

Министерство образования и науки Российской Федерации
Государственное образовательное учреждение
Высшего профессионального образования
«Российский государственный гидрометеорологический университет» (РГГМУ)

На правах рукописи

УДК 551.510.522

Атласкин Евгений Македонович

**МОДИФИКАЦИЯ СХЕМЫ ПАРАМЕТРИЗАЦИИ ТУРБУЛЕНТНОСТИ
УСТОЙЧИВОГО ПСА ПО РЕЗУЛЬТАТАМ СРАВНИТЕЛЬНОГО
АНАЛИЗА ОШИБОК ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ
АТМОСФЕРЫ**

25.00.30 - метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

Санкт-Петербург

2010

Диссертация выполнена в ГОУ ВПО «Российский Государственный
Гидрометеорологический Университет»

Научный руководитель:

доктор физико-математических наук, профессор

Смышляев Сергей Павлович

Официальные оппоненты:

доктор физико-математических наук, профессор

Генихович Евгений Львович

Кандидат географических наук

Цепелев Валерий Юрьевич

Ведущая организация

Гидрометцентр России

Защита диссертации состоится 23 декабря 2010 г. в 15 часов 15 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 « » ноября 2010 г.

Ученый секретарь диссертационного совета

Доктор географических наук, профессор



А. И. Угрюмов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы

Современный прогноз состояния пограничного слоя атмосферы на основе гидродинамических моделей прогноза погоды (ГМПП) при наблюдаемом холодном устойчивом пограничном слое атмосферы (УПС) сопровождается значительными ошибками. Величина ошибки прогноза приземной температуры (T_2m) при наблюдаемом УПС может превышать $10\text{ }^{\circ}\text{C}$. Особенности УПС являются: анизотропия термодинамической и радиационной структур, чувствительность к орографии и элементам поверхности, отсутствие турбулентности или ее перемежаемость, внутренние гравитационные волны, которые могут доминировать в УПС или взаимодействовать с турбулентностью, существенное влияние потоков длинноволновой (ДВ) радиации, которое может доминировать над турбулентными потоками тепла.

В силу данных особенностей, УПС плохо поддается математическому описанию. Проблема является комплексной. Основными процессами в УПС являются длинноволновое излучение, которое, в свою очередь, зависит от облачности и концентрации парниковых газов, турбулентность, а также процессы на поверхности. Эти процессы в моделях описываются соответствующими схемами параметризаций. Таким образом, точность модельного описания потоков тепла, влаги и количества движения в УПС, в конечном итоге, зависит от точности различных параметризационных схем.

Решение проблемы моделирования формирования и эволюции УПС подразумевает как нахождение новых математических формулировок, основанных на более точном приближении, так и использование больших вычислительных ресурсов. Разработки, направленные на решение проблемы, активно ведутся национальными и международными центрами, развивающими модели и предоставляющими данные синоптическим службам. Например, в работе Сукорианского и др. (2005) построена теория квазинормального

исключения масштаба возмущения (КНИМ) для описания турбулентности в условиях устойчивости и слабой неустойчивости, на основе которой получены формулировки для безразмерных функций стратификации для тепла и количества движения. Модели с различной степенью точности могут воспроизводить процессы, определяющие структуру УПС. Непонятно, насколько хорошо различные алгоритмы способны воспроизводить структуру УПС, и связана ли ошибка также и с недостаточным горизонтальным или вертикальным разрешением.

Сама методика сравнения результатов моделирования с данными измерений в условиях УПС также является нетривиальной задачей. При усилении устойчивой стратификации растет влияние локальных факторов на турбулентные потоки и потоки радиации, а, следовательно, на температуру. Поэтому в условиях УПС измеренная температура является репрезентивной величиной только для ограниченной территории в окрестности станции наблюдений с однородными по пространству свойствами поверхности. В свою очередь, спрогнозированная моделью величина T_2m представляет собой среднее значение в пределах ячейки регулярной сетки, которая может покрывать различные типы поверхности. Сравнение точечных наблюдений с данными модели, осредненными в пределах ячейки сетки, содержит, таким образом, ошибку, связанную с пространственной изменчивостью, которая растет с усилением устойчивой стратификации. Эту ошибку можно назвать методологической. Методологическая ошибка порождает неопределенность в оценке точности моделей.

Комплексная сравнительная оценка точности воспроизведения приземной температуры современными оперативными гидродинамическими моделями прогноза погоды применительно к УПС является актуальной задачей. Полезно более подробно высветить роль различных процессов и факторов и разработать рекомендации по дальнейшим направлениям развития моделей. Результаты анализа будут также, безусловно, полезны при принятии решения дежурными синоптиками. При проведении анализа важно понять, какой вклад в ошибку

прогноза вносит методологическая ошибка, а какой – собственно ошибка моделирования.

Актуальными являются также включение новых теоретически обоснованных математических формулировок в схемы физических параметризаций моделей для условий УПС и апробация соответствующих алгоритмов. На основе формулировок для функций стратификации, полученных в работе Сукорианского и др. (2005), могут быть модифицированы схемы параметризации турбулентности в ГМПП.

Цели диссертационной работы

1. Комплексный сравнительный анализ ошибок прогнозов по различным оперативным гидродинамическим моделям для условий холодного устойчивого пограничного слоя атмосферы с использованием различных видов измерений.

2. Модификация блоков турбулентного замыкания для приземного и пограничного слоев атмосферы в модели прогноза погоды с использованием спектральных функций устойчивости; исследование чувствительности результатов моделирования к модификациям блоков турбулентного замыкания.

Для выполнения поставленных целей в диссертационной работе были **сформулированы и последовательно решены следующие задачи:**

а) оценка точности воспроизведения ночной приземной температуры в зимний период различными оперативными моделями прогноза погоды для территории Европы и европейской части России на основе данных стандартных измерений (SYNOP);

б) создание автоматической системы сбора, обработки и архивации данных измерений Арктического Научно-Исследовательского Центра Финского Метеорологического Института (АНИЦ ФМИ) в Соданкюля, северная Финляндия;

- в) оценка точности воспроизведения температурной структуры приземного подслоя различными моделями с использованием данных комплексных метеорологических наблюдений АНИЦ ФМИ, Соданкюля;
- г) оценка ошибок модельного воспроизведения приземной температуры при фильтрации локальной изменчивости по данным мезомасштабной сети метеорологических наблюдений "Helsinki Testbed";
- д) модификация блоков турбулентного замыкания для приземного и пограничного слоев атмосферы в гидродинамической модели прогноза погоды с использованием спектральных функций устойчивости;
- е) оценка чувствительности температуры, скорости ветра и турбулентных потоков в приземном и пограничном слоях к выполненным модификациям по данным эксперимента BASE.

Научная новизна

Получены новые комплексные оценки воспроизведения термической структуры приземного подслоя в УПС различными ГМПП с использованием различных видов измерений, включая исследования по фильтрации локальной изменчивости. Впервые выявлена относительная роль ошибок, связанных с горизонтальным и вертикальным разрешением моделей. Получены новые оценки чувствительности результатов моделирования к модификации блоков параметризации турбулентности с использованием формулировок теории квазинормального исключения масштаба возмущения. Разработаны рекомендации по дальнейшему развитию моделей для более точного воспроизведения процессов в УПС. Все указанные этапы исследования, посвященного сравнительному анализу ошибок моделирования термической структуры УПС моделями IFS, HIRLAM, AROME, ARPEGE, GFS, а также модификация и апробация блока турбулентного замыкания в модели HIRLAM выполнены впервые.

Основные положения и результаты, выносимые на защиту

1. Результаты комплексного сравнительного анализа ошибок прогнозов по различным гидродинамическим моделям прогноза погоды в условиях холодного устойчивого пограничного слоя атмосферы с использованием различных видов измерений; анализ относительной роли ошибок, связанных с горизонтальным и вертикальным разрешением моделей;
2. Модификация блоков турбулентного замыкания гидродинамической модели прогноза погоды с использованием новых формулировок для функций устойчивости;
3. Результаты численных экспериментов по чувствительности модельных профилей температуры, скорости ветра и турбулентных потоков к модификациям схемы параметризации турбулентности.

Обоснованность и достоверность результатов

Обоснованность и достоверность результатов подтверждается согласованностью с оценками, полученными в независимых исследованиях, а также сравнением с данными измерений.

Теоретическая и практическая значимость результатов работы

Теоретическая и практическая значимость результатов работы состоит в определении направлений решения проблемы моделирования устойчивого пограничного слоя атмосферы и в рекомендациях разработчикам моделей.

Научный интерес также представляет собой обзор по проблеме моделирования T2м на основе современных оперативных моделей прогноза погоды в условиях устойчивого пограничного слоя в зимний период.

Практическую ценность представляет созданная в процессе работы автоматическая система сбора, обработки и архивации данных измерений Арктического Научно-Исследовательского Центра Финского Метеорологического Института (АНИЦ ФМИ) в Соданкюля, северная Финляндия. Данные свободно доступны для использования с сайта <http://litdb.fmi.fi>. Оценки воспроизведения низкой приземной температуры прогностическими моделями могут использоваться при принятии решения дежурными синоптиками.

В блок турбулентного замыкания прогностической модели высокого разрешения HIRLAM внедрена методика вычисления функций устойчивости. Результаты численных экспериментов по чувствительности модели HIRLAM к включению этой методики представляют собой научный интерес и практическую значимость.

Личный вклад автора

Все представленные в диссертационной работе результаты получены автором самостоятельно.

Апробация работы

Основные результаты представленной диссертационной работы были представлены на международной конференции и школе молодых ученых по теме «Пограничные слои атмосферы над сложными поверхностями и растительностью» (Соданкюля, Финляндия, 2005 г.), ежегодном семинаре разработчиков и пользователей системы HIRLAM (София, Болгария, 2006 г.), третьем международном семинаре «Верификация мезомасштабных моделей прогноза погоды» (София, Болгария, 2006 г.), конференции и школе молодых ученых «Негидростатическая динамика и ассимиляция данных с высоким разрешением» (Санкт-Петербург, Россия, 2006 г.), летней школе молодых

ученых «Взаимодействие атмосферы и океана» (Хельсинки, Финляндия, 2006 г.), международном семинаре «Облачный пограничный слой» (Тулуза, Франция, 2007 г.), школе молодых ученых «Геофизическая турбулентность и пограничные слои: природа, теория и роль в системах Земли» (Хельсинки, Финляндия, 2007 г.), научном семинаре в университете Хельсинки (Хельсинки, Финляндия, 2007 г.), восемнадцатом международном симпозиуме американского метеорологического общества по пограничным слоям и турбулентности, (Стокгольм, Швеция, 2008 г.), ежегодном собрании Европейского метеорологического общества и Европейской конференции по практической климатологии (Амстердам, Нидерланды, 2008 г.), итоговой сессии ученого совета РГГМУ (Санкт-Петербург, 2008 г.), ежегодном семинаре разработчиков и пользователей систем HIRLAM и ALADIN (Утрехт, Нидерланды, 2009 г.).

Основные результаты по теме диссертации представлены в 4 печатных работах; материалы изложены в двух научно-исследовательских отчетах по грантам для студентов, аспирантов, молодых учёных, молодых кандидатов наук вузов и академических институтов, расположенных на территории Санкт-Петербурга в 2008 и 2009 г.

Структура и объем работы

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения, списка литературы из 98 наименований и одного приложения. Общий объем работы составляет 141 страниц, включая 30 рисунков и 9 таблиц.

СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы исследования, научная новизна, теоретическая и практическая значимость работы.

В **первой главе** представлен обзор, посвященный современным исследованиям в области физики процессов в УПС и проблемам их модельного воспроизведения. Проблема УПС стала наиболее актуальной в последние десятилетия, когда оказалось, что при увеличении численного разрешения моделей, которое привело к существенному увеличению точности воспроизведения многих процессов, включая конвекцию и осадки, моделирование физики УПС сопровождается значительными ошибками. Очевидно, что используемого численного разрешения недостаточно для воспроизведения физики УПС, которая имеет тонкую и слабо-уловимую природу. Область применимости математических формулировок, используемых для параметризации физических процессов в ПСА, также ограничена его слабо-устойчивым режимом.

Основным процессом, отвечающим за формирование УПС, является выхолаживание поверхности путем излучения ДВ радиации. Температурная инверсия, с одной стороны, подавляет турбулентные потоки, с другой - усиливает градиент скорости ветра. В зависимости от точки баланса силы статической устойчивости и силы динамической неустойчивости в УПС могут наблюдаться такие процессы как перемежающаяся турбулентность, внутренние гравитационные волны, кататические течения, струйные течения низкого уровня, плотностные потоки, а также отделение атмосферы от поверхности. Последний процесс представляет собой прекращение обмена теплом между атмосферой и поверхностью за счет подавления вертикальных турбулентных потоков. Адекватное описание приведенных выше процессов в ГМПП затруднено из-за высоких требований моделей к пространственному разрешению и, следовательно, вычислительным ресурсам. Задача усложняется при учете свойств поверхности. Излучательная способность поверхности

зависит от ее свойств, которые, как правило, заметно варьируются в пространстве. Турбулентные потоки в УПС наиболее чувствительны к орографическим элементам поверхности. Описание физических и динамических свойств УПС, таким образом, является нетривиальной задачей и требует как теоретического и экспериментального изучения свойств УПС, так и больших вычислительных ресурсов.

Основной трудностью при вычислении радиационных потоков является определение коэффициентов пропускания и поглощения парниковых газов, которые имеют очень большое количество полос поглощения и пропускания. В вычислениях данных коэффициентов используются различные статистические модели. Параметризация турбулентных потоков в гидродинамических моделях, используемых для оперативного прогноза, основана на теории подобия Мони́на-Обухова. Основной проблемой турбулентного замыкания является невозможность определить точный аналитический вид безразмерной функции от параметра стратификации, не прибегая к каким-либо дополнительным гипотезам.

Во второй главе приведен обзор, посвященный результатам исследований по сравнительному анализу результатов гидродинамического моделирования для условий УПС. Исследования, посвященные этой проблеме, проводились 4-12 лет назад. Выводы, сделанные различными авторами относительно природы ошибок и методов их решения отличаются друг от друга. Авторы приходят к разным выводам: что основным аспектом ошибки моделирования является относительно грубое разрешение вертикальной и горизонтальной сеток моделей, что проблема ошибок моделирования пограничного слоя в УПС может быть связана с ошибками физических параметризаций длинноволновой радиации и турбулентных потоков, что модели довольно реалистично воспроизводят температурную инверсию у земли, однако недооценивают тенденцию температуры на поверхности растительного покрова. Однако исследования выполнены для ограниченной территории, короткого интервала времени, для территории США, где климат

умеренный, для осеннего сезона. Моделирование выполнялось не в оперативном режиме, а с так называемым "холодным" стартом.

В **третьей главе** выполнен комплексный сравнительный анализ ошибок моделирования температурной структуры УПС и оценен вклад ошибки моделирования T2м и методологической ошибки в ошибку прогноза T2м. Сравнительный анализ выполнялся для оперативных моделей: IFS (ECMWF), NIRLAM (консорциум северных стран Европы), AROME (консорциум Франции и стран восточной Европы ALADIN), ARPEGE (метеослужба Франции) и GFS (NCEP).

Ошибки моделей анализируются за зимы с 01.12.2008 по 01.03.2009 и с 01.12.2009 по 01.03.2010. В работе основное внимание уделено анализу приземной температуры и температуры на нижнем модельном уровне. Для оценок использовались данные синоптических наблюдений SYNOP, данные комплексных измерений Арктического Научно-Исследовательского Центра Финского Метеорологического Института (АНИЦ ФМИ), Соданкюля, данные 36 станций мезомасштабной сети метеорологических наблюдений "Helsinki Test bed". Для сбора, обработки, архивации и предоставления комплексной информации пользователям мною была разработана автоматизированная система сбора и обработки данных. Данные находятся в свободном доступе на сайте <http://litdb.fmi.fi> в разделе "SMS data".

Срок прогноза для сравнения - 00:00 УКВ и 12:00 УКВ, период прогноза - 24 ч. Для сравнения с данными SYNOP, модельные данные, представленные на регулярной сетке, были проинтерполированы в точки расположения станций наблюдений с использованием метода билинейной интерполяции. При сравнении модельных данных с данными измерений АНИЦ ФМИ использовались данные ближайшего узла регулярной сетки модели. Для вычисления вертикального градиента температуры в слое 2-32м смоделированная температуры была проинтерполирована на уровень 32 м. Мезометеорологическая сеть наблюдений "Helsinki Testbed" имеет такую густоту, что обычно в пределах ячейки сетки модели расположено несколько

измерительных станций. Это позволяет оценить относительный вклад в ошибку прогноза ошибки моделирования и методической ошибки, имеющей место из-за пространственной изменчивости. Ошибка воспроизведения T2м в ячейке регулярной сетки модели при фильтрации локальной изменчивости вычислялась путем осреднения измеренной температуры в пределах ячейки сетки модели. По сути, она представляет собой ошибку моделирования. Локальная изменчивость в пределах ячейки сетки рассчитывалась как максимальная абсолютная разница измеренной температуры. Сравнение ошибки моделирования с локальной изменчивостью выполнено путем вычисления относительной ошибки моделирования, равной

$$f_{\text{mod}} = \frac{\Delta T_{\text{mod}}}{|\Delta T_{\text{obs}}|_{\text{max}}} \quad (1)$$

где $|\Delta T_{\text{obs}}|_{\text{max}}$ пространственная изменчивость в ячейке сетки.

Сравнительный анализ результатов гидродинамических моделей на основе данных синоптических наблюдений подтвердил (рисунок 1), что проблема больших ошибок модельного прогноза T2м при низких температурах не решена ни в одной модели. Значения T2м систематически завышаются всеми моделями при низких значениях T2м. На основе данных измерений температуры на 48-метровой мачте АНИЦ ФМИ показано, что низкие приземные температуры, которые плохо прогнозируются моделями, наблюдаются при устойчивой стратификации, сформировавшейся в условиях слабого ветра, отсутствии или слабой адвекции температуры, а также при отсутствии или малом количестве облачности нижнего яруса. На рисунке 2 представлены диаграммы зависимости ошибки воспроизведения T2м моделями от величины наблюдаемого вертикального градиента температуры. Сильно устойчивая термическая стратификация недооценивается всеми моделями. Анализ эволюции приземной температуры в модельных циклах «анализ-прогноз» показал, что, эволюция термической структуры ПСА в модельных

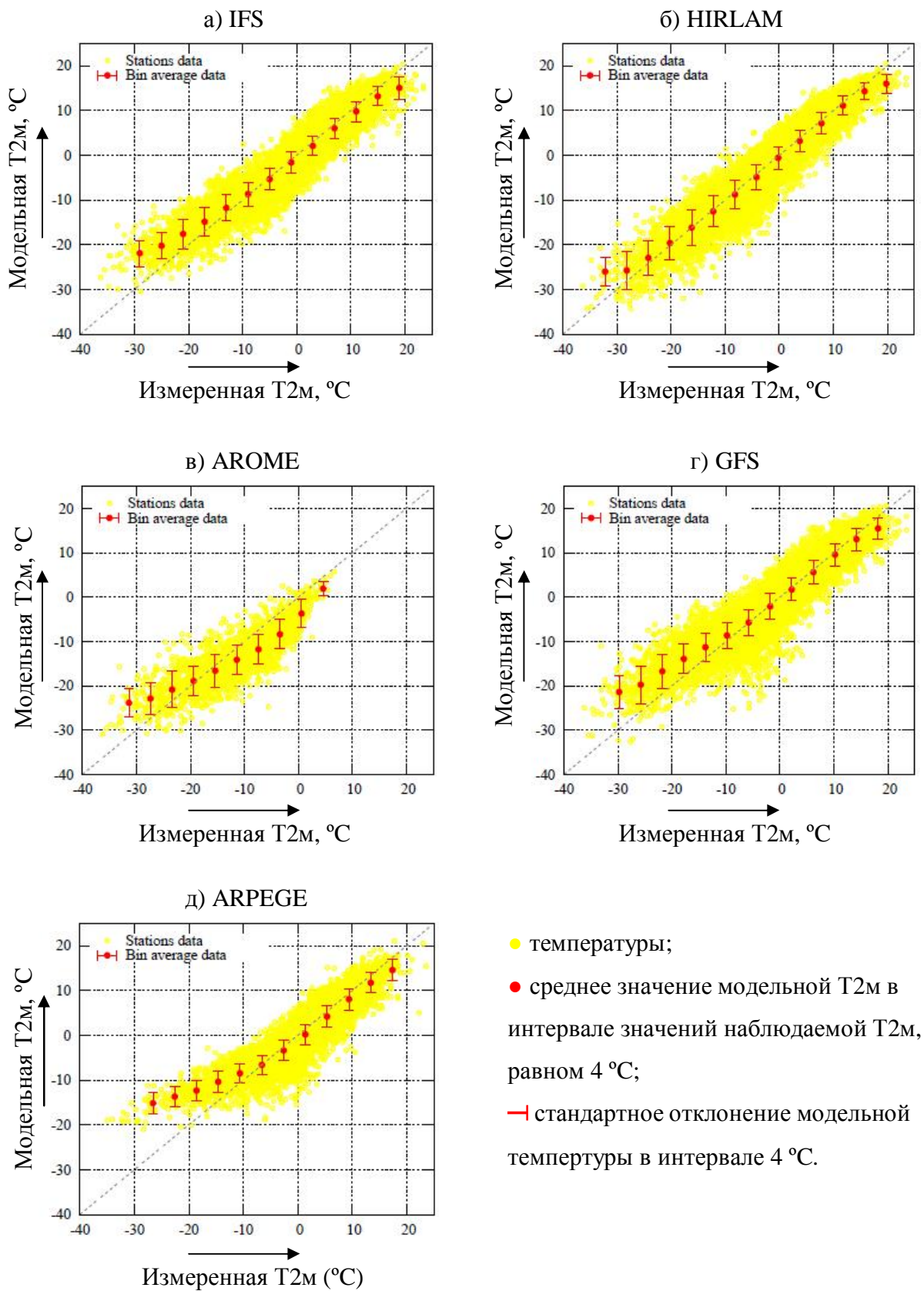


Рисунок 1 – Диаграмма рассеяния модельной температуры и наблюдаемой температуры на станциях SYNOP

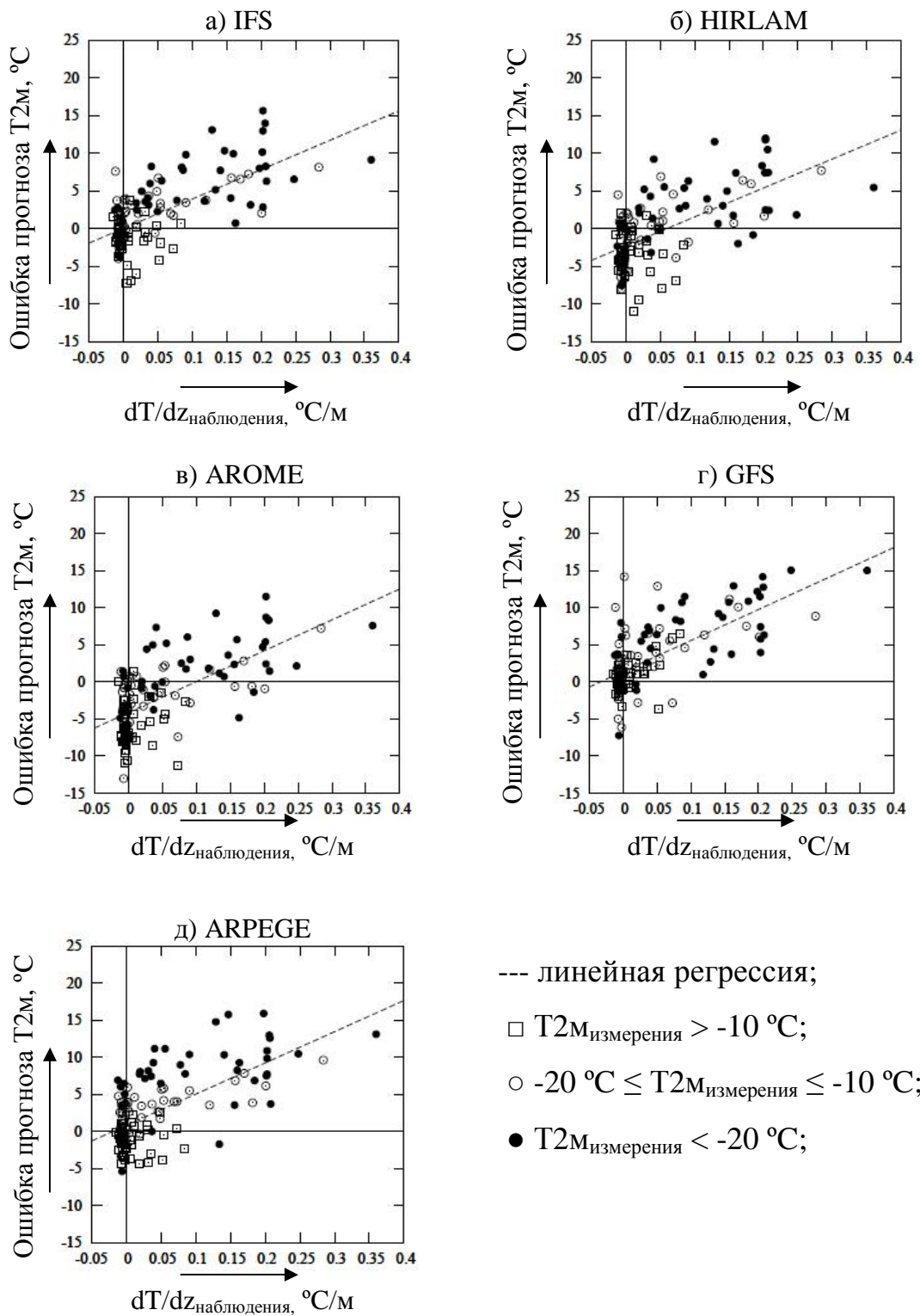


Рисунок 2 – Диаграмма рассеяния ошибки прогноза T_{2m} и вертикального градиента температуры в слое 3-32м, наблюдаемого на 48-м мачте АНИЦ ФМИ, Соданкюля

вычислениях более инертна по сравнению с наблюдаемой. Большие ошибки воспроизведения температурной структуры ПСА у земли имеют место также в начальных данных модельных циклов, что указывает на ошибки процедуры анализа данных наблюдений. T_2m является диагностической величиной, она вычисляется по значениям температуры на поверхности и температуры на нижнем модельном уровне. Она близка к температуре поверхности и, следовательно, определяется в основном балансом тепла на поверхности. Недооценка моделями величины устойчивой стратификации связана непосредственно с недооценкой степени выхолаживания поверхности. Модельный обмен теплом между атмосферой и поверхностью происходит интенсивнее, чем фактический. Эволюция теплового баланса на поверхности в модельных вычислениях более инертна по сравнению с наблюдаемой.

Анализ, выполненный по данным мезомасштабной сети «Helsinki Testbed» показал, что ошибка моделирования T_2m так же как и ошибка прогноза на станциях, имеет тенденцию к увеличению при понижении температуры. При этом ошибка моделирования T_2m доминирует над величиной пространственной изменчивости (рисунок 3) при низких температурах (с учетом того, что для моделей HIRLAM и AROME характерна отрицательная ошибка, которая нивелируется при низких значениях наблюдаемой температуры). Следовательно, роль горизонтального разрешения моделей при воспроизведении турбулентности и потоков ДВ радиации применительно к УПС над слабо изменяющейся в пространстве орографией незначительна. Это, в частности, подтверждается результатами модели AROME, которая имеет малые пространственные размеры горизонтальной сетки (2.5км) и негидростатический динамический блок.

В **четвертой главе** приведено описание модификации схем турбулентного замыкания модели HIRLAM для приземного и пограничного слоев атмосферы с использованием безразмерных функций от стратификации, предложенных в работе Сукорианского и др. (2005). Выражения для вертикальных потоков в слое постоянных потоков имеют следующую форму:

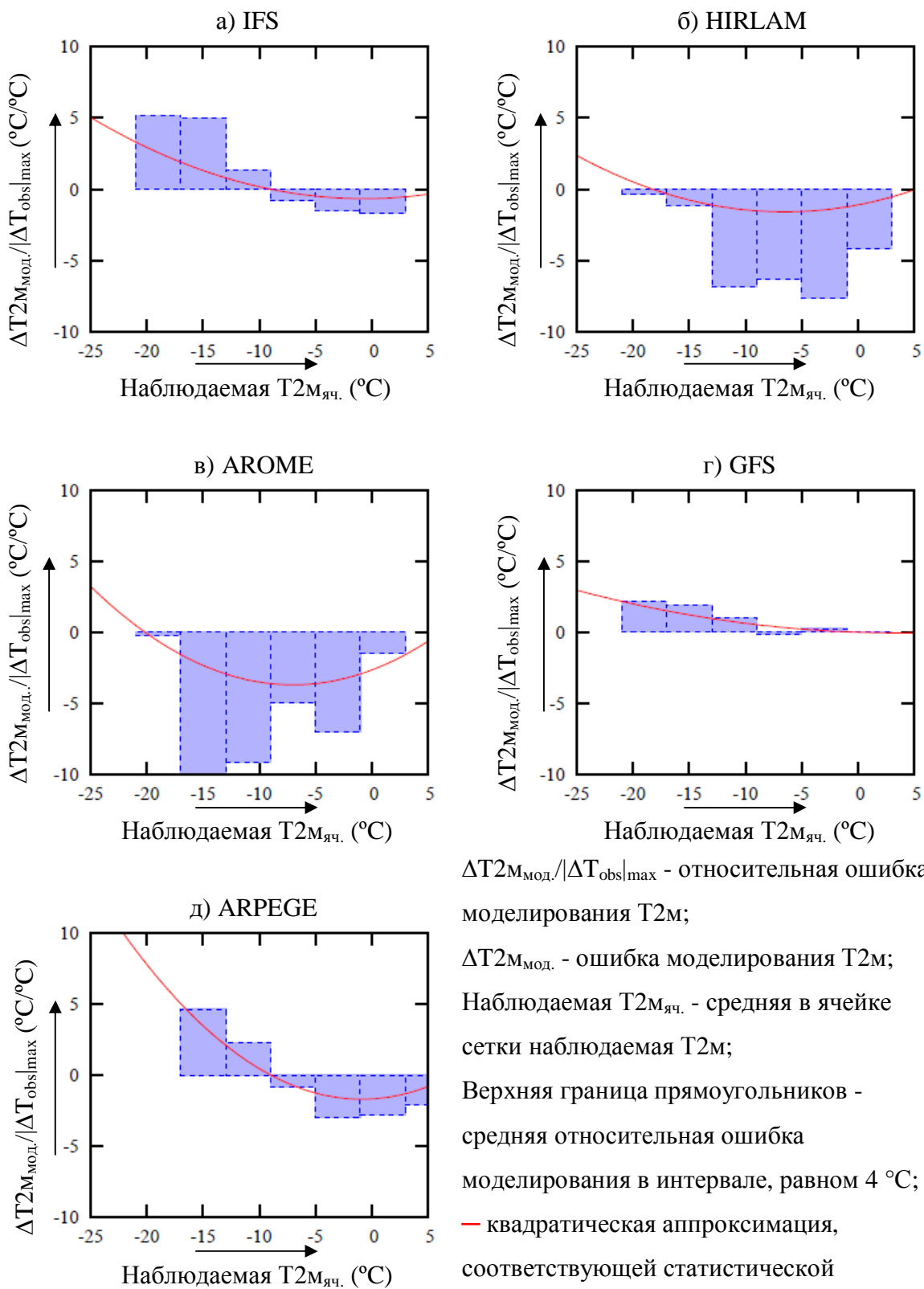


Рисунок 3 – Зависимость относительной ошибки моделирования $T_{2\text{м}}$ от средней по ячейке модельной сетки величины $T_{2\text{м}}$, измеренной на станциях сети "Helsinki Testbed"

$$\overline{w'g'} = C_g \Delta g |\dot{V}_N|, \quad (2)$$

где $\overline{w'g'}$ – средний вертикальный кинематический поток свойства γ ; γ соответствует скорости ветра, температуре, удельной влажности; C_γ соответствует коэффициенту сопротивления потока количества движения, или коэффициентам вертикального переноса тепла и влаги; $\Delta\gamma$ – разница между значением параметра γ на нижнем модельном уровне и его значением на поверхности; $|\dot{V}_N|$ – модуль скорости ветра на нижнем модельном уровне.

В базовой версии модели HIRLAM коэффициенты переноса количества движения C_γ определяются по схеме Льюиса (1979, 1982). Выражения для коэффициентов переноса количества движения C_M и тепла C_H , полученные на основе спектральной модели КНИМ, имеют следующий вид:

$$C_g = \frac{k^2}{\Psi_{|\dot{V}|} \Psi_g} \quad (3)$$

где $\Psi_{|\dot{V}|}$ – безразмерная функция от стратификации для количества движения, Ψ_g – безразмерная функция от стратификации для тепла, влаги и количества движения. Для случая нейтральной и устойчивой стратификации они определены равными:

$$\Psi_{|\dot{V}|} = \ln(V/V_0) + 2.25(V - V_0)(1 - 0.09V) \quad (4)$$

$$\Psi_g = \text{Pr}_0 \{ \ln(V/V_0) + 2(V - V_0) [1 + 1.022 + 0.07V(V^3 - 2.5V^2 + 2.5V - 1.25)] \} \quad (5)$$

где Pr_0 – число Прандтля для безразличной стратификации, $z = \frac{z}{L}$ – безразмерная функция стратификации в приземном слое; $z_0 = \frac{z_0}{L} = \frac{z_0}{z}$ –

безразмерная функция стратификации ниже уровня шероховатости; z_0 – параметр шероховатости для количества движения; L – масштаб Монина-Обухова. Замыкание системы уравнений для пограничного слоя атмосферы в модели HIRLAM основано на решении прогностического уравнения для кинетической энергии турбулентности и диагностического уравнения для турбулентного пути смешения. Традиционно моменты первого порядка выражаются через коэффициент турбулентного обмена K_g и градиент среднего значения прогностической скалярной величины γ , а именно

$$\overline{w\gamma'} = K_g \frac{d\gamma}{dz}. \quad (6)$$

В базовой версии модели HIRLAM K_g рассчитывается по формулам, предложенным Кужо и др. (2000) и Лендеринка и Хольтслага (2004). Модифицированная схема турбулентного замыкания для пограничного слоя атмосферы также основана на использовании прогностического уравнения для КЭТ и диагностического уравнения для пути смешения. Выражение для коэффициентов турбулентной вязкости и диффузии имеет следующий вид:

$$K_g = c_0 a_g l \sqrt{E}, \quad (7)$$

где $c_0=0.55$, a_g – безразмерная функция стратификации, l – путь смешения, рассчитывается на основе пути смешения для устойчивого случая и пути смешения Блакадара (1968) для безразличной стратификации. Путь смешения для устойчивого случая вычисляется на основе формулировок, используемых в модели HIRLAM. Для устойчивого режима функции стратификации для количества движения и тепла (влаги) определены, соответственно, равными:

$$a_{|\gamma|} = \frac{1 + 8Ri^2}{1 + 2.3Ri + 35Ri^2} \quad (8)$$

$$a_{T,Q} = \frac{1.4 - 0.01Ri + 1.29Ri^2}{1 + 2.44Ri + 19.8Ri^2} \quad (9)$$

где Ri – градиентное число Ричардсона.

Для тестирования модифицированной схемы и исследования чувствительности модели к модификации проведены численные эксперименты на основе одномерной версии модели HIRLAM. Одномерная модель рассчитывает эволюцию крупномасштабных физических характеристик при заданных значениях горизонтальной и вертикальной адвекции. Задаваемые параметры называются управляющими параметрами, их значения могут определяться на основе данных измерений. В качестве начальных и граничных условий использовались данные эксперимента BASE. В качестве эталонных профилей, с которыми сравнивались результаты численных экспериментов, использовались результаты моделей, разрешающих мелкую турбулентность (LES).

Для исследования чувствительности базовой и модифицированной схем к разрешению по вертикали были проведены эксперименты с высоким и с грубым разрешением - приблизительно 8 и 60 метров. Высота нижнего модельного уровня при данных разрешениях составляет приблизительно 3.5 и 31 метр, соответственно. Расчеты показали хорошую согласованность профилей температуры (рисунок 4), скорости ветра (рисунок 5) и турбулентных потоков, полученных на основе модифицированной схемы, с соответствующими эталонными профилями при высоком разрешении. При грубом разрешении наблюдается отклонение профилей, для температуры - в сторону холодных температур, для скорости ветра - в сторону более низких значений. Было выявлено, что схема Льюиса (базовая схема) не чувствительна к изменению вертикального разрешения в условиях устойчивого пограничного слоя, что не логично с точки зрения физики, так как организация УПС имеет очень тонкую структуру. Схема, модифицированная на основе теории КНИМ, чувствительна к изменению вертикального разрешения. Это логично с точки зрения физики, но не удобно с точки зрения практических приложений, так как

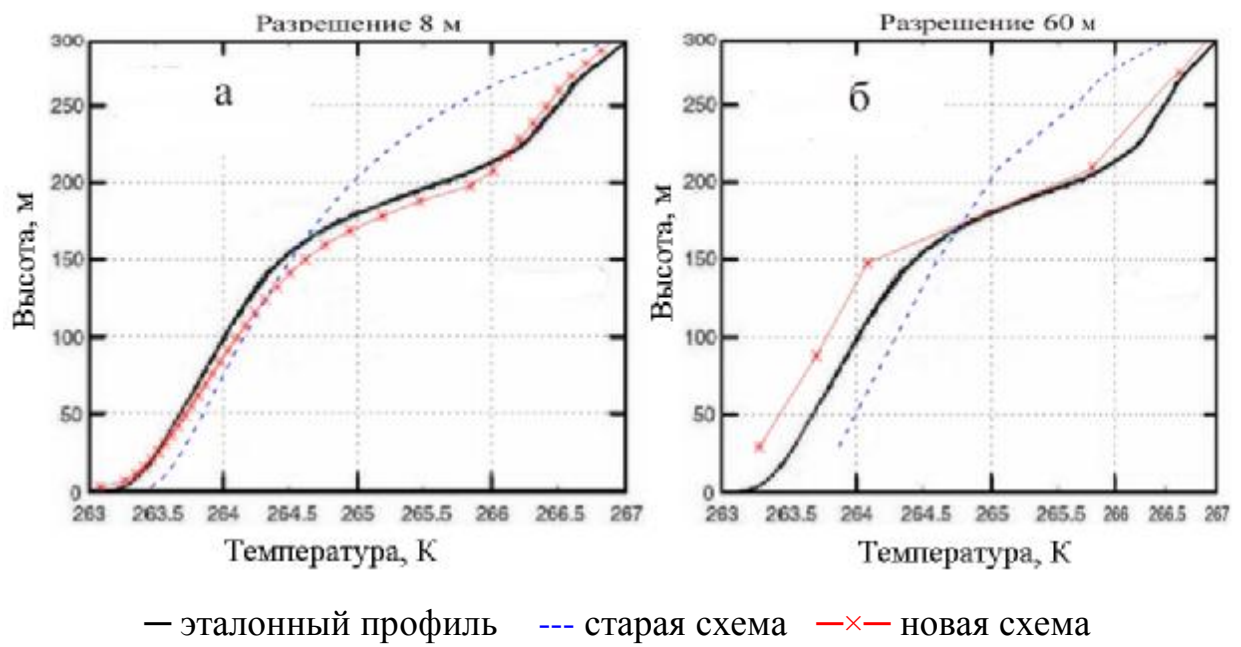


Рисунок 4 - Расчетные вертикальные профили потенциальной температуры

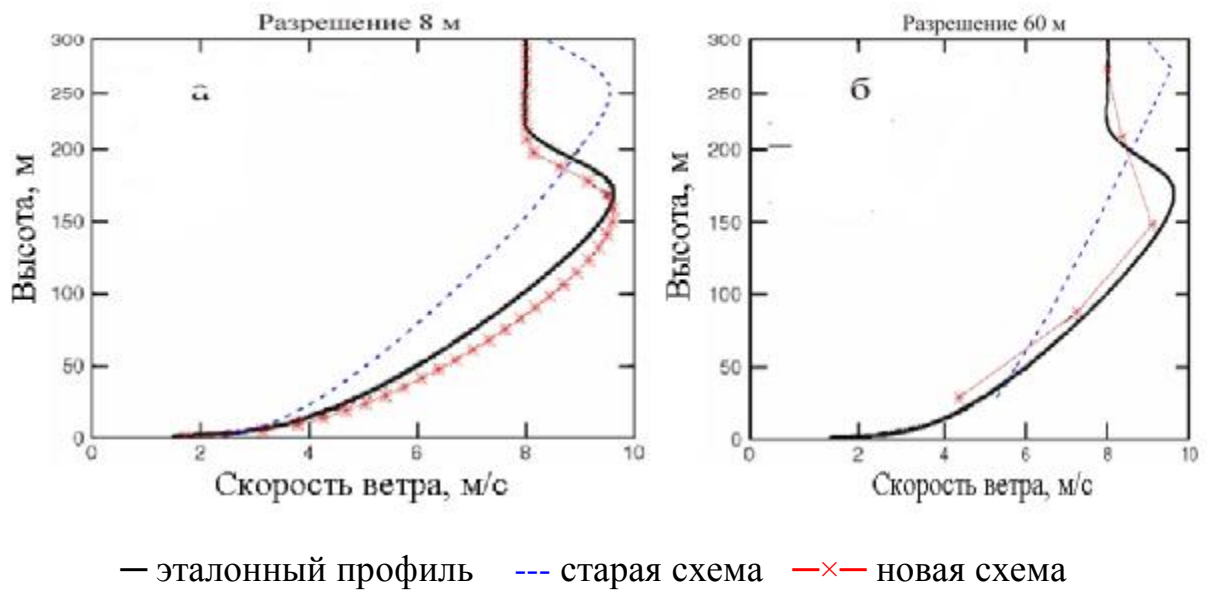


Рисунок 5 - Расчетные вертикальные профили скорости ветра

высокое разрешение требует больших вычислительных затрат.

В **заключении** сформулированы основные результаты и выводы, полученные в исследовании.

1. По стандартным измерениям оценена точность воспроизведения приземной температуры в зимний период оперативными моделями прогноза погоды IFS, NIRLAM, AROME, GFS и ARPEGE для территории Европы и европейской части России. Показано систематическое завышение всеми моделями величины приземной температуры при температурах ниже -10 C .

2. Оценена точность воспроизведения температурной структуры ПСА у земли с использованием данных комплексных метеорологических наблюдений АНИЦ ФМИ, Соданкюля. Показана значительная зависимость ошибки прогноза приземной температуры от величины наблюдаемой устойчивой термической стратификации. Выявлена существенная ошибка воспроизведения моделями термической структуры ПСА в слое у земли.

3. Выполнен сравнительный анализ эволюции термической структуры ПСА у земли в модельных циклах «анализ-прогноз». Показано, что рассматриваемые модели способны воспроизводить только слабо устойчивый режим, но не способны воспроизводить сильно устойчивый режим. Большие ошибки воспроизведения температурной структуры ПСА у земли имеют место также в начальных данных модельных циклов, что указывает на ошибки процедуры анализа данных наблюдений. Модельный обмен теплом между атмосферой и поверхностью происходит интенсивнее, чем наблюдаемый, а эволюция теплового баланса на поверхности в модельных вычислениях более инертна по сравнению с наблюдаемой.

4. Оценена точность воспроизведения приземной температуры по данным мезомасштабной сети метеорологических наблюдений «Helsinki Testbed». Показано, что при фильтрации локальной изменчивости наблюдаемой температуры в пределах ячейки модельной сетки ошибка моделирования $T_2\text{м}$, также, как и ошибка, рассчитанная по станциям, систематически растет при понижении температуры. Также показано, что ошибка моделирования

доминирует над пространственной изменчивостью наблюдаемой температуры. Это означает, что роль горизонтального разрешения над слабо изменяющейся орографией незначительна.

5. Выполнена модификация блока параметризации турбулентности с использованием теоретически обоснованных формулировок для безразмерных функций стратификации, предложенных Сукорианским и др., (2005) в одномерной модели HIRLAM для единичного столба воздуха. Показано, что профили температуры, скорости ветра и турбулентных потоков лучше воспроизводятся модифицированной схемой, особенно при высоком разрешении. Базовая схема нечувствительна к увеличению разрешения.

Таким образом, решение проблемы моделирования УПС подразумевает использования высокого разрешения по вертикали наряду с применением более точных математических формулировок.

Список публикаций по теме работы

Атласкин Е. М. Исследование чувствительности гидродинамической модели прогноза погоды к изменению функций стратификации в блоке параметризации турбулентности // Ученые записки РГГМУ. – 2010 № 15, С. 69–81.

Atlaskin E., Kangas M. Sodankylä data utilization for HIRLAM verification and 1D model studies // HIRLAM newsletter. – 2006 № 51, P. 103–112.

Блакитная П. А., Смышляев С. П., Атласкин Е. М., Шаарийбу Г. Модельное исследование влияния солнечной активности на газовый состав и тепловой режим атмосферы // Ученые записки РГГМУ – 2010 № 12, С. 25–37.

Смышляев С. П., Галин В. Я., Атласкин Е. М., Блакитная П. А. Моделирование непрямого влияния одиннадцатилетнего цикла солнечной активности на газовый состав атмосферы // Известия РАН. Физика атмосферы и океана – 2010 – № 5, Т. 46, С. 672–684.