

39

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

На правах рукописи

УДК 551 510 42

Липовицкая Ирина Николаевна

**КЛИМАТОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ  
ХАРАКТЕРИСТИК РАССЕЯНИЯ ПРИМЕСЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
ЧИСЛЕННЫХ МОДЕЛЕЙ ПРИМЕНИТЕЛЬНО К СЕВЕРО-ЗАПАДНОМУ  
РЕГИОНУ РОССИИ**

Специальность 25 00 30 – метеорология, климатология, агрометеорология

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертации на соискание ученой степени  
кандидата географических наук

Санкт-Петербург  
2008



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	Заслуженный эколог Российской Федерации, профессор, доктор географических наук, Д М Белов  Кандидат физико-математических наук, А Г Попов
Ведущая организация	Научно-исследовательский центр экологической безопасности Российской Академии Наук (НИЦЭБ РАН)

Защита диссертации состоится “26” июня 2008 г в 15 часов 30 минут на заседании диссертационного совета Д 212 197 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 “26” мая 2008 г

Ученый секретарь  
диссертационного совета,



доктор физ - мат наук,  
профессор, А Д Кузнецов

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность работы.** Северо-Западный регион (СЗР) России сформировался за последние десятилетия как крупная промышленно развитая территория, в которой сосредоточены как промышленные предприятия и объекты энергетики (в том числе ядерной), так и объекты транспортной инфраструктуры. Можно ожидать, что строительство и реконструкция портовых сооружений в Финском заливе (Санкт-Петербург, Приморск, Усть-Луга) в ближайшие годы приведет к значительному увеличению транспортных потоков.


Все это вместе делает СЗР чрезвычайно перспективным в плане размещения новых промышленных предприятий, а значит, росту и перераспределению по территории региона антропогенной нагрузки на окружающую среду, в том числе и источников выбросов загрязняющих веществ в атмосферу. Перспективное планирование такого рода размещения требует помимо всего прочего также и оценку рассеивающих способностей атмосферы.

Между тем, ранее интенсивно проводимые полевые исследования в этом направлении (Берлянд М. Е., 1975) в последние десятилетия в связи с экономическими проблемами оказались практически свернутыми, причем даже при условии их возобновления, на получение необходимой по количеству и качеству информации требуются не одно десятилетие.

Вышесказанное 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 проведение комплекса расчетов основных параметров, определяющих рассеивающие свойства атмосферы, применительно к Северо-Западному региону РФ, статистический анализ результатов и построение, в итоге, набора климатических карт этих параметров для всей территории СЗР.

**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 применительно к СЗР,
  - 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 СЗР.
- 

**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 Северо-Западного региона РФ 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 Метод расчета характеристик рассеивающей способности атмосферы на основании стандартной метеорологической и аэросиноптической информации, а также результаты его верификации применительно к Северо-Западному региону РФ

2 Результаты статистического анализа временной изменчивости характеристик рассеивающей способности атмосферы на различных территориях СЗР

2 Климатические карты характеристик рассеивающей способности атмосферы для всего Северо-Западного региона РФ

**Обоснованность и достоверность результатов** подтверждаются строгой математической постановкой задачи численного моделирования АПС, результатами верификации модели АПС применительно к СЗР, а также 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, 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 научном семинаре кафедры метеорологии, климатологии и охраны атмосферы Российского государственного гидрометеорологического университета
- Итоговых сессиях ученого совета РГГМУ, (2005, 2006 гг )
- На заседании Международной конференции “Климат и биоклимат городов”, Польша, Лодзь, ноябрь 2007г
- На заседании Международной школе-конференции “Экология, климат, туризм”, Германия, г Бад Хинделанг, апрель 2008г

**Публикации:** Основные результаты диссертации опубликованы в 5 печатных работах

**Структура и объем работы:**

Диссертация состоит из введения, трех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 103 наименований. Общий объем работы составляет 115 страницы, включая 57 рисунков и 4 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 физико-географическое положение и особенности климатического режима Северо-Западного региона России (СЗР). В физико-географическом отношении СЗР соответствует северной части Восточной Европы, где преобладает равнинный рельеф и умеренно-континентальный климат. Доминантной физико-географической чертой служит таежный тип ландшафтов, однако значительная площадь относится к тундре и лесотундре.

Климату СЗР присущи черты континентальности. На основной территории СЗР климат определяется влиянием морских воздушных масс, приходящих с Атлантического океана и вызывающих повышение зимних температур. Таким образом, основная закономерность состоит в увеличении амплитуды температур в долготном направлении (от 25 до 34 °С), в основном, за счет понижения зимних температур. Другой фактор – это влияние полярных морей. Оно проявляется, главным образом, в теплое время года, когда резко выражено охлаждающее действие морских вод. Здесь континентальность климата ослабляется за счет понижения летних температур. Кроме того, характерной особенностью климата СЗР является избыточное увлажнение. Высокой влажности и частым осадкам сопутствует преобладание пасмурной погоды, особенно в холодное время года. Среди неблагоприятных свойств климата можно отнести довольно частые туманы. Кроме того, для территории СЗР характерны довольно сильные ветры.

Особый аспект экологического исследования и оценки климата связан с его влиянием на способность атмосферы к самоочищению от вредных примесей, главным образом, техногенных загрязнений. Условия переноса, рассеивания вредных атмосферных примесей зависят от силы ветра, температурных инверсий, туманов, а также от солнечной радиации и температуры воздуха, влияющих на фотохимические реакции и образование вторичных продуктов загрязнения.

Наибольший вклад в загрязнение атмосферного воздуха на территории СЗР вносит теплоэнергетика, автотранспорт, химическая промышленность и предприятия черной металлургии. Здесь сосредоточено большое количество предприятий, использующих радиоактивные материалы. В данном регионе находятся Ленинградская, Кольская и Калининская АЭС.

За последние десятилетия неоднократно осуществлялись попытки установления некоторых интегральных показателей, характеризующий климатические условия загряз-

нения 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) Применительно к потенциально опасным ядерным объектам в этом отношении действует единая методология, сформулированная в документах по безопасности МАГАТЭ и реализованная в соответствующих отечественных методиках (МПА-98, ДВ-98), предусматривающих использование таких показателей, как категория устойчивости атмосферы Пэскулла-Гиффорда, градиент температуры и высота слоя перемешивания

Для проведения климатологического анализа рассеивающей способности атмосферы для Северо-Западного региона России 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 высоты слоя перемешивания, а также верхней и нижней границ температурных инверсий,
- вертикальные градиенты скорости ветра и температуры для расчета категорий устойчивости Пэскулла-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

Что касается скорости ветра в приземном слое, то она определяется стандартным способом на метеостанциях, а вот 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)

Экспериментальные и теоретические исследования вертикальной структуры АПС имеют длительную историю (например, Зилитинкевич С С, 1970, Лайхтман Д Л, 1970, Берлянд М Е, 1975 и другие) Существенно, однако, что основным источником экспериментальных данных в этих исследованиях до сих пор являлись лишь градиентные измерения в приземном слое, охват высот 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 данных 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 для изучения вертикальной структуры

В данной главе изложен 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, обусловленные своим происхождением колебаниями 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 разделах 2.2-2.3 данной главы сформулированы исходные уравнения модели АПС Как известно для АПС над достаточно однородной подстилающей поверхностью систему уравнений динамики для отклонений  $u = U_1 - U_G$ ,  $v = U_2 - V_G$  можно записать следующим образом

$$\frac{\partial u}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_1} K_v \frac{\partial u}{\partial x_1} + 2\omega_z v = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_3} K_v \frac{\partial v}{\partial x_3} - 2\omega_z u = 0 \quad (2)$$

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,  $\omega_z = \omega \sin \varphi$  ( $\omega$  – угловая скорость вращения Земли,  $\varphi$  – широта)

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

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x_1} K_\theta \frac{\partial \theta}{\partial x_1} + \Psi_\theta \quad (3)$$

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 (Гаврилов А С, Лайхтман Д Л, 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  $Z_B = 2$  м, то влияние радиационных притоков тепла на формирование вертикальной структуры поля температуры уже не будет столь существенным.

Все это дает основание в первом приближении пренебречь зависимостью  $\Psi_\theta$  от координат и рассматривать ее лишь как функцию времени

$$\Psi_\theta(t) \equiv \frac{d\tilde{\theta}}{dt}, \quad (4)$$

где осредненное значение потенциальной температуры  $\tilde{\theta}(t)$ , изменения которой обусловлено лишь процессами синоптического масштаба, допустимо определять путем сглаживания рядов соответствующих наблюдений в приземном слое.

Схема замыкания уравнения (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 (Гаврилов А С, 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  $\theta(x_3) = \tilde{\theta}(t_0) + \gamma_\theta x_3$ , где градиент потенциальной температуры в нижней тропосфере  $\gamma_\theta$  вычислялся для точки местоположения каждой метеостанции с использованием архива реанализа метеорологических процессов по данным на поверхностях 850 и 700 гПа.

Для решения задач по оценке климатических характеристик АПС предполагается интегрировать уравнение переноса тепла с заданием нижнего граничного условия для температуры на уровне будки  $Z_B$  в форме зависимости

$$\begin{aligned} \theta(Z_B, t) &= \tilde{\theta}(t) + \vartheta_B(t) \\ \vartheta_B(t) &= A_\theta F(t | t_\theta, t_m) \end{aligned} \quad (5)$$

где  $\tilde{\theta}(t)$  - функция тренда температуры,  $A_\theta$  - значение амплитуды суточного хода температуры,  $F(t | t_\theta, t_m)$  - некоторая функция времени, параметрически зави-

сящая также от времени восхода Солнца  $t_{\odot}$  (астрономическая величина) и времени наблюдаемого максимума температуры на уровне будки  $t_m$  (климатическая величина)

Собственно функция  $F(t | t_{\odot}, t_m)$  задается следующим образом

$$\begin{aligned} \text{для } t_{\odot} \leq t \leq t_m \quad F(t) &= \frac{1}{2} \cos \left[ \frac{\pi(t-t_m)}{(t_m-t_{\odot})} \right], \quad 0 \leq t \leq t_{\odot} & F(t) &= \frac{1}{2} \cos \left[ \frac{\pi(24+t-t_m)}{24-t_m+t_{\odot}} \right] \\ t_m \leq t \leq 24 \quad F(t) &= \frac{1}{2} \cos \left[ \frac{\pi(t-t_m)}{24-t_m+t_{\odot}} \right] \end{aligned} \quad (6)$$

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 искажать суточный ход инсоляции. Понятно, что в этих условиях аппроксимация (5) оказывается неприемлемой и вместо нее следует ограничиться получением  $\vartheta_b(t)$  путем той или иной формы интерполяции зависимости температуры от времени между сроками наблюдений.

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

$$\frac{\partial u}{\partial x_1} = M_v(u + U_G), \quad \frac{\partial v}{\partial x_1} = M_v(v + V_G), \quad (7)$$

где  $V_m = \sqrt{(u + U_G)^2 + (v + V_G)^2}$  - модуль скорости ветра,  $M_v = 1/Z_b \ln(Z_b/Z_0)$ , 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 принимаются равными нулю.

Существенно, что фоновые значения скоростей ветра  $U_G, V_G(t)$  являются в данном случае неизвестными. Это отличает данную постановку задачи климатологического расчета от сходных задач метеорологического анализа или прогноза, где эти величины могут быть рассчитаны из соответствующих полей давления с помощью компонент геострофического ветра. Эти функции приходится определять по значениям компонент скорости  $U_{\phi}, V_{\phi}(t)$  ветра на уровне флюгера  $Z_{\phi}$ , получаемых путем процедуры интерполяции данных наблюдений за стандартные синоптические сроки (минимум 4 срока наблюдений) с привлечением метода сплайнов. При этом справедливы следующие очевидные соотношения

$$U_G(t) = U_{\phi}(t) - u(Z_{\phi}, t) \quad V_G(t) = V_{\phi}(t) - v(Z_{\phi}, t) \quad (8)$$

где  $u, v(Z_{\phi}, t)$  - текущие значения отклонений компонент скорости ветра от своих фоновых значений, получаемые в результате интегрирования уравнений динамики (1)-(2). При этом, естественно, учитывается нелинейный характер данных уравнений

и граничных условий (7) в связи с зависимостью входящих в них величин от фоновых значений скорости ветра

Для расчета функции тренда  $\bar{\theta}(t)$  испытывались следующие методы

- фильтрация фрагмента ряда с помощью того или иного цифрового фильтра,
- построение полиномиального тренда с определением коэффициентов методом наименьших квадратов (МНК)

Расчет функции-тренда производится путем специального вида фильтрации фрагмента исходного ряда температуры для каждой станции

$$\bar{\theta}(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} \Omega(t - \tau) \theta(\tau) d\tau \quad (9)$$

где  $\Omega(\eta)$  - функция цифрового фильтра, удовлетворяющая условию нормировки

Подбор функции фильтра требуется осуществить таким образом, чтобы минимизировать погрешность аппроксимации суточных колебаний с помощью формул (5)

Всего рассматривались три модели цифрового фильтра

- 1 Прямоугольный  $\Omega(x) = \begin{cases} 1/\Delta & \text{при } |x| < \Delta \\ 0 & \text{при } |x| > \Delta \end{cases}$ ,
- 2 Треугольный  $\Omega(x) = \begin{cases} \frac{2}{\Delta} - |x| & \text{при } |x| < \Delta/2 \\ 0 & \text{при } |x| > \Delta/2 \end{cases}$ ,
- 3 Полосовой фильтр нижних частот  $\Omega(x) = \frac{1}{\pi x} \sin \frac{2\pi}{\Delta} x$

Характерное окно сглаживания  $\Delta$  требуется подобрать в диапазоне 1-3 суток (24-72 часов) таким образом, чтобы среднеквадратическая погрешность аппроксимации реального ряда значений температуры формулами была минимальной

Для представления полиномиального тренда на фрагменте ряда длиной  $\Delta$  в этом случае использовалось следующее выражение

$$\bar{\theta}(t) = B_0 + B_1 t + B_2 t^2 \quad (11)$$

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

$$\sum_{k=1}^{N_T} \left[ \theta(t_k) - B_0 - B_1 t_k - B_2 t_k^2 \right]^2 = \min(B_i) \quad (12)$$

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

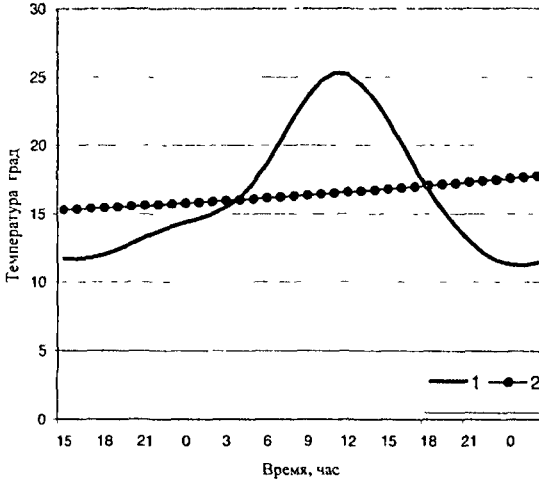


Рисунок 1 - Пример выделения гармоник суточных колебаний (1-  $\vartheta_B(t)$ , 2 -  $\tilde{\vartheta}(t)$ ) прямоугольный фильтр ( $\Delta=36$  час)

В связи с тем, что в последние годы многие метеостанции перешли на сокращенный 4-х срочный режим наблюдений (0,6,12 и 18 часов по Гринвичу), излагаемая в данной работе методика расчетов была ориентирована именно на этот режим. Величина  $A_\theta$  в (5) определялась при этом методом наименьших квадратов с использованием выборки значений температуры за указанные 4 срока наблюдений за каждые сутки. При этом эту величину вычисляли таким образом, чтобы сумма квадратов отклонений была минимально возможной

$$\sum_{k=1}^4 [\theta(t_k) - \tilde{\theta}(t_k | \Delta) - A_\theta F(t_k | t_\ominus, t_m)]^2 = \min(A_\theta) \quad (13)$$

Дифференцируя это выражение по  $A_\theta$  и приравнявая результат к нулю получим следующее выражения для расчета этой величины

$$A_\theta = - \frac{\sum_{k=1}^4 [\theta(t_k) - \tilde{\theta}(t_k | \Delta)] F(t_k | t_\ominus, t_m)}{\sum_{k=1}^4 F^2(t_k | t_\ominus, t_m)} \quad (14)$$

Вычислив, таким образом, значение амплитуды для каждого полного 4-х срочного фрагмента ряда для каждой станции рассчитывалась средняя невязка аппроксимации (12) как функция  $\Delta$

$$\Psi(\Delta) = \frac{1}{4N} \sum_{n=1}^{n=N} \sum_{k=1}^4 [\theta(t_k) - \tilde{\theta}(t_k | \Delta) - A_\theta^* F(t_k | t_\ominus, t_m)]^2 \quad (15)$$

где  $N$  - общее количество дней за весь период наблюдений, для которого имеется полный набор сроков Величина  $\Delta$  при этом определялась таким образом, чтобы функция (15) приняла минимальное значение

В разделе 2.7 приведены результаты верификации предложенного метода применительно к расчету характеристик рассеяния примесей для Северо-Западного региона России Данное исследование являлось составной частью общей схемы верификации модели АПС, которая предусматривала привлечение как существующих архивов наблюдений, так и осуществление специальных наблюдательных программ

Применительно к Северо-Западному региону оценка успешности расчета категории устойчивости атмосферы производилась на основе архива данных градиентных наблюдений на метеомачте, установленной на метеоплощадке ГУ ЛЦГМС (СПб, Профессора Попова, д 48) и входящей составной частью в систему городского мониторинга Расчет по модели производился по суточным циклам измерений на одном уровне (10м) Общий ряд наблюдений насчитывал 7865 случаев за период с 2 августа 1999г до 1 августа 2000 г

В результате сравнительных расчетов было показано, что предложенный метод в 80% всех случаев обеспечивает полное совпадение расчетных и полученных из градиентных наблюдений категорий устойчивости, а в 90% всех случаев дает совпадение с учетом попадания в соседние градации

Кроме того, для верификации привлекались градиентные измерения температуры, полученные с использованием автоматической метеостанции АМС-1, расположенной на территории Кольской АЭС

В качестве исходной метеорологической информации использовались данные наблюдений АМС-1 с измерениями температуры и скорости ветра на уровнях 2 и 10м, расположенной в районе промплощадки Кольской АЭС, а также данные наблюдения метеостанции Мурманского УГМС, расположенной в нескольких километрах от станции Архив данных АМС-1 за период 2000-2006 годов содержит результаты наблюдений за основными метеоземлементами с дискретностью 10 минут, а архив данных метеостанции Зашеек - стандартный набор метеорологической информации за синоптические сроки наблюдений

Фактические категории устойчивости Пэскуилла - Гиффорда оценивались здесь по данным градиентных измерений, а для расчета по модели АПС привлекались 4-х срочные наблюдения на метеостанции

На рисунке 2 приведен пример рассчитанных тем и иным способом значений повторяемости различных категорий устойчивости, которое демонстрирует вполне удовлетворительное согласие

Таким образом, из полученных результатов следует, что применяемый метод расчета категории устойчивости с использованием информации только с одного уровня измерений в приземном слое вполне может заменить градиентные измерения, в том случае, если они отсутствуют

Это дает основание для использования адаптированной модели АПС применительно к климатическим расчетам для массовой обработки

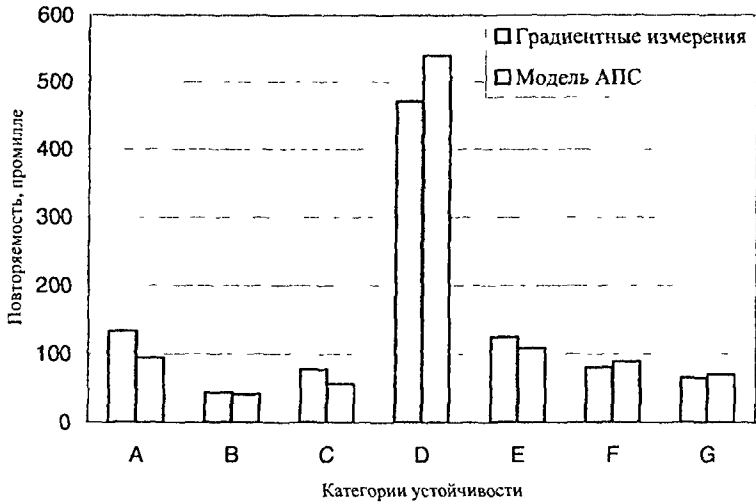


Рисунок 2 - Пример сопоставления повторяемостей расчетных значений категорий устойчивости атмосферы с использованием двух методов за период 2000-2006 гг

**В третьей главе** представлен климатологический анализ результатов расчетов применительно ко всему Северо-Западному региону. Исходная информация была получена из общедоступного архива метеорологических данных для метеостанций, имеющих пятизначные номера Всемирной Метеорологической Организации (ВМО). Для получения необходимого для расчетов среднего градиента потенциальной температуры на поверхностях 850 и 700гПа применялись данные «реанализа» за период 2000-2005 гг.

Для решения поставленных в работе задач был проведен общий статистический анализ результатов, построены и проанализированы климатологические карты данного региона.

Как уже отмечалось, одним из основных метеорологических явлений, влияющих на рассеивающую способность атмосферы, является инверсия. Представленные в работе графики временной изменчивости показывают, что максимальные высоты верхней границы инверсий (ВГИ) наблюдаются в зимнее время года в утренние и, чаще, в вечерние часы, составляя при этом не более 60 м. В летнее время года максимальная высота ВГИ отмечается в утренние часы, когда она достигает высоты более 50 м. Эти результаты важны при оценке условий рассеивания примесей от низких и высоких источников.

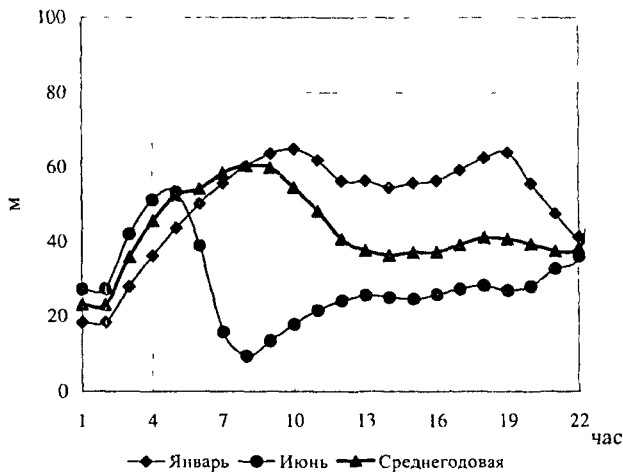


Рисунок 3 - Пример расчетного и осредненного по всем метеостанциям СЗР суточной ВГИ

Оценка высоты ВГИ по результатам стандартных метеорологических измерений в Архангельске, Санкт-Петербурге, Твери выявили пространственную неоднородность характеристик инверсии. В зимнее время года наиболее мощные инверсии и с наибольшей повторяемостью наблюдаются в Твери (южные области изучаемого района). В ночные часы повторяемость инверсии здесь, однако, несколько меньше, чем в Санкт-Петербурге и Архангельске.

Далее, на основе расчетов был выполнен сравнительный анализ суточного хода повторяемости различных классов устойчивости атмосферы в таких городах как Архангельск, Санкт-Петербург и Тверь. Результаты показали, что наиболее устойчивая атмосфера имеет место в районе Санкт-Петербурга в ночные часы летнего времени года (около 80% случаев класса устойчивости E - слабо устойчивая стратификация), а также в зимнее время в ночные часы и класса F (умеренно устойчива) в дневные часы (рисунок 3).

В разделе 3.3 представлен анализ пространственного распределения инверсий на всей территории Северо-Западного региона России.

В зимних условиях в исследуемом регионе высока повторяемость всех видов инверсий (от 70 до 80%). Области наибольших повторяемостей инверсий – на севере распределяется вдоль побережья и занимают все южные области.

Минимум повторяемости инверсий в зимний период отмечаются на северо-западе Карелии и на востоке Вологодской области. В остальных областях повторяемость инверсий растет, достигая максимума на севере, вдоль побережья Белого моря, и на юге, очерчивая Центральную часть России. И на юго-западе района, повторяемость инверсий достигает максимума – 85%.

Образование инверсий температуры со слабым ветром формируют, как известно, застойные явления, т.е. условия для скопления выбрасываемых примесей вблизи источника загрязнения.

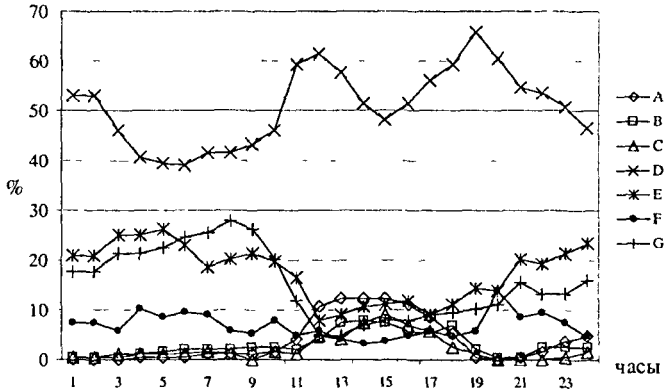


Рисунок 3 – Пример расчета суточного хода повторяемости классов устойчивости для Санкт-Петербурга, зима

Исследования показали, что наименьшая повторяемость застойных явлений отмечается на севере, вдоль морского побережья (рисунок 4)

Вероятность застоев в Карелии, Ленинградской области, а также западной части Архангельской, Вологодской и Костромской увеличивается в 2-2,5 раза, по сравнению с северным побережьем (северо-западная часть Архангельской области). Такое распределение застойных явлений объясняется наибольшей повторяемостью слабых ветров. Несмотря на то, что в зимний период высока повторяемость инверсий, повторяемость застойных явлений не превышает 25 %, т.к. в это время мала повторяемость слабых ветров, необходимых для формирования застойных явлений. Максимальная повторяемость застойных явлений возможна в том же районе (Карелия, Онега), что и максимальная повторяемость слабого ветра.

Велика вероятность застойных явлений (20 %) также в районе большой повторяемости слабых ветров – восточная часть Карелии, Ленинградская область, а также восток Архангельской и Вологодской областей, Костромская область. Рост повторяемости застойных явлений на юго-западе исследуемого района (юг Псковской области и юго-запад Тверской) объясняется в основном, большой повторяемостью здесь инверсий.

Отдельно рассмотрено пространственное распределение повторяемости слабого ветра в зимний и летний периоды года.

Средняя скорость ветра меняется от 2 до 4х метров в секунду, при этом максимальные скорости ветра отмечаются вдоль побережья Белого моря, области минимальной скорости ветра в районе г. Петрозаводск (Карелия) (2 м/с), а область со скоростью до 2,5 м/с – Карелия и западная часть Ленинградской и Вологодской областей, а также центральная часть Архангельской и север Вологодской. Изолинии направлены вдоль побережья.

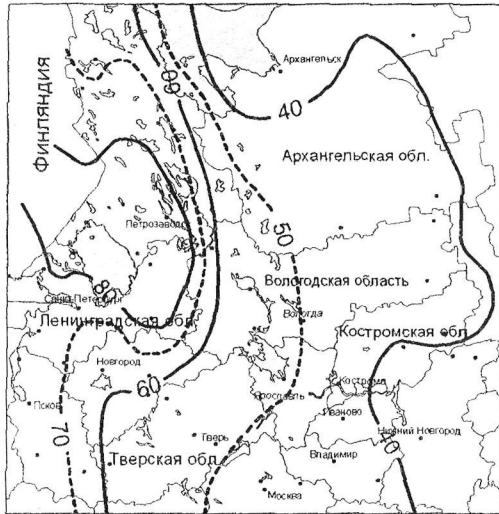


Рисунок 4. Пример пространственного анализа применительно к СЗР повторяемости средней высоты инверсии в летний период.

Наибольшая повторяемость слабого ветра – Карелия, район Онежского озера, север Ленинградской области и западной части Архангельской области. Минимальные повторяемости слабого ветра – в районе Ярославской, Костромской областей, а также в районе Иваново и Нижнего Новгорода.

Заключительным этапом исследований было изучение пространственного распределения потенциала загрязнения атмосферы (ПЗА) и индекса неблагоприятных метеорологических условий для низких, средних и высоких источников.

Особенности пространственного распределения ПЗА объясняется, главным образом, пространственным распределением малых скоростей ветра. Наибольшие значения ПЗА отмечаются на севере Карелии и в центральной и северных частях Архангельской области.

Минимальные значения ПЗА имеют место в южных районах исследуемого региона, где наблюдаются и минимальная повторяемость слабого ветра.

Линии равных значений ПЗА имеют в основном широтное распределение. Исключение составляет побережье Белого моря, что связано с тем, что здесь, несмотря на малую повторяемость слабого ветра и довольно большие скорости ветра, велика повторяемость инверсий и застойных явлений.

Повторяемость НМУ зависит преимущественно от повторяемости инверсий. Расчеты показали меридиональное распределение максимальных значений вероятности первых двух категорий НМУ, возрастающих с востока рассматриваемой области на запад.

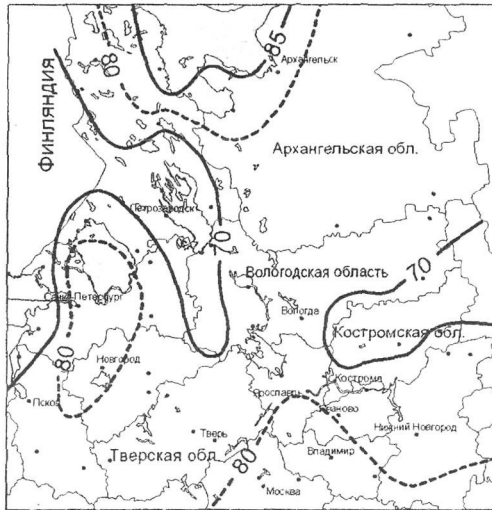


Рисунок 5 Пример пространственного анализа повторяемости НМУ для высоких источников, зимний период

**В Заключение** сформулированы основные результаты и выводы из проделанной работы.

1. Исходя из сложившейся практики принятия управленческих решений в области природопользования, составлен перечень параметров, характеризующих рассеивающие способности атмосферы.
2. Показано, что для расчета наиболее важных из них, таких как параметры приземной и приподнятой инверсии, высоты слоя перемешивания и категории устойчивости Пэскуилла-Гиффорда, требуются сведения о вертикальной структуре температуры до высот 500м с высоким пространственным разрешением.
3. Сделан вывод, что для расчета указанных характеристик вертикальной структуры поля температуры требуется либо организация на территории СЗР масштабных многолетних экспериментальных исследований, либо разработка методов восстановления профиля температуры с использованием численной модели АПС на основе доступной стандартной метеорологической информации.
4. Осуществлена адаптация разработанной ранее численной модели АПС к расчету характеристик рассеивания на основании архива доступной стандартной метеорологической информации применительно к территории СЗР.

5 С использованием имеющихся для территории СЗР фрагментарных данных градиентных наблюдений произведена верификация используемой модели АПС

6 Сформированы архивы исходных данных стандартных метеорологических и аэросиноптических данных за период 2000-2006 гг применительно к расчетам необходимых характеристик рассеивающей способности атмосферы на территории Северо-Западного региона с использованием численной модели АПС

7 Осуществлен комплекс массовых расчетов, сформированы архивы необходимых параметров в объеме, достаточном для последующего статистического анализа

8 На основе сформированных архивов расчетных характеристик проведен статистический анализ временной изменчивости и пространственный анализ параметров, определяющих рассеивающие способности атмосферы, применительно ко всей территории Северо-Западного Региона

#### Основные публикации по теме диссертации.

- 1 Липовицкая И Н, Гаврилов А С Моделирование процессов точечного загрязнения подстилающей поверхности от аварийных выбросов // В межвуз темат сб тр Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, вып 7 - СПбГАСУ – СПб, 2001 – С 149-154
  - 2 Липовицкая И Н Моделирование загрязнения атмосферы от аварийных выбросов // Материалы II Международной научной конференции “Историческая география, геоэкология и природопользование новые направления и методы исследования” – СПб Изд-во РГГМУ, 2002 - С 97-99
  - 3 Липовицкая И Н, Василенко С В, Гаврилов А С, Мханна А Моделирование атмосферного пограничного слоя применительно к проблемам климатологии // В межвуз темат сб тр Математическое моделирование, численные методы и комплексы программ, вып 12 - СПбГАСУ – СПб, 2006 – С 23-31
  - 4 Липовицкая И Н, Василенко С В, Гаврилов А С, Мханна А 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
- Из списка ВАК на 2006 год
5. Липовицкая И Н Метод восстановления структуры нижней тропосферы // Научно-технические ведомости СПбГПУ № 6-1(48) – СПб Изд Политехнического университета – 2006 – С 193-197

Отпечатано с готового оригинал-макета в ЦНИТ «АСТЕРИОН»  
Заказ № 156 Подписано в печать 22 05 2008 г Бумага офсетная  
Формат 60 84<sup>1</sup>/<sub>16</sub> Объем 1,25 п л Тираж 100 экз  
Санкт-Петербург, 191015, а/я 83, (812) 275-73-00, 275-53-92, 970-35-70