

Министерство образования и науки Российской Федерации
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ (РГГМУ)

На правах рукописи

Сенькова Анастасия Владимировна

УДК 551.5

**ОРОГРАФИЧЕСКИЕ ЭФФЕКТЫ ПРИ РАСЧЕТЕ
РАДИАЦИОННЫХ ПОТОКОВ В АТМОСФЕРНЫХ МОДЕЛЯХ
ВЫСОКОГО РАЗРЕШЕНИЯ**

25.00.30 - метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2005

Диссертация выполнена на кафедре метеорологических прогнозов в
Российском Государственном Гидрометеорологическом Университете

Научный руководитель - доктор физико-математических наук,
профессор Р. П. Репинская.

Официальные оппоненты: доктор физико-математических наук,
профессор В. И. Биненко;
доктор географических наук,
профессор И. Н. Русин.

Ведущая организация - Главная геофизическая обсерватория
им. А. И. Воейкова.

Защита диссертации состоится 17 февраля 2005 г. в 15 часов 30 мин на
заседании диссертационного совета Д212.197.01 при Российском
Государственном Гидрометеорологическом университете
по адресу: 195196, г. Санкт-Петербург, Малоохтинский пр., 98.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Российского
Государственного Гидрометеорологического университета.

Автореферат разослан 17 января 2005 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



доктор ф.-мат. наук
проф. А. Д. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Задача улучшения качества прогноза погоды и учета различных физических процессов при его составлении является всегда актуальной. В гидродинамических моделях атмосферы, предназначенных для прогноза погоды, параметризация радиации играет важную роль, она отвечает за суточные и сезонные изменения метеовеличин. Радиация является основным источником и стоком энергии системы Земля-атмосфера и оказывает определяющее влияние на динамику атмосферы. Радиационные потоки зависят от многих факторов в этой системе: газового состава атмосферы, оптических свойств естественных и антропогенных примесей, излучательной способности облаков и подстилающей поверхности, а также от орографии, которая оказывает локальное, но существенное влияние на радиационные потоки на поверхности. По результатам наблюдений и радиационных одномерных моделей доказано определяющее влияние орографии на потоки приземной радиации всего спектрального диапазона, а, следовательно, на энергетический, водный, и другие бюджеты поверхности. Притоки лучистой энергии являются подсчетным физическим процессом и рассчитываются в радиационном блоке гидродинамических моделей.

С развитием вычислительной техники повышается пространственное разрешение в прогностических оперативных и климатических моделях, полнее учитывается в моделях и орография, оказываемый ею на радиационные потоки эффект может быть рассчитан и при высоком разрешении должен оказывать заметное влияние на радиационный баланс поверхности и температуру в приземном подслое.

До сих пор полные трехмерные гидродинамические модели прогноза погоды с большой областью охвата не учитывали влияние орографии на потоки радиации из-за необходимости достаточно мелкого разрешения, особенно в районах со сложной орографией. Алгоритмы параметризации радиационных потоков в условиях сложной орографии реализовывались только для одномерных моделей или моделей для конкретных орографических структур (каньонов, долин).

Цели работы:

1. Формулировка алгоритмов учета влияния эффектов, связанных с орографией земной поверхности, на приземные потоки радиации в гидродинамических моделях высокого разрешения;
2. Реализация и внедрение указанных алгоритмов в атмосферную региональную модель высокого разрешения;
3. Проведение численных экспериментов для оценки влияния орографии на модельные потоки радиации и прогноз температуры в приземном подслое.

Для выполнения поставленных целей в диссертации были сформулированы и последовательно решены следующие задачи.

- Установка гидродинамической региональной системы прогноза погоды HIRLAM¹ в РГТМУ;
- Тестирование радиационного блока модели HIRLAM, сравнение результатов одномерных расчетов с наблюдениями и с расчетами по модели ECMWF²;
- Изучение эффектов, связанных со сложным рельефом, на радиационные потоки на поверхности и исследование возможностей их учета в атмосферных моделях высокого разрешения;
- Разработка алгоритма учета влияния наклона поверхности на приземные потоки прямой солнечной радиации для радиационного блока гидродинамической модели высокого разрешения;
- Разработка алгоритма учета эффектов затенения окружающими формами рельефа в радиационном блоке модели высокого разрешения;
- Разработка алгоритма учета влияния сложной орографии на приземную диффузную коротковолновую и длинноволновую радиацию для радиационного блока гидродинамической модели высокого разрешения;
- Разработка методов построения мелкомасштабных полей углов и направлений наклона земной поверхности, необходимых в качестве внешних параметров в модели;
- Проведение численных экспериментов для оценки влияния рельефа на модельные радиационные потоки и температуру для одномерной радиационной модели; трехмерных экспериментов с искусственными склонами; полных экспериментов с реальными данными о подстилающей поверхности.

Методы исследования

Основным методом исследования является гидродинамическое моделирование. Для решения задач исследования разработан алгоритм учета влияния эффектов орографии на потоки радиации для атмосферных моделей высокого разрешения; алгоритм внедрен в радиационный блок атмосферной гидродинамической региональной модели HIRLAM. Проведены численные эксперименты.

Научная новизна

Состоит в разработке и реализации алгоритмов численного учета влияния сложной орографии на приземные радиационные потоки в трехмерных гидродинамических моделях атмосферы высокого разрешения. Получены новые оценки чувствительности приземных радиационных потоков и температуры к орографическим неоднородностям подстилающей поверхности на основе региональной модели высокого разрешения. Разработаны

¹ HIRLAM – (региональная гидродинамическая модель высокого разрешения) – система оперативного прогноза погоды (совместный проект 9-ти северных европейских стран)

² ECMWF – Европейский центр среднесрочных прогнозов погоды

рекомендации по необходимости учета различных радиационных факторов в прогностических моделях высокого разрешения.

Все указанные этапы исследования выполнены для региональной модели высокого разрешения впервые.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту.

1. Методы формирования полей азимутов и углов наклона поверхности, необходимых для расчета радиационных потоков для атмосферной модели высокого разрешения.
2. Методика учета влияния угла и азимута наклона поверхности на приземные потоки солнечной радиации, учета эффектов затенения и зависимости диффузной коротковолновой и длинноволновой радиации от элементов орографии применительно к атмосферной модели высокого разрешения.
3. Оценки чувствительности радиационных потоков на поверхности и приземной температуры к орографическим эффектам в атмосферной модели высокого разрешения.

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается строгой математической постановкой задачи и их непротиворечивостью с фундаментальными положениями и выводами общезначимой теории, подтвержденной на одномерных радиационных моделях, а также согласованностью с оценками, полученными в независимых исследованиях.

Теоретическая и практическая ценность диссертации состоит во включении предложенной методики в радиационный блок прогностической модели высокого разрешения. Реализация предложенных методов позволяет давать прогнозы приземной температуры с учетом сложных орографических эффектов в радиационном блоке модели.

Все результаты моделирования, полученные в диссертации, являются новыми, непротиворечивыми и согласуются с фундаментальными особенностями поступления потоков радиации на земную поверхность.

Представленная методика была реализована для программного комплекса системы HIRLAM, используемой в оперативной практике метеорологических служб ряда северных стран, и будет внедрена в оперативную модель HIRLAM. Эту методику можно использовать и в других моделях прогноза погоды высокого разрешения, а также в моделях изменения климата для расчета приземных потоков радиации с учетом оказываемого на них влияния сложной орографии. Данные методы также рекомендованы для внедрения в учебный процесс РГГМУ для дисциплины «гидродинамическое моделирование» (раздел «Параметризация физических процессов подсеточного масштаба»).

Работа прошла апробацию на:

- Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Компьютеры. Программы. Интернет. 2003», Киев, Украина, апрель, 2003.

- Международной конференции и школе молодых ученых «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде CITES-2003», Томск, сентябрь, 2003.
- Семинаре «Балтийский HIRLAM», Санкт-Петербург, ноябрь, 2003.
- Итоговой Сессии Ученого Совета, РГГМУ, январь, 2004.
- Ежегодном семинаре разработчиков и пользователей системы HIRLAM, Мадрид, Испания, март, 2004.

Основные результаты диссертации опубликованы в 8 печатных работах; материалы использованы в научно-исследовательских отчетах.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, пяти глав и заключения. Общий объем работы составляет 143 страницы. Список литературы содержит 53 наименования.

СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Во введении обосновывается актуальность темы, формулируется цель и основные задачи работы, перечислены основные положения, выносимые на защиту, определена новизна, научная и практическая ценность работы.

Глава 1 содержит обзор современных исследований зависимости радиационного режима от рельефа подстилающей поверхности, проведенных на основе измерений и с помощью моделирования. Эти исследования показали, что направление и степень наклона поверхности, затенение, и заслонение части неба окружающей орографией оказывают большое влияние на мгновенные и дневные значения потоков радиации.

Глава 2 посвящена теоретическим основам влияния орографии на потоки радиации на поверхности.

В разделе . 2.1 рассматривается влияние рельефа на потоки коротковолновой радиации.

Первым значительным влиянием орографии на поток прямой солнечной радиации на поверхности является тот факт, что поверхность расположена на некоторой высоте. Оптическая толщина атмосферы уменьшается с увеличением высоты поверхности над уровнем моря, поэтому и приходящее излучение, особенно в условиях чистого неба, будет больше. Этот фактор автоматически учитывается в радиационных блоках всех гидродинамических моделей, так как расчет оптической толщины ведется с уровня орографии.

На потоки радиации на поверхности накладываются также эффекты, связанные с ее наклоном и направлением наклона.

Проходя слою атмосферы, поток солнечной радиации поглощается и рассеивается атмосферным воздухом. В общем случае поток радиации на наклонную поверхность S_{surf} вычисляется по формуле:

$$S_{surf} = S_{\perp} \cos i, \quad (1)$$

где S_{\perp} - поток прямой солнечной радиации у земной поверхности, приходящий на перпендикулярно расположенную к лучам поверхность, i - угол между направлением падения солнечных лучей и нормали заданной поверхности.

В случае горизонтальной поверхности угол i совпадает с зенитным углом Солнца ξ .

В случае произвольно расположенной наклонной поверхности угол i определяется по формуле:

$$\cos i = \cos a_s \cos \xi + \sin a_s \sin \xi \cos(\psi - \psi_s), \quad (2)$$

где a_s - угол наклона поверхности по отношению к горизонтальной плоскости; ψ_s - азимут проекции нормали к склону на горизонтальную плоскость; ψ - азимут Солнца. (Все углы и обозначения показаны на рис. 1).

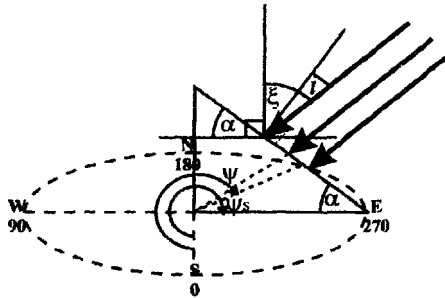


Рис. 1. Схема падения солнечных лучей на наклонную поверхность.

Помимо изменения величины потока прямой солнечной радиации, на наклонных поверхностях в зависимости от угла и направления наклона, на поток солнечной радиации накладываются также эффекты затенения. Возможны два варианта затенения. Если $\cos i < 0$, отрицательный, то поверхность попадает в зону «самозатенения» - то есть Солнце находится ниже локального горизонта, образованного самой наклонной поверхностью. Поверхность также может попадать в зону наведенного затенения, то есть затенения, создаваемого соседними горами, блокирующими солнечные лучи в направлении данной поверхности вне зависимости от ее наклона и направления. Наведенное затенение имеет место, если угол высоты Солнца меньше угла локального горизонта в направлении азимута Солнца. В обоих случаях, самозатенения и наведенного затенения, поток солнечной радиации на поверхность равен нулю.

Область, откуда диффузное излучение приходит в интересующую нас точку, можно представить в виде полусферы, расположенной над данной точкой. Она может содержать отдельные места чистого неба и облачности, а также склоны гор. Диффузная коротковолновая радиация, приходящая со

стороны неба, - это прямая солнечная радиация, рассеянная на воздушных неоднородностях и облаках. Однако на поверхность может приходить и часть радиации, отраженной соседними склонами

Определим фактор вида неба $V_d(\psi)$, который представляет собой долю видимого, т.е. ничем не заслоненного неба на данном склоне в направлении азимута ψ . Он выражается отношением имеющейся диффузной радиации в точке к диффузной радиации в этом месте на ничем не затененную поверхность и в отсутствие облачности. Фактор вида неба $V_d(\psi)$ может меняться от 1 (открытая поверхность, в полусфере над ней находится только небо) до 0 (полностью заслоненная со всех сторон поверхность, неба не видно). Для определения потока диффузной радиации, пришедшей со стороны неба, можно использовать интегральный по всем направлениям фактор вида неба:

$$V_d = 1 - \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{\psi_i}, \quad (3)$$

где угол θ_{ψ_i} обозначает угол локального горизонта в направлении ψ_i .

Поток солнечной радиации может быть отражен соседними склонами в соответствии с их альбедо в направлении интересующей нас поверхности. Используем обратный по значению фактору вида неба фактор вида земной поверхности $C_d(\psi)$. Фактор вида земной поверхности определяется для нескольких направлений (как и угол локального горизонта), и ею единицы измерения - доля угла, составляющего локальный горизонт от всей видимой полуокружности. Также можно использовать и интегральный для всех направлений фактор вида земной поверхности:

$$C_d = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \theta_{\psi_i}. \quad (4)$$

Общая диффузная радиация $F_{\text{срф}}$, поступившая на интересующую нас площадку, записывается как

$$F_{\text{срф}} = \int_0^{2\pi} \text{alb}_{\psi} (S + D \downarrow)_{\psi} C_d(\psi) d\psi + \int_0^{2\pi} (D \downarrow)_{\psi} V_d(\psi) d\psi, \quad (5)$$

где alb - альбедо поверхности; S и $D \downarrow$ - прямая и диффузная солнечная радиация; индекс ψ обозначает значения потоков на соседней к расчетной поверхности в направлении ψ . Также можно взять средние для соседних ячеек альбедо и потоков прямой и диффузной радиации и использовать интегральные факторы вида поверхности:

$$F_{\text{срф}} = \text{alb}(\bar{S} + \bar{D} \downarrow) C_d + \bar{D} \downarrow V_d \quad (6)$$

В разделе 2.2 рассматривается влияние рельефа на потоки длинноволновой радиации. Потоки длинноволновой радиации на подстилающую поверхность приходят из двух источников — излучения атмосферы и излучения окружающих элементов топографии. Эти потоки определяются излучательной и пропускающей способностями атмосферы в длинноволновом диапазоне, которые зависят от концентрации основных радиационно-активных компонентов, наличия облачности и от излучательной способности подстилающей поверхности.

Количество энергии, приходящееся на излучение атмосферы и излучение соседних склонов, зависит от того, в каком отношении небо и земная поверхность находятся в видимой полусфере над точкой, для которой производится расчет. Обычно поверхность теплее атмосферы, поэтому поток нисходящей длинноволновой радиации при сложной топографии в большинстве случаев оказывается больше, чем на плоской поверхности. Эффект, оказываемый топографией на длинноволновую радиацию, можно записать следующим образом:

$$L_{surf} = \int_0^{2\pi} (L \downarrow)_\psi V_d(\psi) d\psi + \int_0^{2\pi} \epsilon_\psi B(T)_\psi C_d(\psi) d\psi. \quad (7)$$

Здесь L_{surf} - поток длинноволновой радиации на поверхности, $L \downarrow$ - длинноволновое излучение из атмосферы, V_d и C_d - фактор вида неба и фактор вида земной поверхности, такие же, как в расчетах диффузных коротковолновых потоков радиации; ϵ — коэффициент серости поверхности; $B(T)$ - функция Планка для потока излучения абсолютно черного тела, при температуре поверхности.

Глава 3 посвящена базовой гидродинамической модели HIRLAM, на основе которой проводились все численные эксперименты.

В разделе 3.1 приводятся сведения о системе HIRLAM, являющейся полной системой численного прогноза погоды, включающей ассимиляцию данных с анализом наблюдений и региональную прогностическую модель с комплексом физических параметризаций. Прогностическая модель является региональной численной моделью с прозрачными граничными условиями (условиями протекания). Физические параметризации включают схему поверхности, параметризацию турбулентности, схему конденсации и конвекции массо-потокowego типа, радиационную схему. Анализ переменных в атмосфере на больших высотах использует трехмерный вариационный метод (3D-VAR) или трехмерную оптимальную интерполяцию (OI).

Система HIRLAM состоит из следующих блоков.

Анализ поверхностного давления, температуры воздуха, ветра, влажности основан на схеме оптимальной интерполяции, разработанной в ECMWF. Температура поверхности моря, ледовое и снеговое покрытие анализируются коррекционными методами.

Модель гидростатическая сеточная, с возможным разрешением от 55 до 5 км по горизонтали и от 31 до 60 уровней по вертикали. В качестве системы координат используются повернутая широтно-долготная сетка по горизонтали и гибридная $p-\sigma$ система по вертикали; интегрирование по времени с использованием схемы Эйлера 4-го порядка точности. Используется полуявный полулагранжев подход к интегрированию уравнений. Боковые границы берутся из крупномасштабной глобальной модели ECMWF.

Постпроцессинг включает последующую обработку выходных данных для их интерполяции на стандартные изобарические поверхности и записи по стандарту WMO в GRIB файлы.

Имеется в наличии стандартный пакет диагностики. Он включает утилиты контроля качества данных. В систему также включен пакет для верификации наблюдений.

Установка программного комплекса системы HIRLAM на компьютерах кафедры метеорологических прогнозов в РГМУ входила в задачи диссертационной работы.

В разделе 3.2 приводится описание радиационного блока модели HIRLAM.

В HIRLAM применяется быстрая двухинтервальная схема параметризации радиации. Схема была сконструирована максимально быстрой и простой, но дающей достаточно точные результаты в средних и высоких широтах.

Тенденция температуры воздуха $\frac{\partial T}{\partial t}$ равна:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = -\frac{g}{c_p} \frac{\partial F}{\partial p}, \quad (8)$$

где g — гравитационная постоянная, c_p — теплоемкость воздуха при постоянном давлении, p — давление, F — полный поток радиации. Для обоих интервалов (коротковолнового и длинноволнового) тенденция температуры в слое вычисляется как сумма для чистой и облачной частей.

Поток радиации на вертикальных уровнях модели при безоблачных условиях F_{swa} находится как

$$F_{swa} = S \cos \xi \left[1 - 0.024(\cos \xi)^{0.5} - b_1 0.11u^{0.25} - b_2 \frac{p}{p_0} \left(\frac{0.28}{1 + 6.43 \cos \xi} - 0.07\alpha_c \right) \right], \quad (9)$$

где u — оптическая масса некоторого столба атмосферы: $u(p_1, p_2) = \frac{1}{g} \int_{p_1}^{p_2} q \frac{p}{p_0} dp$,

S — солнечная постоянная, q — массовое содержание водяного пара в воздухе, p — давление, $p_0 = 1013$ гПа, b_1 , b_2 — эмпирические коэффициенты, α_c — альbedo облаков.

И

Первое слагаемое, зависящее от зенитного угла Солнца, описывает поглощение стратосферным озоном. Основной вклад в ослабление солнечной радиации оказывает поглощение водяным паром, углекислым газом и кислородом, что параметризуется вторым слагаемым. В круглых скобках записано ослабление потока радиации за счет рассеяния приходящей радиации и вклада обратного рассеяния радиации, отраженной от облаков. Поток радиации в облаках F_{swc} определяется как

$$F_{swc} = F_{swa} \frac{\tilde{T}(p_1, p_2)}{1 - \alpha_c (1 - \tilde{T}(p_1, p_2)) \beta_{1s}}, \quad (10)$$

где $\tilde{T}(p_1, p_2)$ – фактор пропуска облачной атмосферы.

При параметризации длинноволновой радиации используется «излучательная способность слоя» (E), описываемая эмпирической функцией зависимости длинноволнового излучения (излученная минус поглощенная радиация) от оптической массы слоя. Нисходящий поток из чистой атмосферы F_{lwa} получается по формуле:

$$F_{lwa} = \sum_{k=1}^N B(T_k) (E(p_{k-1/2}, p_N) - E(p_{k+1/2}, p_N)) + a_9 + a_{10} q_N \quad (И)$$

где a_n – эмпирические коэффициенты.

В дополнение к сумме излучения по всем уровням в (11) добавляются слагаемые, связанные с дополнительным потоком излучения из-за аэрозолей, малых газовых примесей и континуумного излучения водяного пара. Индекс N относится к искомому модельному слою. Полный нисходящий поток из атмосферы получается добавлением потока из облачной части, определяемого по эмпирической формуле. В HIRLAM вертикальное расположение облаков принимается соответствующим приближению максимального перекрытия облачных слоев.

Для тестирования радиационного блока модели HIRLAM с целью его пригодности для использования в наших исследованиях была проведена серия расчетов радиационных потоков и притоков в единичном вертикальном столбе атмосферы. Для задания внешних параметров атмосферы использовалось стандартное распределение метеорологических величин в атмосферном профиле. Расчеты проводились для двух версий радиационного блока HIRLAM и сравнивались с результатами радиационного блока модели ECMWF, имеющей большое количество спектральных интервалов, и наблюдениями. Можно сделать вывод, что расчеты, полученные с помощью радиационного блока модели, хорошо согласуются с измерениями и результатами других моделей. Таким образом, радиационный блок модели HIRLAM может быть использован в изучении влияния сложной топографии на радиационные потоки вблизи поверхности земли.

В главе 4 разрабатываются методы учета орографических эффектов в радиационном блоке атмосферной модели высоко разрешения.

В разделе 4.1 приводятся необходимые модификации радиационного блока модели. Поток прямой солнечной радиации (9), модифицируется за счет изменения угла падения солнечных лучей на поверхность. Измененный угол падения вычисляется по формуле (2).

Затенение учитывается бинарной маской затенения δ_{shadow} , которая может принимать значения либо 0 (поверхность затенена), либо 1. Значение бинарной маски затенения определяется следующим образом:

$$\delta_{shadow} = \begin{cases} 0, & \theta_s \leq \theta_{h,w}, & \cos i \leq 0 \\ 1, & \theta_s > \theta_{h,w}, & \cos i > 0 \end{cases}, \quad (12)$$

где θ_s - высота Солнца, $\theta_{h,w}$ - угол локального горизонта в направлении азимута Солнца.

Таким образом, поток прямой солнечной радиации на наклонную поверхность S_{surf} , определяется потоком на горизонтальную поверхность, вычисленным по формуле (9), умноженным на корректирующий коэффициент f_s .

$$S_{surf} = F_{SWd} f_s, \quad (13)$$

$$f_s = \frac{1}{\cos \xi \cos \alpha_s} \delta_{shadow} (\cos \alpha_s \cos \xi + \sin \alpha_s \sin \xi \cos(\psi - \psi_s)).$$

В радиационном блоке модели рассеяние атмосферой учитывается в формуле (9), а поток рассеянной радиации сквозь облака — формулой (10). Заслонение части неба учитывается фактором вида неба V_d . При расчете диффузной радиации, которая не имеет четкого направления поступления на поверхность, можно использовать интегральный по полусфере фактор вида неба и земной поверхности. Используются уравнения (3) и (4) с дискретизацией по 8-ми направлениям. Таким образом, диффузная коротковолновая радиация D_{surf} на поверхности определяется как

$$D_{surf} = D \downarrow V_d + a \bar{b}^v (\bar{S}^v + \bar{D}^v \downarrow) C_d, \quad (14)$$

где \bar{X}^v — осреднение параметра по восьми соседним ячейкам.

Поток длинноволновой радиации, в соответствии с формулой (9) и интегральными факторами вида неба и земной поверхности, равен:

$$L_{surf} \downarrow = L \downarrow V_d + A \varepsilon \sigma (\bar{T}_{surf}^v)^4 C_d, \quad (15)$$

где σ - постоянная Стефана-Больцмана, T_{surf} - температура поверхности, A - коэффициент, описывающий ослабление радиации атмосферой.

Раздел 4.2 посвящен методам подготовки необходимой информации об орографических параметрах. Для проведения полного трехмерного эксперимента с моделью HIRLAM в качестве внешней информации необходимы поля углов и направлений наклонов подстилающей поверхности, а также углов локального горизонта, видимого из точки по нескольким направлениям. Более того, разрешение модели должно быть достаточно мелким, чтобы описывать масштаб существующих в природе наклонных поверхностей, не сглаживать их. При большом сглаживании эффекты, вызванные наклоном поверхности, уменьшаются, и потоки радиации стремятся к потокам на горизонтальной плоскости.

Угол локального горизонта определяется дискретно для 8 направлений, т.е. с шагом 45° , а для нахождения промежуточных значений применяется линейная интерполяция соседних значений. Углы локального горизонта можно вычислять, используя сеточные значения высоты поверхности над уровнем моря в модели:

$$\theta_{h,\psi} = \max \left\{ \arctan \frac{h}{L} \right\}_{\psi}, \quad (16)$$

где h - максимальная высота в модельной ячейке, L - расстояние от расчетной точки до середины ячейки, ψ - направление, в котором определяется угол локального горизонта.

В базе данных Hydro1K имеется информация о полях высоты поверхности над уровнем моря, угле и направлении наклона подстилающей поверхности с разрешением 1×1 км в ламбертовой проекции по Европе. С помощью этой информации можно подготовить поля необходимых внешних параметров для учета рельефа подстилающей поверхности в радиационном блоке. Необходимо перенести эту информацию из мелкомасштабной базы данных на сетку прогностической модели. При использовании методики определения углов наклона и азимута поверхности на основе базы Hydro1K возникает возможность учитывать неоднородности подсеточного рельефа.

Итак, рассчитывать потоки коротковолновой солнечной радиации с использованием значений угла и направления наклона поверхности можно несколькими способами:

1. Метод осреднения параметров: вычисляются средние значения угла и направления наклона поверхности для всей ячейки сетки модели, и по ним рассчитываются потоки радиации. Однако направление наклона - функция разрывная, меняется в пределах $[0^\circ, 360^\circ]$, и ее невозможно осреднить абсолютно корректно. Неоднородности подсеточного рельефа в этом случае не учитываются.

2. Метод осреднения потоков: рассчитываются углы наклона поверхности и потоки отдельно для нескольких основных направлений. Направлений может

быть минимальное количество — четыре (север, запад, юг, восток), но для более корректного учета лучше использовать большее число. Полученные потоки радиации для каждого направления затем осредняются внутри ячейки сетки. При этом мы косвенно учитываем неоднородности подсеточного рельефа.

Метод осреднения потоков осуществляется следующим образом. Все точки мелкого разрешения (поля базы данных Hydro1K), попадающие в одну ячейку сетки HIRLAM, делятся на типы в соответствии с их направлением. Для каждого из этих типов рассчитывается фракционная доля — процентное содержание поверхностей данного направления относительно всей площади ячейки. Также для каждой фракции вычисляется средний угол наклона поверхностей этого типа направления. Таким образом, для каждого основного направления имеется доля поверхностей, занимаемых в модельной ячейке и средний угол наклона. По этим данным можно определить потоки солнечной радиации на поверхности каждого типа направления, а затем просуммировать их в соответствии с долями, занимаемыми поверхностями каждого типа в одной ячейке. Таким образом, получается средний для ячейки радиационный поток.

В то же время можно использовать и собственную модельную топографию.

Особенности характеристик подстилающей поверхности были рассмотрены нами на примере Альп и Карпат. В качестве области для дальнейших численных экспериментов были выбраны Карпаты. Максимальная высота над уровнем моря горных хребтов Карпат 2500 м, углы наклона в них не превышают 25°. С одной стороны хребта преобладают поверхности, наклоненные на северо-восток, а с другой стороны - на юго-запад. В Карпатах имеется примерно одинаковое количество поверхностей различного направления. Их процентное содержание варьируется от ~ 23 % до ~ 26 %. В то же время в каждой ячейке могут присутствовать несколько поверхностей различного направления наклона и плоские участки поверхности. Ячеек с одной фракцией довольно мало, только ~ 10 % от всего их количества в модели. Количество ячеек, в которых находится две или три поверхности, ориентированные в различных направлениях, ~ 40 % и ~ 38 % соответственно. Ячеек, где присутствуют все четыре фракции, что реально означает, что в ячейке находится «ямка» или «горка», тоже довольно мало, всего 10 % от всего числа модельных ячеек. В основном на области интегрирования средний угол наклона превышает свое среднеквадратическое отклонение в 2 - 3 раза, что говорит о значимости его значений. Следовательно, использование наклона подстилающей поверхности при расчете потоков радиации на поверхности будет описывать сигнал подстилающей поверхности, а не вносить шум в модель.

В главе 5 приводятся результаты численных экспериментов с моделью с радиационным блоком с учетом рельефа

Раздел 5.1 посвящен анализу результатов экспериментов с радиационным блоком модели в одномерном варианте HIRLAM. Приведены результаты расчетов потоков прямой солнечной радиации на поверхности с различными

углами и азимутами наклона. Все расчеты проводились для точки с координатами 60° с.ш. На рис 2 представлен пример потоков прямой солнечной радиации.

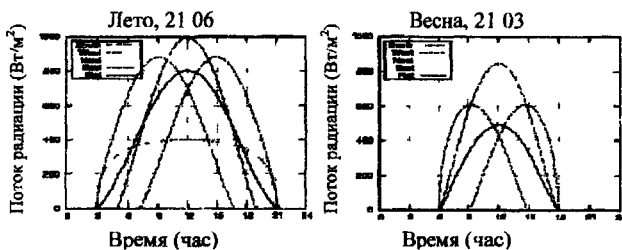


Рис. 2. Потоки коротковолновой радиации, приходящиеся на поверхность с наклоном 30° различной ориентации в течение суток.

По имеющимся наблюдениям потоков солнечной радиации на различных наклонных поверхностях, сделанных на метеорологической станции в Пернайя (Финляндия) в 1981 г. в безоблачные дни 16 марта и 14 мая были проведены сравнения с расчетами потоков коротковолновой радиации с помощью радиационного блока модели HIRLAM в одномерном варианте. Графики полностью совпадают по форме и в значительной степени по амплитуде значений. По результатам сравнения можно сделать вывод, что расчет потоков радиации сделанный с помощью радиационного блока HIRLAM, на наклонных вертикальных поверхностях хорошо соответствует теории и измерениям.

Раздел 5.2 посвящен описания экспериментов с искусственными горными склонами. Для проведения полных трехмерных экспериментов по чувствительности радиационных потоков на поверхности и приземной температуры к соответствующим изменениям, сделанным в радиационном блоке модели, была выбрана область Соданкюля, Финляндия. Данная область имеет практически плоский рельеф и очень малые естественные углы наклона поверхности. Поэтому было решено провести, наряду с эталонными экспериментами (без учета наклона подстилающей поверхности), расчеты с искусственными склонами для оценок чувствительности радиационных потоков на поверхности и приземной температуры к соответствующим изменениям, сделанным в радиационном блоке. В данной серии экспериментов учитывался только основной фактор, наибольшим образом влияющий на радиационные потоки, а именно - изменение угла падения солнечных лучей на поверхность за счет наклона и эффект самозатенения. Прогноз проводился для 6 мая 2004 г. на одни сутки, разрешение модели использовалось 3,3 x 3,3 км.

Проведение экспериментов с искусственными склонами проводилось следующим образом. При всех прочих неизменных параметрах на некоторой области искусственным путем задавался небольшой наклон земной поверхности (15°) определенного направления (два склона - восточного и западного направления). В эталонном прогнозе потоки коротковолновой радиации на земной поверхности рассчитывались без учета наклона

подстилающей поверхности. Эксперименты показали, что а некоторые часы даже небольшой наклон поверхности в 15° в модели может вызвать изменение потока радиации на поверхности до 200 Вт/м^2 , что является значительной величиной и должно заметно влиять на приземную температуру. На рис. 3 приведен пример расчета температур на двух метрах (Т2м) с учетом влияния наклонных поверхностей и без учета.

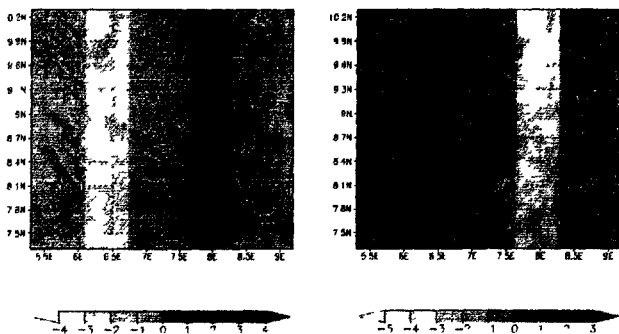


Рис. 3. Разница Т2м между прогнозами с искусственными склонами и плоской поверхностью в 6 и 18 часов.

В данном идеальном случае наклонных поверхностей чувствительность температуры к наклону подстилающей поверхности в 15° оказалась довольно большая, до 4°C . В реальном случае различия в температуре будут намного меньше, потому что в природе наклонные поверхности расположены довольно хаотически и частично гасят и сглаживают температурные эффекты друг друга.

В разделе 5.3. приведены результаты экспериментов с реальным рельефом Карпат. Было построено поле интегрального фактора вида неба, который необходим для корректировки потоков диффузной и длинноволновой радиации. Он вычислялся по модельной средней орографии и его значения оказались равными $\sim 0,99$ при соответствующем методе расчета и шаге сетки $3,3 \times 3,3$ км. Отсюда можно сделать вывод, что при этом разрешении модели для территории Карпат влияние, оказываемое орографией на диффузную и длинноволновую радиацию, пренебрежимо мало. Возможно, что при других методах расчета фактора вида неба с использованием более мелкомасштабной информации и других методов ее осреднения, а также для других горных массивов влияние этого фактора будет более значимо. В дальнейших экспериментах учитывались факторы влияния изменения угла падения на склоны солнечной радиации и эффекты затенения.

В эксперименте использовался метод разделения наклонных поверхностей на фракции по направлениям с последующим осреднением радиационных потоков. Для сравнения приведены два эксперимента: с учетом (SLP) и без учета (REF) орографических эффектов на приземные потоки радиации. Радиационные потоки на поверхности в экспериментах различаются, причем отличия максимальны в районе горных хребтов. Эксперимент SLP

имеет более изменчивую картину потоков радиации на поверхности, на которой явно выступают контуры гор. В 6 и 9 часов утра заметны более высокие значения потока радиации в модельных ячейках с восточной стороны гор эксперимента SLP по сравнению с REF. В 12 и 15 часов также наблюдается различия в структуре потоков радиации на поверхности. В отдельных точках, содержащих большие углы наклона поверхности, потоки радиации в экспериментах отличаются на 150-200Вт/м².

В прогнозе на реальных данных с учетом рельефа разница температур на высоте два метра не превышала 1,5°C (рис. 4). Чувствительность температуры к учету рельефа была наибольшей в утренние и вечерние часы, при которых наблюдаются низкие углы Солнца, и составляла 1,2°C. Минимальные изменения в значении T2м привносились орографией в полдень и составляли 0,3°C.

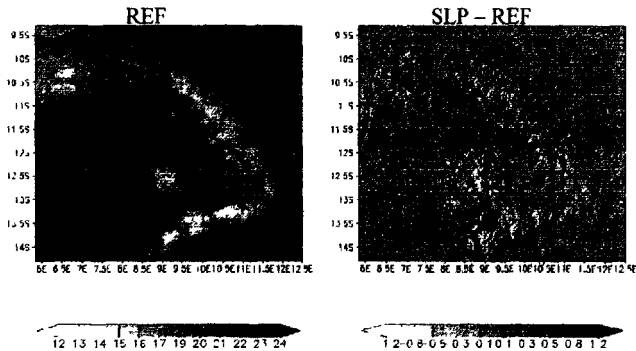


Рис. 4. T2м, 6 часов утра.

Полученные оценки влияния сложной орографии на приземную температуру хорошо согласуются с результатами, полученными в подобных исследованиях с моделью MM5 для территории Альп.

Существует проблема верификации прогноза приземной температуры на модельном разрешении. Возможна либо косвенная верификация полученных прогнозов, либо для корректной верификации необходимо использовать специальные методы для «приведения» температуры склона к температуре горизонтальной поверхности. Обе этих задачи представляют собой отдельные исследования и выходят за рамки данной диссертационной работы.

В заключении сформулированы основные положения и выводы диссертации.

1. В качестве базовой модели для реализации разработанных алгоритмов и проведения численных экспериментов использовалась гидродинамическая региональная модель прогноза погоды высокого разрешения HIRLAM. Начальным этапом работы являлась установка и отладка системы HIRLAM на персональные компьютеры кафедры метеорологических прогнозов в РГГМУ;

2. Модификации для учета влияния орографических эффектов вносились в радиационный блок модели HIRLAM. Проведено его тестирование, которое заключалось в сравнении результатов одномерных расчетов с наблюдениями и расчетами моделью ECMWF;

3. На основе современных публикаций проведено детальное исследование влияния эффектов, вызванных сложным рельефом, на радиационные потоки на земной поверхности и методов их описания и учета; исследованы возможности применения этих методов в гидродинамической модели атмосферы высокого разрешения.

4. Для использования в радиационном блоке гидродинамической модели высокого разрешения разработана и реализована методика учета влияния следующих факторов рельефа на потоки радиации:

- наклона подстилающей поверхности на потоки прямой солнечной радиации;
- эффектов затенения окружающими формами рельефа;
- влияние на диффузную коротковолновую радиацию;
- влияние на длинноволновую радиацию;

5. Разработаны методы переноса информации из мелкомасштабной базы данных на сетку прогностической модели высокого разрешения. Проведены расчеты необходимых полей орографических характеристик поверхности для дальнейшего их использования в полном трехмерном эксперименте.

6. Проведены численные эксперименты для оценки чувствительности модельных радиационных потоков и температуры приземного слоя к влиянию рельефа. Было продемонстрировано хорошее соответствие результатов теоретическим аспектам влияния наклонных поверхностей на потоки солнечной радиации на одномерных экспериментах с радиационным блоком HIRLAM.

Проведена серия экспериментов с учетом эффектов орографии в гидродинамической модели атмосферы высокого разрешения в условиях ясного солнечного дня с искусственным наклоном подстилающей поверхности. Эксперименты показали, что чувствительность температуры к наклону подстилающей поверхности в 15° достигала 4°C .

Проведены полные трехмерные эксперименты с реальными метеорологическими данными и рассчитанными для Карпат орографическими параметрами. Результаты прогнозов сравнивались с прогнозами модели с радиационным блоком без учета орографических эффектов. Эффекты, оказываемые сложной орографией на потоки радиации на поверхности, не вносят вычислительной неустойчивости. Их необходимо учитывать в гидродинамических моделях высокого разрешения. В отдельных областях потоки коротковолновой радиации за счет различных орографических эффектов могут отличаться от потоков радиации на плоской поверхности на $200\text{--}300 \text{ Вт/М}^2$. Модельная температура за счет орографических эффектов в локальных точках, содержащих большой процент поверхностей определенного направления наклона, в некоторые часы может изменяться до нескольких градусов. Так, в экспериментах для области Карпат изменения температуры в

утренние и вечерние часы в локальных точках достигали 1.5°C , в полдень не превышая 0.3°C .

Основные публикации по теме диссертации:

1. Senkova A. V., 2000: A calculation of radiation fluxes in the atmosphere // Thesis of the 3rd International Youth Environmental Forum of Baltic Countries ECOBALTICA'2000, St. Petersburg, 26-30 June 2000.
2. Репинская Р. П., А. В. Сенькова, 2000: Учет влияния аэрозолей на эволюцию погоды в гидродинамической модели атмосферы // Материалы Международного Конгресса Биометеорология человека, Санкт-Петербург, 18-22 сентября, 2000.
3. Сенькова А. В., 2003: Программные комплексы моделей атмосферы // Тезисы Международной научно-практической конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Компьютеры. Программы. Интернет. 2003», Киев, Украина, 21-23 апреля, 2003.
4. Сенькова А. В., 2003: Особенности радиационного блока модели HIRLAM // Тезисы Международной конференции и школы молодых ученых «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде CITES-2003», Томск, 1-11 сентября, 2003.
5. Rontu L., A. Senkova, 2003: Modifications of the radiation scheme for next reference. HIRLAN Newsletter, No. 44, November 2003, pp. 74-78.
6. Senkova A., L. Rontu, 2003: A study of radiation parameterization for sloping surfaces // Thesis of Baltic HIRLAM Workshop, St. Petersburg, 17-20 November, 2003.
7. Репинская Р. П., А. В. Сенькова, 2004: Параметризация потоков радиации на наклонные поверхности // Материалы Итоговой Сессии Ученого Совета, РГГМУ, 27-28 января, 2004.
8. Senkova A., 2004: Radiation parameterization for sloping surfaces. HIRLAN Newsletter, No. 45, May 2004, pp. 147-150.



Подписано в печать 14.01.05.Г.
Формат 60x84 1/16.Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 1.1. Тираж 100 экз.
Заказ №137

Отпечатано в ООО «Издательство "ЛЕМА"»
199034, Россия, Санкт-Петербург,
В.О., Средний пр., д.24, тел./факс: 323-67-74

25.00

22 FEB 2005