

УДК 551.511.072

На правах рукописи

Кабелва Хамза Атхумани

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ ПОДСТИЛАЮЩЕЙ
ПОВЕРХНОСТИ НА КАЧЕСТВО ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПРОГНОЗА НА
ПРИМЕРЕ ВОСТОЧНОЙ АФРИКИ**

Специальность 25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

Автореферат диссертация на соискание ученой степени
кандидата физико-математических наук

г. Санкт-Петербург 2008 г.

Диссертация выполнена на кафедре метеорологических прогнозов
Российского государственного гидрометеорологического университета.

Научный руководитель: Профессор, доктор физико-математических наук
Смышляев Сергей Павлович
Научный консультант: Кандидат физико-математических наук
Курзенева Екатерина Владимировна
Официальные оппоненты: Профессор, доктор физико-математических наук
Биненко Виктор Иванович
Доцент, кандидат технических наук
Савватеев Сергей Петрович

Ведущая организация: Гидрометцентр РФ

Защита диссертации состоится 13 ноября 2008 г. в 13 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 07 октября 2008 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
профессор, доктор физ. - мат наук



А. Д. Кузнецов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы.

Задача улучшения качества прогноза погоды и учета различных физических процессов при его составлении всегда остается актуальной. В настоящее время прогноз погоды с различной заблаговременностью создается на основе оперативных прогностических систем, основанных на гидродинамических моделях атмосферы. В гидродинамических атмосферных моделях описание процессов на подстилающей поверхности и в растительном покрове играет важную роль, на что указывал еще Ричардсон в 1922 году. С помощью схемы параметризации подстилающей поверхности рассчитываются радиационные потоки и турбулентные потоки тепла и влаги вблизи подстилающей поверхности. Эти потоки являются интерфейсом между атмосферой и подстилающей поверхностью. Они определяются различными характеристиками поверхности, такими как альbedo, листовой индекс и другими, являющимися внешними по отношению к модели атмосферы полями. В связи с увеличением разрешения гидродинамических моделей возникает необходимость в использовании более подробных источников и баз данных о подстилающей поверхности для задания внешних полей.

На основе различных источников измерений, в основном, спутниковых, происходит накопление сведений о параметрах подстилающей поверхности. Развиваются базы данных об экосистемах, в результате новых больших проектов создаются новые наборы данных. Эти сведения могут быть использованы в атмосферном гидродинамическом моделировании для уточнения работы параметризационного блока подстилающей поверхности.

В принципе, использование этих сведений должно улучшать качество прогноза или качество воспроизведения климата региональными атмосферными моделями с высоким разрешением (например, HIRLAM, WRF и другие). Однако погрешности есть во всех базах данных, как в старых, так и во вновь разрабатываемых. Проблема существенно осложняется многопараметричностью задачи. Количество параметров подстилающей поверхности велико, и вклад различных параметров в моделируемые поля метеовеличин (температура, влажность и т. д.) может быть противоположным. В настоящее время не существует универсального метода сравнения результатов моделирования, который давал бы однозначный ответ на вопрос, какой из наборов внешних параметров предпочтительнее (за исключением тривиальных случаев, когда модельные результаты очень далеки от измеренных). Стандартных методов верификации по наблюдениям на станциях чаще всего оказывается совершенно недостаточно. Еще одна сложность связана с тем, что при составлении оперативного прогноза используются прогностические системы, включающие как гидродинамическую модель, так и блок ассимиляции данных измерений, особенности работы которого надо также принимать во внимание. Поэтому для принятия решения о целесообразности использования того или иного набора данных в гидродинамическом моделировании часто опираются на физические или географические соображения. В этой ситуации полезно исследование чувствительности результатов моделирования различных метеовеличин к заданию различных параметров подстилающей поверхности для различных синоптических ситуаций в различные сезоны года. Это исследование также полезно для оценки различных баз данных о параметрах подстилающей поверхности и выработки рекомендаций по дальнейшему их усовершенствованию.

В нашем исследовании использовались прогностическая система HIRLAM, разрабатываемая консорциумом, в который входят в основном северные страны (www.hirlam.org) со схемой параметризации подстилающей поверхности ISBA, первая версия которой была разработана авторами J. Noilhan и S. Planton в Meteo-France, и наборы данных о подстилающей поверхности HCS (консорциум HIRLAM) и ECOCLIMAP (Meteo-France). Исследование проводилось для региона Восточной Африки. Для этой территории процессы мезомасштаба мало изучены, имеется мало данных наблюдений, поля воспроизводятся гидродинамическими моделями хуже, чем для территории Европы. В свете описанных выше проблем этот регион представляет особый интерес.

Основные цели диссертационной работы:

- уточнение блока параметризации подстилающей поверхности модели HIRLAM на основе использования полей внешних параметров из набора данных ECOCLIMAP для территории Восточной Африки (Танзания)
- исследование чувствительности прогностической системы HIRLAM к заданию внешних данных о подстилающей поверхности из базы ECOCLIMAP для территории Восточной Африки
- оценка успешности краткосрочных гидродинамических прогнозов погоды прогностической системы HIRLAM для территории Восточной Африки при включении в нее базы ECOCLIMAP (с учетом особенностей алгоритма анализа влагосодержания в почве)
- получение оценок качества базы ECOCLIMAP для использования в системах прогноза погоды и выработка рекомендаций по дальнейшему развитию базы

Для выполнения поставленных целей в диссертационной работе автором были решены следующие задачи:

- Осуществлена настройка прогностической системы HIRLAM для территории Восточной Африки (Танзания)
- База данных о подстилающей поверхности ECOCLIMAP включена в прогностическую систему HIRLAM с возможностью обеспечения оперативной работы. Для этого разработан программный интерфейс между базой данных и моделью, который включает пересчет долей типов подстилающей поверхности в ячейке сетки
- Проведены численные эксперименты, получены оценки успешности краткосрочных прогнозов прогностической системы HIRLAM для рассматриваемой территории при задании внешних параметров подстилающей поверхности из двух исследуемых баз данных.

Основным методом исследования является моделирование.

Научная новизна

- Получены новые оценки чувствительности прогностической системы HIRLAM к заданию параметров подстилающей поверхности из различных баз данных для территории Восточной Африки в различные сезоны года;

- Получены новые оценки успешности прогнозов на основе (i) сравнения полей прогнозов с полями анализа (ii) результатов верификации по измерениям на станциях (iii) оценки реалистичности воспроизведения физических процессов. Оценки проведены с учетом особенностей алгоритма анализа влажности почвы. Все указанные этапы исследования выполнены для региональной модели высокого разрешения для экваториальной и тропической зоны впервые.

Теоретическая и практическая значимость:

Полученные оценки успешности прогнозов, чувствительности и результаты верификации позволяют сделать вывод о целесообразности использования базы ECOCLIMAP прогностической системой HIRLAM для территории Восточной Африки (Танзания). Полученные оценки также могут быть использованы при планировании включения базы данных ECOCLIMAP в другие прогностические системы (например, WRF). Разработанный интерфейс позволяет осуществлять оперативную работу прогностической системы HIRLAM с базой ECOCLIMAP. Предложенные рекомендации могут быть учтены разработчиками базы данных ECOCLIMAP при дальнейшем ее совершенствовании.

Основные положения, выносимые на защиту:

- Уточненный путем использования новой базы данных блок параметризации обмена атмосферы с подстилающей поверхностью.
- Оценки успешности прогнозов влажности почвы прогностической системой HIRLAM для территории Восточной Африки при задании параметров подстилающей поверхности из различных баз данных. Оценки по результатам сравнения прогностических полей с полями анализа показали, что добавки анализа влажности почвы при использовании базы данных ECOCLIMAP уменьшаются. Оценки качества воспроизведения физических процессов показали более реалистичный характер временного хода влажности почвы при использовании базы ECOCLIMAP.
- Оценки успешности прогнозов приземной температуры прогностической системой HIRLAM для территории Восточной Африки при задании параметров подстилающей поверхности из различных баз данных для разных сезонов года. Оценки по результатам сравнения прогностических полей с полями анализа и результаты верификации прогнозов по данным наблюдений показали, что прогнозы с использованием базы данных ECOCLIMAP более успешны для сезона дождей и менее успешны для сухого сезона (дневной период).
- Оценки чувствительности прогностической системы HIRLAM к заданию параметров подстилающей поверхности из различных баз данных для территории Восточной Африки. Оценки показали, что чувствительность проявляется в соотношении Боуэна, в поле стока; чувствительность 24-часовых прогнозов приземной температуры к заданию параметров подстилающей поверхности из различных баз данных составляет $\pm 3^\circ\text{C}$.

- В качестве рекомендаций по развитию базы можно предложить разработки по уточнению альbedo подстилающей поверхности для рассмотренной территории.

Обоснованность и достоверность полученных результатов обусловлена применением апробированных моделей, а также аргументированностью исходных положений, непротиворечивостью рассуждений, корректным использованием математического аппарата.

Апробация диссертационной работы

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

- На научном семинаре кафедры метеорологических прогнозов Российского государственного гидрометеорологического университета
- На Итоговой сессии ученого совета РГГМУ, январь 2006
- На научном семинаре в Университете Хельсинки, Финляндия, сентябрь 2007.
- На международном семинаре «Гидродинамический прогноз погоды в странах Восточной Африки» для национальных метеослужб стран Восточной Африки (Бурунди, Кения, Танзания, Руанда и Уганда) NMS-EAC (National Meteorological Service of East African Community) (Энтеббе, Уганда, январь 2008).

Публикации:

Результаты диссертации опубликованы в 3 печатных работах, материалы использованы в научно-исследовательских отчетах.

Структура и объем работы:

Диссертация состоит из введения, четырех глав, заключения и списка использованных источников, включающего 67 наименований. Общий объем работы составляет 119 страниц, включая 27 рисунков и 2 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 приводится краткое изложение содержания диссертации.

В первой главе кратко описывается географическое положение, характер и рельеф местности, экосистемы и климата Танзании. Необходимость такого описания связана с тем, что дальнейшие исследования и численные эксперименты проводились для области, покрывающей в основном территорию этой страны. Изучение географических особенностей территории необходимо, в основном, для постановки и анализа результатов численных экспериментов.

Танзания является самой большой из стран восточной Африки. Она расположена к Югу от Экватора, 29-42° в. д. и 1-12° ю. ш. В большей части страны климат субэкваториальный (или климат экваториальных муссонов), только северная ее часть отно-

сится к экваториальной зоне. Погода определяется прохождением ВЗК и циркуляциями мезомасштаба, в рассматриваемом регионе это влияние больших озер (Виктория, Танганьика, Ньяса) и орографии. Прохождение ВЗК определяет существование двух основных сезонов года для региона: сезона дождей с марта по май и сухого сезона с июня по сентябрь.

Во второй главе приводится обзор существующих баз и наборов данных о подстилающей поверхности.

Развитие гидродинамических моделей происходит параллельно с накоплением различных сведений о параметрах подстилающей поверхности. В настоящее время в оперативных прогностических моделях внешние параметры задаются чаще всего на основе различных спутниковых данных.

Один из видов используемой спутниковой информации - измерения высокочувствительного радиометра AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). По ним рассчитывается нормированный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index). В 1992-93 годах проводился глобальный проект по сбору данных о годовом ходе NDVI с пространственным разрешением 1 км. На основе полученной в результате измерений сырой и обработанной информации было создано несколько наборов данных по типам подстилающей поверхности, которые условно можно разделить на две большие группы.

К первой группе относятся наборы данных, связанные с глобальным проектом по определению характеристик подстилающей поверхности GLCC (Global Land Cover Characteristics). В проекте принимало участие большое количество исследовательских институтов, правительственных организаций и университетов США и Европы. Для построения набора данных кроме сырых данных AVHRR использовались также региональные данные, карты и атласы о характеристиках почвы, растительности и др. С помощью кластерного анализа проводилась первичная автоматическая классификация данных NDVI с последующим уточнением при использовании различных источников данных. При интерпретации широко использовался компьютерный инструментарий по обработке изображений, однако процесс классификации не был до конца автоматизирован и зачастую был близок к традиционной ручной интерпретации снимков. Далее проводилась маркировка классов. Затем номенклатура типов подстилающей поверхности была преобразована в «Глобальный список экосистем», который содержит 99 классов экосистем. «Глобальный список экосистем» соотносится с типами и классами подстилающей поверхности, разработанными для различных моделей биосферы и взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью. Окончательным этапом было создание производных наборов данных, включающих типы поверхности в соответствии с классификациями для использования в различных моделях биосферы. В результате имеются 7 наборов данных с различными легендами для использования различными атмосферными моделями, а также для других целей. Некоторые из наборов данных использовались в следующих проектах для создания новых наборов данных.

Ко второй группе можно отнести наборы данных, не связанные с проектом GLCC. База данных PELCOM (Pan-European Land Use and Land Cover Monitoring) создана для территории Европы. Для построения использовались наборы сырых данных AVHRR и другие источники данных. База имеет разрешение 1 км, представлено 18 типов подстилающей поверхности. Была создана база данных на основе международного спутникового проекта по описанию поверхности Земли и климата ISLSCP (International Satellite Land Surface Climatology Project), в проекте принимало участие

большое количество университетов и правительственных организаций. Комбинировались различные карты и атласы, а также спутниковые снимки. В результате была создана база данных по свойствам подстилающей поверхности и климату, метеорологии и гидрологии, радиационным потокам и типам почв с разрешением 0,25 градуса. База данных CORINE (Coordination of Information on the Environment) содержит данные для Европы, которые были получены путем визуальной обработки информации спутников Landsat-TM и SPOT-XS, максимальное разрешение 100 м. Представлено 44 класса растительности. База предназначена для решения широкого круга задач, распространяется на коммерческой основе. Набор данных по типам подстилающей поверхности Университета Мэрилэнд UMD основан на обработке глобального набора сырых данных AVHRR, имеет глобальное покрытие, разрешение 1 км, различается 13 типов подстилающей поверхности.

Во второй главе диссертационной работы также описаны методы учета неоднородностей подстилающей поверхности в моделях атмосферы - метод агрегации параметров и метод агрегации потоков. Приведено также описание подхода, который в международной литературе получил название тайлинг (от tile - плитка). Модели атмосферы обычно имеют более грубое разрешение, чем информация, доступная из баз данных о подстилающей поверхности. Возникают возможности для агрегации информации. Метод агрегации потоков физически более обоснован и математически более корректен, чем метод агрегации параметров, так как зависимость потоков от параметров поверхности может быть существенно нелинейной. Однако его использование ведет к заметному увеличению вычислительных затрат. Обычно при применении тайлинг-подхода используется комбинация методов агрегации потоков и агрегации параметров, когда, например, расчет потоков для типа подстилающей поверхности «лес» производится один раз, но листовой индекс для леса различного типа внутри ячейки сетки осредняется.

Перечисленные выше наборы данных широко используются в атмосферном моделировании в качестве основы для генерации полей параметров подстилающей поверхности. Данные представляют собой поля типов экосистем (например, смешанный лес, саванна и т.д.). Исходя из типа экосистем может быть получен годовой ход значений самих параметров подстилающей поверхности, таких как листовой индекс или альbedo. В большинстве случаев для определения значений параметров используются сводные таблицы, составленные на основе климатической информации по различным литературным источникам. Модель на входе, как правило, получает данные по типам экосистем, а внутри параметризационной схемы происходит обращение к соответствующим таблицам.

Отдельно необходимо отметить базу данных ECOCLIMAP, которая комбинирует созданные ранее наборы данных и в некотором смысле является базой второго поколения. Так как в диссертационной работе численные эксперименты проводились для базы ECOCLIMAP, большое внимание уделено описанию принципов ее построения. Разработка базы была начата в Météo-France в конце 90-х годов. Набор данных по типам подстилающей поверхности, используемый в ECOCLIMAP, является глобальным и имеет разрешение 1 км, различается 215 экосистем. К набору данных прилагается программное обеспечение, в котором реализованы методы для учета годового хода параметров растительности для различных типов экосистем для различных областей земного шара. Методы разработаны на основе климатической информации и дополнительной статистической обработки сырых данных NDVI. Максимально возможное

разрешение по времени составляет декаду. Таким образом, из полей типов экосистем уже в базе данных генерируются поля параметров подстилающей поверхности, которые можно непосредственно использовать в параметризационной схеме. Программное обеспечение дает возможность использовать некоторые виды агрегации типов экосистем для применения тайлинг-подхода и генерирует поля долей покрытия ячейки сетки атмосферной модели основными типами подстилающей поверхности.

В большинстве баз данных источником информации о характеристиках почвы служит почвенная база данных FAO (Food and Agricultural Organization) с разрешением 10 км.

В третьей главе дается очень краткий обзор разных схем параметризации поверхности суши в моделях атмосферы.

В главе приводится также краткое описание схемы параметризации подстилающей поверхности ISBA, которая использовалась в данной работе. Схема взаимодействия между атмосферой, биосферой и почвой ISBA (Interaction Soil Biosphere Atmosphere) используется в модели HIRLAM и других прогностических системах. Схема первоначально была разработана J. Noilhan и S. Planton в Meteo-France для описания процессов в растительном покрове и деятельном слое подстилающей поверхности, затем дорабатывалась рядом авторов. Достоинством этой схемы является минимальный набор параметров, внешних по отношению к модели. Система уравнений схемы ISBA содержит пять прогностических уравнений (1-5): для температуры T_s и влагосодержания w_s верхнего слоя почвы, температуры T_2 и влагосодержания w_2 глубокого слоя почвы и для количества влаги, задержавшейся на поверхности растительности w_r :

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_t G - \frac{2p}{t} (T_s - T_2); \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{t} (T_s - T_2); \quad (2)$$

$$\frac{\partial w_s}{\partial t} = \frac{C_1}{r_w d_1} (P_g - E_g) - \frac{C_2}{t} (w_s - w_{geq}); \quad (3)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{r_w d_2} (P_g - E_g - E_{tr}) - \frac{C_3}{t} \max[0, (w_2 - w_{fc})]; \quad (4)$$

$$\frac{\partial w_r}{\partial t} = veg \cdot P - E_r, \quad w_r \leq w_{r \max}. \quad (5)$$

Здесь G – тепловой баланс подстилающей поверхности, t - продолжительность суток (86400 сек), C_t , C_1 , C_2 и C_3 - инерционные коэффициенты, характеризующие скорость обмена с поверхностью количеством тепла и влаги и зависящие от типа поверхности, d_1 , d_2 – глубина верхнего слоя и глубокого слоя почвы ($d_1=1$ см, d_2 зависит от глубины корневой системы), r_w – плотность воды, P – интенсивность осадков на уровне поверхности растительности, veg - поверхность ячейки сетки, покрытая растительно-

стью, $P_g = (1 - veg)P$ – интенсивность осадков, достигающих поверхности почвы, E_g – испарение с поверхности почвы, не покрытой растительностью, E_{tr} – транспирация с поверхности растительности, E_r – испарение влаги, задержавшейся на поверхности растительности в результате выпадения осадков, w_{fc} – влажность почвы, при которой начинается гравитационный сток воды в более глубокие слои, w_{geq} – влажность почвы, при которой имеет место равновесие между капиллярными и гравитационными силами, w_{rmax} – максимальное количество влаги, которое может задержаться на поверхности растительности. Разные типы влагоемкости почвы параметризуются с использованием процентного содержания песка *sab* и глины *arc* в почве. Тепловой коэффициент C_t определяется как

$$C_t = \left[\frac{1 - veg}{C_g} + \frac{veg}{C_v} \right]^{-1}, \quad (6)$$

где C_g и C_v коэффициенты тепловой инерции для почвы и растительности соответственно. Коэффициент тепловой инерции для почвы зависит от процентного содержания песка и глины, а для растительности задается постоянным и зависит от типа растительности.

Тепловой баланс G представляет собой сумму радиационного баланса R , турбулентного потока тепла H и потока тепла за счет испарения LE (L – теплота конденсации). Радиационный баланс подстилающей поверхности рассчитывается в радиационном блоке модели, но, как известно, зависит от альбедо поверхности и ее излучательной способности. Турбулентный поток тепла H рассчитывается по формуле

$$H = r_N c_p C_H V_N (T_s - T_N). \quad (7)$$

Здесь c_p – теплоемкость воздуха при постоянном давлении, C_H – коэффициент турбулентного обмена для количества тепла, T_N , V_N , и r_N – температура, скорость ветра и плотность воздуха на нижнем уровне модели, соответственно. Коэффициент обмена для количества тепла C_H связан с параметром шероховатости поверхности. Скрытый поток тепла зависит от общего испарения с поверхности E :

$$E = (1 - veg) \cdot E_g + veg \cdot E_v,$$

где $E_v = E_r + E_{tr}$ – общий поток влаги с поверхности растительности. Поток влаги с поверхности почвы, не покрытой растительностью, рассчитывается следующим образом:

$$E_g = r_N C_H V_N h_u (q_{sat}(T_s) - q_N), \quad (8)$$

где $q_{sat}(T_s)$ – массовая доля водяного пара при насыщении при температуре T_s , q_N – массовая доля водяного пара на нижнем уровне модели, h_u – относительная влажность у подстилающей поверхности, которая, в свою очередь, зависит от отношения влажно-

сти почвы w_s к влагоемкости w_{geq} . Потоки влаги с поверхности растительности рассчитываются следующим образом. Рассчитываются испарение с части растительности, покрытой дождевой влагой:

$$E_r = \frac{d}{R_a} r_N (q_{sat}(T_s) - q_N), \quad R_a = \frac{1}{C_H V_N} \quad (9)$$

и транспирация:

$$E_{tr} = \left(\frac{1-d}{R_a + R_s} \right) r_N (q_{sat}(T_s) - q_N), \quad R_s = \frac{R_{s\min}}{LAI} \left(\frac{F_1}{F_2 F_3 F_4^4} \right). \quad (10)$$

Здесь R_a - аэродинамическое сопротивление, R_s - устьичное сопротивление, $R_{s\min}$ - минимальное устьичное сопротивление, $d = (w_r/w_{r\max})^{2/3}$ - доля растительности, покрытая влагой, LAI - листовой индекс, F_1, F_2, F_3, F_4 - функции, зависящие от фотосинтетически активной радиации, количества влаги в районе корневой зоны, дефицита влаги и температуры воздуха, соответственно. Максимальное количество влаги, которое может задержаться на поверхности растительности $w_{r\max}$ параметризуется следующим образом:

$$w_{r\max} = 0,2 \cdot veg \cdot LAI$$

Для случая, когда подстилающей поверхностью является море/озеро, значение температуры поверхности сохраняется постоянным для всего срока прогноза.

Все внешние параметры в схеме ISBA можно сгруппировать в зависимости от процессов, в описании которых эти параметры принимают участие. Это параметры растительности: листовой индекс, минимальное устьичное сопротивление, процент покрытия растительностью, глубина корневой системы, сюда же можно условно отнести параметр шероховатости. Радиационные параметры: альbedo, излучательная способность поверхности. Параметры почвы: процентное содержание песка и глины.

Учет неоднородностей подстилающей поверхности в модели HIRLAM производится с использованием мозаичного тайлинг-подхода. В каждой ячейке сетки существуют пять основных типов поверхности: вода (море/озеро), морской (озерный) лед, поверхность без растительности, высокая растительность и низкая растительность. Для этих основных типов подстилающей поверхности используется метод агрегации потоков, а внутри каждого из основных типов используется метод агрегации параметров для разных экосистем. Для реализации тайлинг-подхода необходимо знать долю ячейки сетки, покрытую каждым из основных типов подстилающей поверхности $fr_i, i = (1..5)$.

В четвертой главе описываются особенности подключения нового набора данных ЕСОCLIMAP к блоку подстилающей поверхности прогностической системы HIRLAM, построение численных экспериментов, проводится их анализ.

Приводятся краткие сведения о прогностической системе HIRLAM. Прогностическая система представляет собой региональную численную модель прогноза погоды

с системой ассимиляции данных. В настоящее время в оперативной версии модели используется квазистатическое приближение. В модели используется полулагранжев полунявный метод для расчета адвективных членов, используется повернутая сферическая система координат по горизонтали и гибридная система координат по вертикали. Для задания граничных условий используются данные глобальной модели IFS Европейского Центра Среднесрочных Прогнозов Погоды. Физические параметризации включают: схему поверхности ISBA, параметризацию турбулентности на основе решения уравнения баланса энергии турбулентных пульсаций, схемы конденсации, микрофизики облаков и конвекции на основе подхода «поток массы», радиационную схему и параметризацию гравитационных волн. Анализ переменных в свободной атмосфере в оперативном режиме использует трехмерный вариационный метод, а в исследовательском режиме также и четырехмерный вариационный метод.

Описывается система генерации файлов внешних данных HIRLAM (HIRLAM Climate System, HCS). Источниками данных для нее явились наборы данных GLCC, CORINE, PELCOM, а также почвенные карты FAO. Разрешение этих наборов данных разное – от 100 м до 1 км. В HCS генерируется промежуточный набор данных, полученных на их основе. HCS обобщает и закругляет данные, в результате промежуточные данные содержат 20 типов подстилающей поверхности с разрешением 2,5 км. Расчет характеристик поверхности производится по сводным таблицам о соответствии параметров подстилающей поверхности различным типам экосистем и их годовом ходе, составленным по литературным источникам.

База данных ECOCLIMAP была включена в прогностическую систему HIRLAM с возможностью обеспечения оперативной работы. Для этого необходимо было модифицировать программный код модели HIRLAM с тем, чтобы вывести расчет параметров подстилающей поверхности в зависимости от типа экосистемы из самой модели в систему генерации внешних данных. Приводятся некоторые технические аспекты работы. Описывается разработанный интерфейс, который обеспечивает пересчет долей покрытия ячейки сетки атмосферной модели основными типами поверхности (в HIRLAM и ECOCLIMAP различаются методики расчета fr_i за счет неучета в общей сумме площади поверхности воды в ECOCLIMAP) и запись информации в файлы внешних полей HIRLAM в коде GRIB (GRIdded Binary).

Для численных экспериментов система была настроена на область интегрирования $3,0^\circ$ с. ш. - $13,5^\circ$ ю. ш., $26^\circ,0$ в. д. - $42,5^\circ$ в. д. с горизонтальным разрешением $0,1^\circ$ (примерно 11 км) без поворота сферической системы координат, размер области 166 x 166 точек, 40 уровней по вертикали (слой от земли до высоты примерно 10 гПа). Продолжительность каждого эксперимента составляла 10 суток: с 1 по 10 апреля 2006 года (сезон дождей) и с 1 по 10 июля 2006 года (сухой сезон). Циклы анализа повторялись каждые 6 часов, каждые 6 часов стартовал прогноз на 27 часов. Таким образом, для каждого эксперимента было выполнено 40 прогнозов на 27 часов. К сожалению, схема ассимиляции данных для свободной атмосферы в модели HIRLAM построена для применения в умеренных широтах и для тропического региона работает плохо, поэтому в наших экспериментах она была отключена. Работал только блок ассимиляции данных у подстилающей поверхности, получаемые в результате анализа переменные – температура и влажность почвы. Для задания начальных значений прогностических переменных на всех модельных уровнях в атмосфере использовались поля анализов модели IFS, проинтерполированные с крупной сетки модели IFS на мелкую сетку мо-

дели HIRLAM. Начальные значения для прогностических переменных в блоке подстилающей поверхности представляли собой результаты усвоения HIRLAM (усваивались данные стандартных измерений приземных температуры и влажности, данные измерений температуры поверхности воды, в качестве фоновых полей использовались 6-часовые прогнозы HIRLAM). Несмотря на некоторое снижение общего качества прогноза за счет отключения ассимиляции данных в атмосфере выше приземного подслоя, учет в экспериментах процессов у подстилающей поверхности (которые и представляли основной интерес для целей исследования) позволяет считать выводы о чувствительности системы достаточно надежными.

Было организовано два основных эксперимента: эталонный TZREF, основанный на системе генерации внешних полей HCS и эксперимент TZECO с базой ECOCLIMAP. Дополнительный эксперимент TZHIR с системой HCS, но модифицированным кодом HIRLAM, служил для контроля программных ошибок, связанных с включением базы ECOCLIMAP.

Рассмотрены отличия внешних полей, задаваемых из двух баз – HCS и ECOCLIMAP для территории Восточной Африки. При построении карт для удобства сравнения значения некоторых параметров умножались на долю типа поверхности f_i (оценка удельного веса параметра). Доли покрытия основными типами подстилающей поверхности (тайлами) в двух базах данных практически не различаются.

В целом ECOCLIMAP дает больше растительности по сравнению с HCS, поля более сглажены и более четко выделяются области одинакового типа растительности. В июле наблюдаются более высокие значения листового индекса в базе HCS, чем в ECOCLIMAP, поля представлены на рисунке 1(а,б). Согласно базе HCS в июле в регионе растительность более развита. Однако это не соответствует действительности, так как в это время наблюдаются минимальные значения осадков (сухой сезон) и растительность, наоборот, подавлена. В апреле имеет место обратная картина. Судя по всему, параметры растительности в HCS для всего земного шара ориентированы на динамику растительности лишь в умеренных широтах Северного полушария, так как система HIRLAM разрабатывалась в основном для прогнозов в Европе. Доля покрытия поверхности растительностью коррелирует с листовым индексом и также значительно различается в двух базах данных. Различия для минимального устьичного сопротивления, глубины корневой системы и параметра шероховатости также значительны. Для глубины корневой системы важнейшее отличие состоит в том, что для высокой тропической растительности в ECOCLIMAP она задается равной 8 м против 3 м в базе HCS. Параметр шероховатости по данным ECOCLIMAP в среднем ниже, чем по данным HCS. ECOCLIMAP дает более сглаженную информацию о параметрах почвы по сравнению с HCS. В целом процентное содержание песка по данным HCS выше - более 50%. Карты альbedo низкой растительности для июля представлены на рисунке 1(в,г). По данным ECOCLIMAP альbedo, хоть и не очень существенно, но меняется в течение года, а по данным HCS не меняется. В июле (сухой сезон) в базе данных HCS альbedo

Успешность прогнозов можно оценивать по-разному. Наибольшее доверие, как правило, оказывается результатам стандартной верификации по данным наблюдений. Однако этот метод имеет ограниченное применение в условиях недостаточного количества наблюдений или при их низкой репрезентативности. Можно также проводить сравнение полей прогноза какой-либо метеовеличины на определенную дату и ее анализа за этот срок. Эти оценки будут не такими строгими, как при использовании

чистых результатов измерений, так как поля анализа имеют некоторую ошибку. Однако оценки на основе сравнения полей анализа и прогноза можно провести для территории, а не только для отдельных точек, как в случае стандартной верификации. Мы воспользовались как стандартной верификацией, так и сравнением полей прогноза и анализа. Кроме того, оценивалась реалистичность воспроизведения некоторых физических процессов.

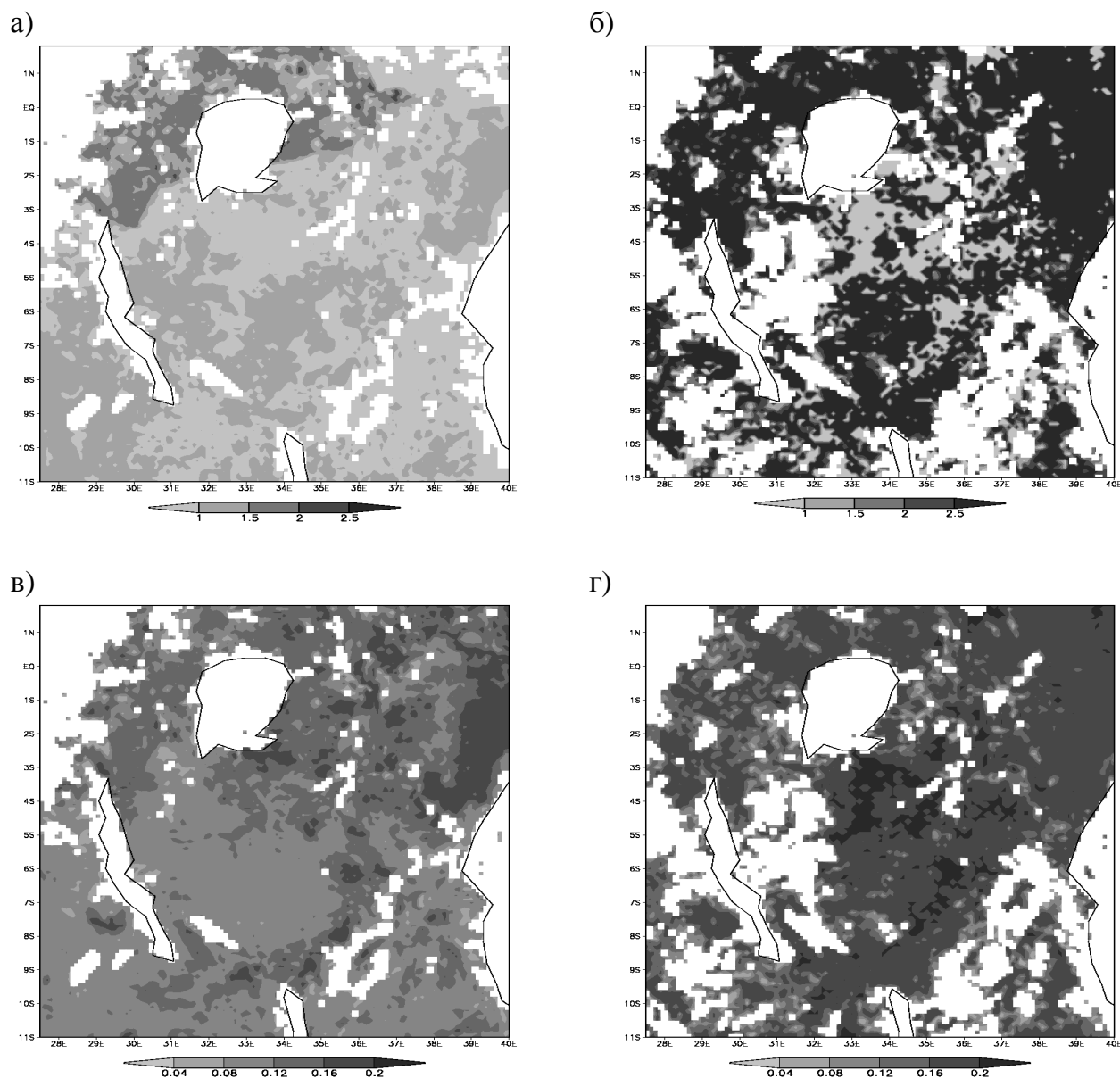


Рисунок 1. Параметры подстилающей поверхности в базах ECOCLIMAP и HCS. Листовой индекс для низкой растительности в июле а) в базе ECOCLIMAP б) и в базе HCS. Альbedo низкой растительности, июль в) в базе ECOCLIMAP и г) в базе HCS. Параметры умножены на долю поверхности ячейки сетки, покрытой низкой растительностью.

Еще одна сложность заключается в следующем. Необходимо оценить качество прогностической системы в целом, то есть системы анализ-прогноз, а не только про-

гнозов по самой гидродинамической модели. Трудность связана с особенностями широко распространенного алгоритма анализа влажности почвы. Измерения влажности почвы оперативно не производятся. Алгоритм анализа построен таким образом, что модельная влажность почвы искусственно завышается или занижается в зависимости от ошибки 6-часового прогноза температуры и относительной влажности на уровне 2 м. Это означает, что влагосодержание почвы становится в некоторой степени подгонным параметром. Чувствительность прогностической системы к любым изменениям понижается. О реальной успешности использования новых параметров можно судить по инкрементам (добавкам) анализа влажности почвы – чем они меньше, тем успешнее прогноз. На рисунке 2(а,б) в качестве примера представлены поля инкрементов анализа влажности почвы за срок 9 апреля в 15 часов по местному времени. Инкременты в эксперименте TZECO меньше, чем в эксперименте TZREF, то есть прогноз для эксперимента TZECO успешнее. На рисунке 2(в,г) представлен временной ход влажности почвы за время эксперимента в июле (сухой сезон). В эксперименте TZREF временной ход влажности почвы нереалистичен – он имеет суточный ход с минимумом в утренние часы, чего в природе не наблюдается. Для эксперимента TZECO наблюдается постепенное высыхание почвы в сухой сезон в течение 10 дней, что реалистично и обычно имеет место в природе.

Для прогнозов приземной температуры оценки успешности по результатам стандартной верификации и сравнению полей анализа и прогноза согласуются друг с другом. Усваивались в процедуре анализа и использовались для верификации измерения в среднем с 6 станций, это очень немного для такой территории. Поэтому оценки на основе стандартной верификации нельзя назвать надежными. Оценки качества прогнозов различны для сухого сезона и сезона дождей. Для сезона дождей прогноз для двух экспериментов отличался незначительно или был успешнее для эксперимента TZECO. Среднеквадратическая ошибка шестичасовых прогнозов представлена на рис. 3(а), поля инкрементов анализа приземной температуры представлены на рис. 3(в,г). Среднеквадратические ошибки прогноза для двух экспериментов отличаются незначительно, но инкременты анализа температуры в эксперименте TZECO меньше, чем в эксперименте TZREF, то есть прогноз для эксперимента TZECO успешнее. Для сухого сезона среднеквадратическая ошибка шестичасовых прогнозов представлена на рис. 3(б), поля инкрементов анализа приземной температуры представлены на рис. 3(д,е). Среднеквадратические ошибки прогноза для эксперимента TZECO больше, чем для эксперимента TZREF, инкременты анализа температуры в эксперименте TZECO также больше, чем в эксперименте TZREF, то есть прогноз успешнее для эксперимента TZREF. Это можно объяснить тем, что изменчивость приземной температуры в дневной срок в сухой сезон выше, и спрогнозировать ее труднее. Это также может быть объяснено ошибками в задании альбедо в ECOCLIMAP.

В целом разница между 24-часовыми прогнозами при задании внешних параметров из двух различных баз данных в поле приземной температуры не превышала $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Чувствительность к параметрам подстилающей поверхности проявляется также в соотношении Боуэна. В сухой сезон соотношение Боуэна для эксперимента TZECO в целом выше, чем для эксперимента TZREF, что соответствует меньшему скрытому потоку тепла и большему явному потоку тепла. Эти значения более реалистичны за счет более физически обоснованного задания *LAI*.

В Заключении сформулированы основные результаты и выводы:

1. Уточнен блок параметризации подстилающей поверхности модели HIRLAM на основе использования полей внешних параметров из набора данных ECOCLIMAP для территории Восточной Африки (Танзания)
2. Разработан программный интерфейс для использования базы данных ECOCLIMAP в прогностической системе HIRLAM, что позволило осуществлять оперативные запуски. Интерфейс включает реализованный метод пересчета долей типов подстилающей поверхности в ячейке сетки при переходе от базы данных HCS к базе данных ECOCLIMAP. Осуществлены модификации программного кода модели HIRLAM с целью включения в нее базы данных о подстилающей поверхности ECOCLIMAP.
3. Осуществлена адаптация прогностической системы HIRLAM для территории восточной Африки (Танзании) для проведения численных экспериментов для оценки чувствительности.
4. Выявлено, что поля параметров подстилающей поверхности для рассматриваемой территории существенно отличаются в базах данных HCS и ECOCLIMAP, годовой ход параметров в базе данных ECOCLIMAP более реалистичен.
5. Оценки успешности прогнозов по полям анализа и по результатам верификации по измерениям на станциях показали, что прогнозы с использованием внешних параметров из базы ECOCLIMAP в целом успешнее, однако остается проблемой прогноз дневных максимумов температуры в сухой сезон.
6. В качестве рекомендаций по усовершенствованию базы данных ECOCLIMAP предложены разработки по уточнению альбеда подстилающей поверхности.

Основные публикации по теме диссертации.

1. Кабелва Х. А., Курзенева Е. В., Ганбат Г. О., Сенькова А. В. Исследование влияния параметров подстилающей поверхности на качество гидродинамического прогноза на примере Восточной Африки. Метеорология и гидрология 2008, № 11“_____”с.
2. Hamza Kabelwa, Laura Rontu, Katherina Kurzeneva. Sensitivity of HIRLAM forecasts to the surface description over Tanzania - first experiences of ECOCLIMAP. HIRLAM NEWSLETTERS. No. 53, March 2008. P.O.Box 201,3730 AE De Bilt, the Metherlands (<http://hirlam.org>)
3. Кабелва Х. А. ECOCLIMAP - База данных для блока подстилающей поверхности ISBA в моделях атмосферы. Ученые записки № 3. Научно-теоретический журнал.– СПб.: изд. РГГМУ. 2006. – с. 211.

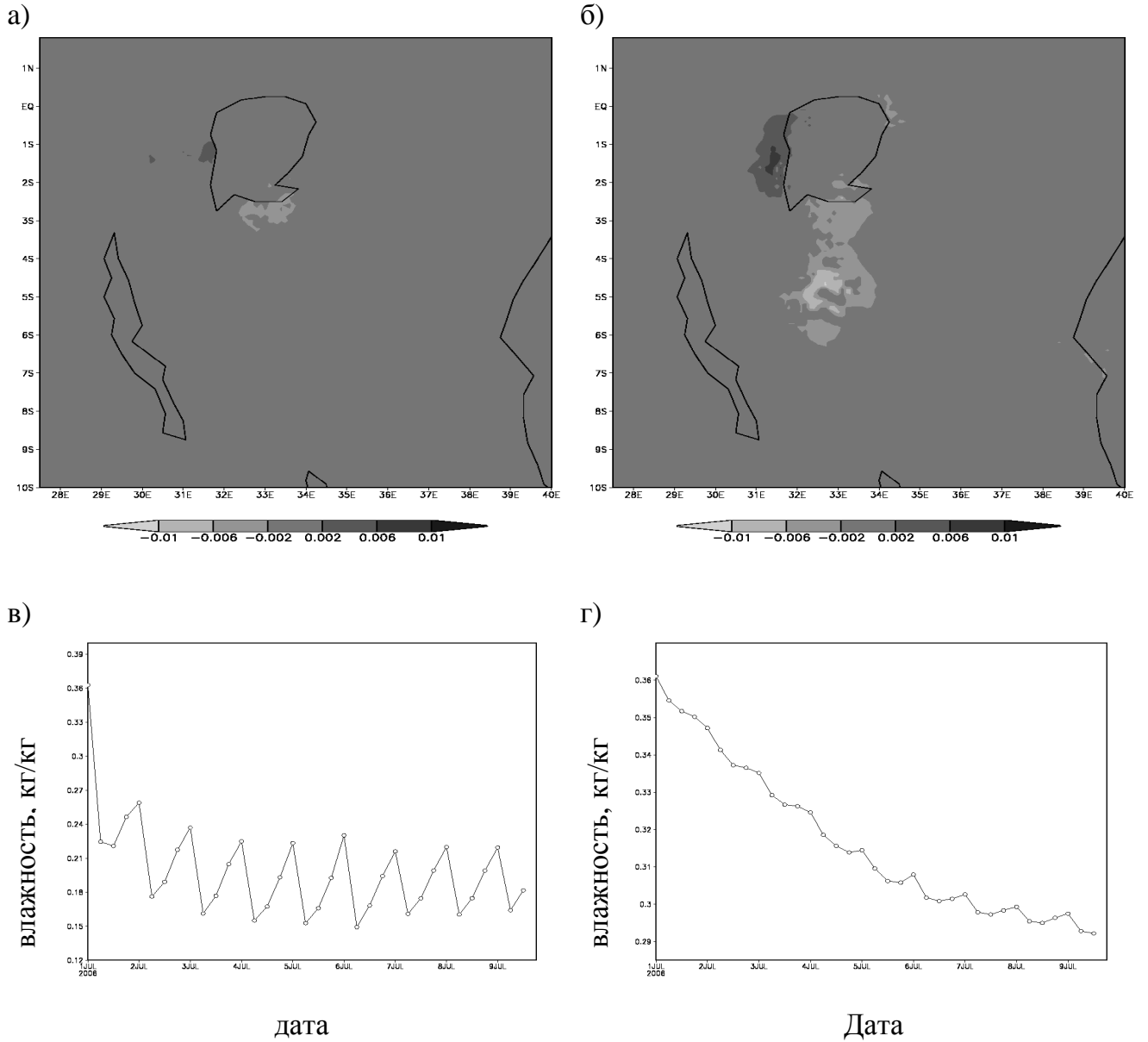


Рисунок 2. К анализу успешности прогноза по инкрементам влажности почвы. Поля инкрементов влажности почвы, кг/кг, за срок 09.04.2006 в 15 часов по местному времени а) в эксперименте TZECO б) в эксперименте TZREF. Временной ход влажности почвы в июле, кг/кг, в точке с максимальными инкрементами в) для эксперимента TZREF г) для эксперимента TZECO.

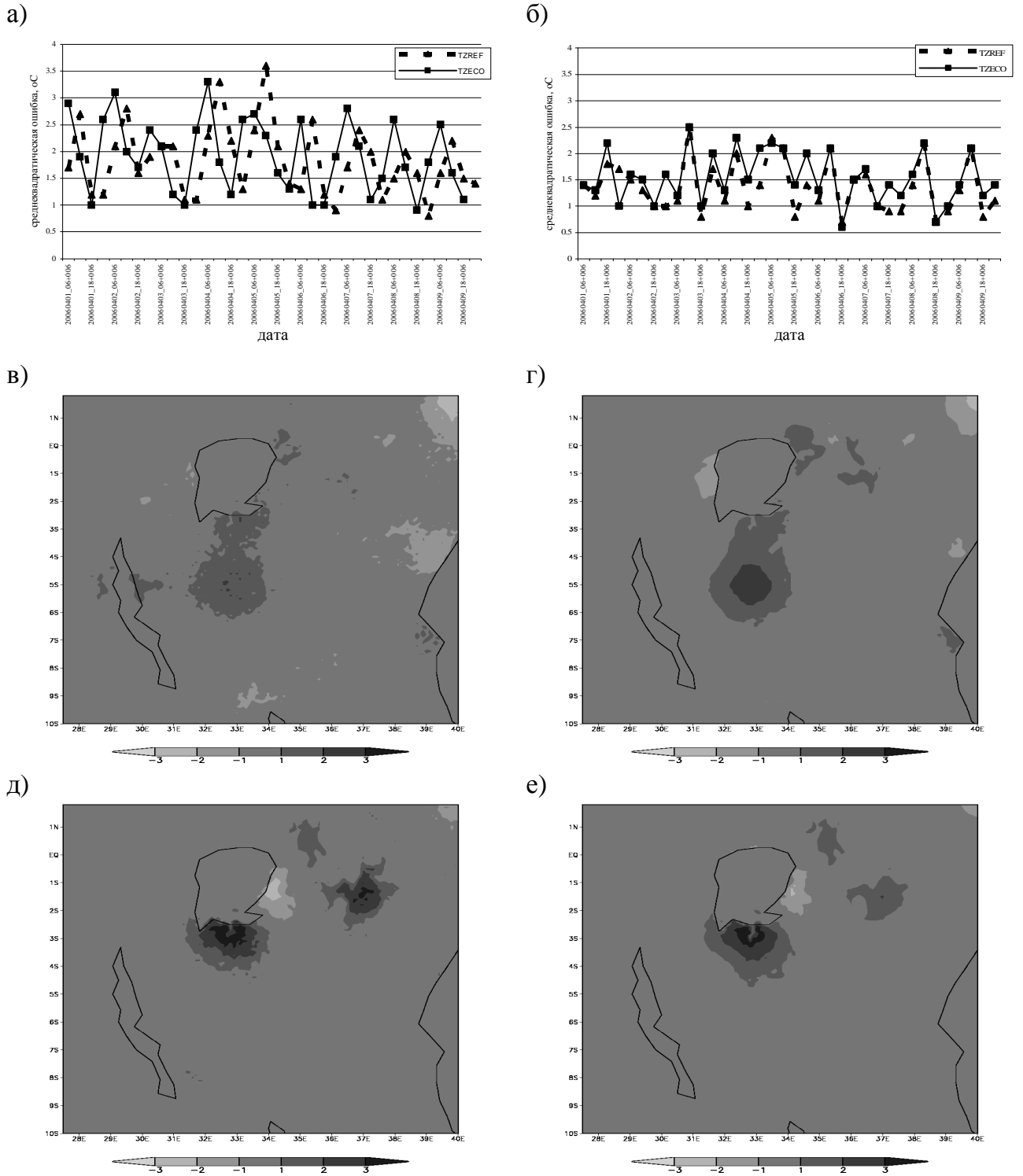


Рисунок 3. К анализу успешности прогноза приземной температуры. Среднеквадратические ошибки прогнозов приземной температуры °C а) для сезона дождей (апрель) б) для сухого сезона (июль). Поля инкрементов анализа приземной температуры, °C, в срок 09.04.2006 в 15 часов по местному времени в) в эксперименте TZECO г) в эксперименте TZREF. Поля инкрементов анализа приземной температуры, °C, в срок 09.07.2006 в 15 часов по местному времени в) в эксперименте TZECO г) в эксперименте TZREF.

АВТОРЕФЕРАТ

Кабелва Хамза Атхумани