логарифма высоты  $\Delta_h = \frac{1}{N_z - 1} \ln \left[ \frac{Z_H}{Z_1} \right]$ , причем  $Z_1, Z_H$  – высоты, соответственно нижнего и верхнего уровней расчетной области, а  $N_z$  – число расчетных уровней по вертикали. Величины  $X_0, Y_0$  здесь – координаты нижнего левого угла области расчета.

При этом расчет функции  $\Psi_{\theta}(x_1, x_2, x_3, t)$  для каждого сеточного узла  $(i, j, k)$  здесь может быть произведен следующим образом:

$$\Psi_{\theta}^{ijk}(t) = \left( \frac{\partial \theta}{\partial t} \right)_{ijk}. \quad (7)$$

Над поверхностью суши высота нижнего расчетного уровня принимается равной  $Z_1 = 2$  м и совпадает с высотой измерений в стандартной метеорологической будке. Это дает возможность задавать нижние граничные условия для функции  $\theta(t)$ .

Над поверхностью моря вводился дополнительный уровень – так называемый уровень шероховатости морской поверхности  $Z_w$ , на котором температуру можно полагать совпадающей с температурой поверхности воды в данном сеточном узле  $T_w^y$ . При этом нижнее граничное условие для потенциальной температуры записывалось в форме:

$$\frac{\partial \theta}{\partial x_3} = M_w (\theta_1 - T_w), \quad (8)$$

где  $M_w = 1/Z_1 \ln(Z_1 / Z_w)$ , а для расчета величины  $Z_w$  как функции скорости ветра использовалась известная формула Чарнока.

Схема замыкания уравнений (1) – (3) опиралась на подход, основанный на дополнительном привлечении уравнений для вторых и, частично, третьих моментов одноточечных моментов турбулентных пульсаций, хорошо апробированный и верифицированный применительно к расчету структуры АПС (А.С. Гаврилов, 1986, 1992).

Систему уравнений (1) – (3) следует интегрировать по времени, начиная с некоторого момента  $t_0$ , с заданием фиктивных начальных условий, поскольку фактические сведения о реальной вертикальной структуре АПС отсутствуют.

Для компонент скорости ветра в этом качестве привлекались функции  $u^{st}, v^{st}(x_3)$ , удовлетворяющие стационарному решению уравнений для горизонтальных компонент скорости, а для температуры – линейный профиль потенциальной температуры, получаемый на основе расчета ее среднего градиента  $\gamma_{\theta}$  по данным реанализа на поверхностях 925, 850 и 700 гПа:  $\theta(x_1, x_2, x_3, t_0) = \tilde{\theta}(t_0) + \gamma_{\theta}(x_1, x_2) x_3$ .

В реальных условиях не во всех случаях суточный ход температуры носит «правильный» характер это происходит за счет, прежде всего, резкой смены синоптических условий при прохождении атмосферных фронтов и влияния облачности, которая может существенно исказить суточный ход инсоляции. Понятно, что в этих условиях аппроксимация (4) оказывается неприемлемой и вместо нее следует ограничиться получением путем той или иной формой интерполяции зависимости температуры от времени между сроками наблюдений. Отметим, что подобная ситуация имеет место не более чем в 10 % случаев.

Задание нижних граничных условий для компонент скорости ветра и характеристик турбулентности также в этом случае осуществлять на уровне  $Z_g$ , используя в этом случае соотношения, вытекающие из известных закономерностей вертикальной структуры турбулентности в логарифмическом приземном слое:

$$\frac{\partial u}{\partial x_3} = M_U(u + U_G), \quad \frac{\partial v}{\partial x_3} = M_U(v + V_G), \quad (7)$$

где  $V_m = \sqrt{(u + U_G)^2 + (v + V_G)^2}$  – модуль скорости ветра,  $M_U = 1/Z_\delta \ln(Z_\delta / Z_0)$ , а  $Z_0$  – уровень шероховатости подстилающей поверхности, таблично задаваемый для каждого конкретного типа подстилающей поверхности.

На верхней границе расчетной области  $Z_H$ , заведомо превосходящей высоту распространения суточных колебаний (около 2 км), все отклонения температуры и компонент скорости ветра от своих фоновых значений.

Для верификации предложенного метода применительно к расчету характеристик термической устойчивости АПС привлекались уникальные данные метеорологических наблюдений, осуществляемых в настоящее время на Останкинской телевизионной башне (ОТБ) в г. Москва (температура, влажность, скорость и направление ветра до высоты 500м).

На основе измерений на двух нижних уровнях (82 и 2 м) за период летних месяцев 2006г. рассчитывалось так называемое интегральное число Ричардсона

$Ri = \frac{\beta \Delta \theta \Delta h}{(\Delta U)^2}$ , где  $\beta = g/T$  – параметр плавучести ( $g$  – ускорение свободного падения,  $T$  – температура в шкале Кельвина),  $\Delta h = 80\text{м}$  – толщина слоя, а  $\Delta \theta, \Delta U$  – разности значений потенциальной температуры и скорости в этом слое, соответственно. Результаты сопоставления измеренных и расчетных величин числа  $Ri$  представлены на рисунке 1.

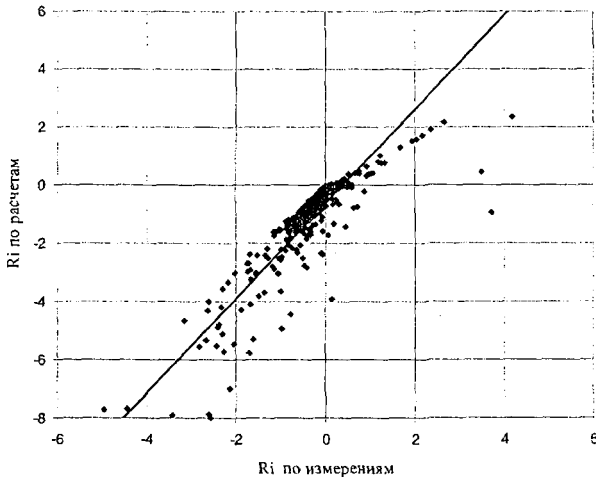


Рисунок 1 – Корреляционный график рассчитанных и измеренных на ОТБ интегральных чисел Ричардсона в слое 2 – 82 м за летний период 2006 г.

Как следует из проведенного статистического анализа, коэффициент корреляции составляет здесь 0.90, что свидетельствует, в целом, о достаточно высокой точности расчетов.

На рисунке 2 представлена рассчитанная за летний период 2006 г диаграмма соответствия категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, рассчитанных с использованием предложенного нами метода и непосредственно из данных градиентных наблюдений скорости ветра и температуры в слое 2 – 82 м на ОТБ. Из представленных результатов следует, что вероятность согласования расчета и измерений с точностью до категории оказывается около 80%, а если включать в число успешных расчетов и по одной соседней категории, то эта цифра достигнет 90 %. Этот результат можно признать вполне удовлетворительным с учетом приближенного характера собственно понятия «категории устойчивости».

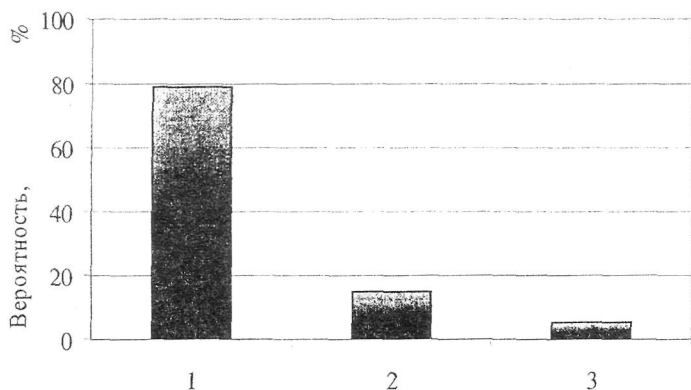


Рисунок 2 – Диаграмма соответствия категорий устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, рассчитанных с использованием модели АПС; 1 – вероятность совпадения с точностью до категории, 2 – с точностью до соседней категории.

Таким образом, разработанная нами методология открывает возможность интеграции разнородной и асинхронной метеорологической информации на основе численной модели АПС для построения климатических карт различного рода практически важных характеристик атмосферного пограничного слоя.

**В третьей главе** представлен климатологический анализ результатов расчетов применительно ко всем странам Восточного Средиземноморья. Исходная информация была получена из общедоступного архива метеоданных для метеостанций, имеющих пятизначные номера Всемирной Метеорологической Организации (ВМО). Для получения необходимой расчетов функции (7) привлекались накопленные за период 2000 – 2006 гг. архивы данных реанализа для Северного полушария в

формате GRIB с сервера национальной Службы Погоды США (National Weather Service, [http://nomad3.ncsr.noaa.gov/cgi-bin/ftp2u\\_6p\\_r2.sh](http://nomad3.ncsr.noaa.gov/cgi-bin/ftp2u_6p_r2.sh)).

Основные направления исследования предусматривали здесь как сравнительный для различных областей региона анализ временной изменчивости характеристик атмосферы, определяющих условия рассеяния антропогенных выбросов, так и пространственный анализ такого рода характеристик.

Результаты общего статистического анализа временной изменчивости этих характеристик атмосферы представлены в разделе 3.5. Наибольшее внимание здесь уделялось изучению параметров приземных инверсий, высоте слоя перемешивания и категориям устойчивости атмосферы.

В качестве примера на рисунке 3 представлена общая повторяемость высоты приземной инверсии в целом для всего региона, а на рисунке 4 – ее суточная изменчивость.

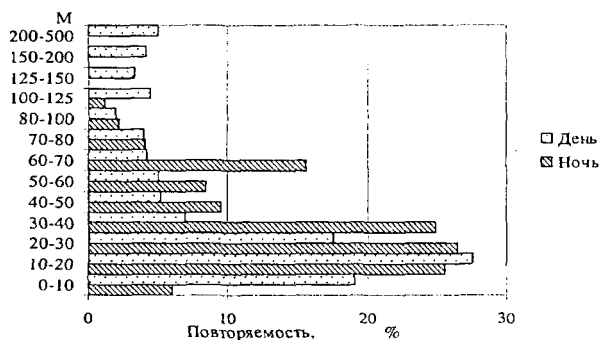


Рисунок 3 – Повторяемость высоты верхней границы инверсии зимой в целом для всего региона Восточного Средиземноморья.

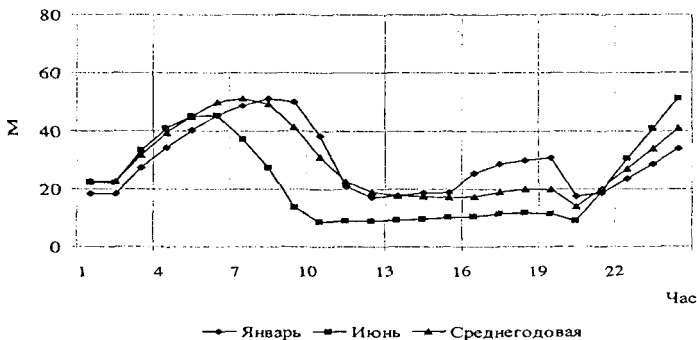


Рисунок 4 – Средняя высота инверсии в течение суток по региону Восточного Средиземноморья

Как можно видеть из приведенных примеров расчетов, кривая среднегодового хода средней высоты инверсии достигает максимума в 08:00, и составляет 55 м. Рост высоты инверсии с 03:00 до 09:00 (с 25 м до 55 м) можно объяснять тем, что в утренние часы после восхода солнца, происходит интенсивный нагрев поверхности, приводящий к развитию конвекции и быстрому разрушению инверсионного слоя. Затем наблюдается некоторое снижение высоты инверсионного слоя до 20 метров.

Еще один пример результатов расчетов высоты приземной инверсии приведен на рисунке 5, из которого можно выявить различия в высотах средних ночных приземных инверсий в северной области рассматриваемого региона (пункт Анталя), в центральной (пункт Хайфа) и южной его областях (пункт Порт-Саид).

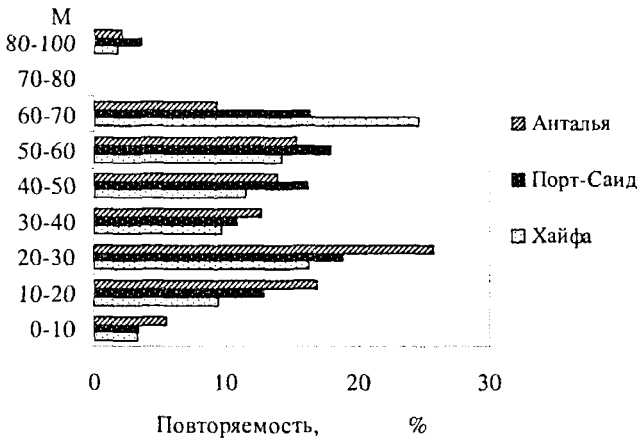


Рисунок 5— Повторяемость высот приземных инверсий ночью в среднем за год по городам Хайфа, Порт-Саид и Анталя.

Как следует из представленных результатов, наибольшую повторяемость на севере и юге региона имеют высоты 20 – 30 м, а в центральной части – около 60 – 70 м. Связано это, вероятно, с проявлением в синоптических процессах данного региона характерного для умеренной зоны Северного полушария западно-восточного переноса, в процессе которого на территорию таких стран, как Израиль и Сирия происходит заток в зимний период теплого морского воздуха со Средиземного моря. Этот эффект, вследствие конфигурации береговой черты, не является характерным для территорий Турции (п. Анталя) и Египта (п. Порт-Саид).

В качестве еще одного примера исследования временной изменчивости, приведем здесь рисунок 6, на котором представлен суточный ход повторяемостей различных категорий устойчивости атмосферы Пэскуилла-Гиффорда в целом для всего региона Восточного Средиземноморья за год.

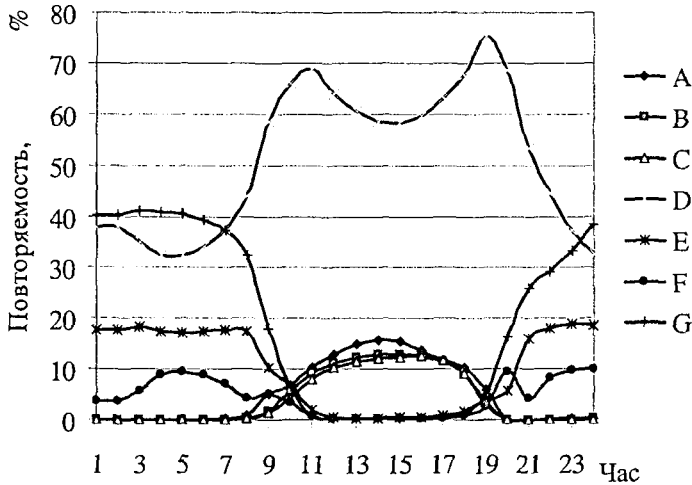


Рисунок 6 – Пример расчета повторяемостей различных категорий устойчивости атмосферы в различные часы суток в среднем за год.

Категории «А» и «В» в этой классификации соответствуют свободной конвекции, «С» – вынужденной, «D» – нейтральной стратификации, «Е», «F» и «G» соответственно, слабой, умеренной и сильной устойчивости атмосферы. Как можно видеть из рисунка, в среднем, примерно в 60% случаев стратификация атмосферы близка к нейтральной, в дневные сроки наблюдений доминируют первые три категории устойчивости (А,В,С), а в ночные – последние (Е, F и G).

Наконец, в разделе 3.6 представлены результаты пространственного анализа расчетных характеристик рассеивающих способностей атмосферы.

Пространственный анализ осуществлялся с использованием метода сплайновой интерполяции результатов расчетов тех или иных параметров на каждой из метеостанций, данные которых использовались в расчетах. С учетом того, что значительную территорию изучаемой области занимает морская поверхность, на которой метеорологических станций нет, предполагалось, что здесь суточный ход температуры отсутствует полностью, а все остальные необходимые метеорологические параметры могут быть получены из данных аэросиноптического реанализа атмосферных процессов в узлах регулярной сетки. В отличие от суши, здесь дополнительно

привлекались также и данные о температуре подстилающей поверхности, задаваемой в градусной сетке  $1^\circ \times 1^\circ$ , также имеющиеся в нашем распоряжении.

В качестве исходных данных для расчета привлекаются ряды наблюдений на метеостанциях и данные реанализа на стандартных изобарических поверхностях. Свойства подстилающей поверхности, необходимые для расчета (суша-море, шероховатость поверхности) задаются с помощью слоев электронной карты территории, поддерживаемой в ГИС ArcView 3.2.

На начальном этапе производится совмещение всех исходных данных в точках проведения расчетов. Для поверхности суши в качестве таких точек выбрано местоположение метеостанций, куда из градусной сетки реанализа ( $2,5^\circ \times 2,5^\circ$ ) переносились синхронизированные по времени сведения о значениях температуры на стандартных изобарических поверхностях.

Далее, для выбранных точек расчета с использованием описанной выше методологии восстанавливались фоновые характеристики атмосферы и для каждого суток за изучаемый период путем интегрирования уравнений модели на каждый час восстанавливалась вертикальная структура АПС, и рассчитывались искомые характеристики наблюдаемости.

На следующем этапе производилась статистическая обработка результатов, полученных на каждый час суток за выбранный временной период анализа (месяц, сезон, года, день или ночь).

После проведения подобного цикла расчетов для каждой изучаемой точки области, производился пространственный анализ и осуществлялась интерполяция статистических характеристик в узлы регулярной сетки с шагом, достаточным для последующей векторизации расчетных полей (около 50 км).

На завершающем этапе расчетов, построенное таким образом растровое поле преобразовывалось в векторное с использованием специальной процедуры векторизации и с получением, в итоге, ГИС-покрытия той или иной рассчитываемой характеристики.

В итоге сопряжения всех этих источников информации восстанавливалась единая для всей территории карта тех или иных статистических характеристик, которые подготавливались непосредственно в обменных форматах (\*.SHP) ГИС Arcview 3.2, графические изображения которых и анализируются в диссертации.

Один из примеров такого рода рассчитанных карт представлен на рисунке 7, где демонстрируется пространственный анализ расчетных значений повторяемостей образования на всей территории региона в течение всего года приподнятых инверсий температуры, ограничивающих сверху так называемый «слой перемешивания».

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

1. Проведено уточнение разработанной ранее численной модели атмосферного пограничного слоя применительно к расчету характеристик рассеивания в направлении учета в модели трехмерного аэросиноптического фона, получаемого на основании данных реанализа атмосферных процессов.
2. Результаты верификации численной модели путем сопоставления с данными измерений на Останкинской телебашне позволили оценить

точность расчета характеристик вертикальной структуры поля температуры и скорости ветра, а также характеристик устойчивости атмосферы. Показано, что коэффициент корреляции между расчетными и измеренными значениями интегрального числа Ричардсона составляет величину 0,9, а вероятность точной оценки категории устойчивости – 80 %.

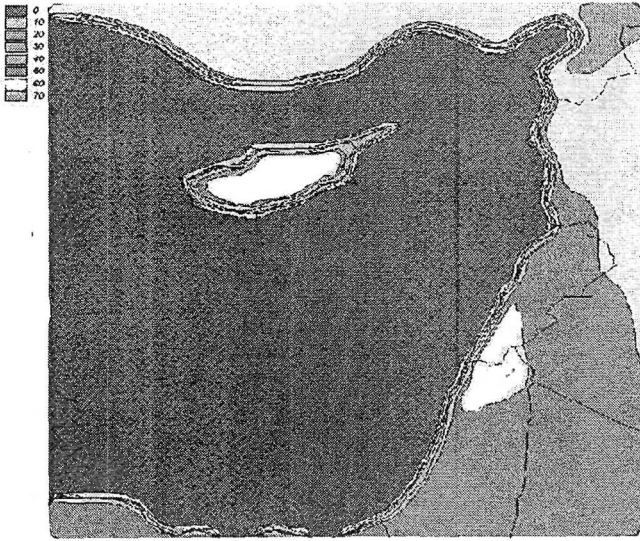


Рисунок 7 – Расчетная повторяемость образования в течение года приподнятых инверсий.

3. Проведен комплексный статистический анализ характеристик атмосферы, определяющих ее рассеивающие способности, который показал, что такого рода характеристики атмосферы имеют в регионе Восточного Средиземноморья выраженный суточный ход.
4. Проведен пространственный анализ и рассчитан комплект электронных климатических карт основных характеристик атмосферы, определяющих ее рассеивающие способности, на основании которых удалось выявить закономерности пространственной изменчивости этих характеристик в изучаемом регионе.

**Основные публикации по теме диссертации.**

**Статьи в изданиях 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, Алталули Р.)

**Статьи в научно-технических сборниках**

2. Моделирование атмосферного пограничного слоя применительно к проблемам климатологии. // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз.темат.сб.тр., вып.12. / СПбГАСУ. – СПб.,2006, – с. 23-31 (соавторы Липовицкая И.Н., Василенко С.В., Гаврилов А.С).
3. Метод климатологического анализа вертикальной структуры атмосферного пограничного слоя с использованием численной модели. // Ученые записки № 2. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2006.- с.74-87 (соавторы Липовицкая И.Н., Василенко С.В., Гаврилов А.С).
4. Некоторые результаты климатический восточного средиземного моря. // Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ: Межвуз.темат.сб.тр., вып.12. / СПбГАСУ. – СПб.,2006, с. 31- 35.
5. 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 Алталули Р., Гаврилов А.С).

**Публикации в материалах конференций**

6. Метод расчета карт потенциала загрязнения атмосферы города Москвы и его окрестностей // Экологические и гидрометеорологические проблемы больших городов и промышленных зон. Международная научная конференция 25-27 мая 2005. Материалы конференции / СПб.: изд. РГГМУ, 2005. с. 13-14. (соавторы Гаврилов А.С., Баранова М.Е.).
7. Метод расчета метеорологического потенциала загрязнения атмосферы для крупного города. Международной конференции "Изменение климата и окружающая среда", СПб, РГГМУ, 06-09.12.2005 г.; с. 107-108. (соавторы Баранова М.Е, Алталули Р.)

Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИТ «АСТЕРИОН»  
Заказ № 142. Подписано в печать 14.05.2009 г. Бумага офсетная.  
Формат 60x84<sup>1</sup>/<sub>16</sub>. Объем 1,25 п. л. Тираж 100 экз.  
Санкт-Петербург, 191015, а/я 83, тел. /факс (812) 275-73-00, 970-35-70  
asterion@asterion.ru