

Федеральное государственное бюджетное учреждение
«Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации»

На правах рукописи

Травова Светлана Васильевна

АНАЛИЗ ВЛАЖНОСТИ ПОЧВЫ ДЛЯ ГЛОБАЛЬНОЙ МОДЕЛИ АТМОСФЕРЫ ПЛАВ

25.00.30 – метеорология, климатология, агрометеорология

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2022

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России»), Лаборатории перспективных численных методов в моделях атмосферы Отдела среднесрочных прогнозов погоды.

Научный руководитель:

Толстых Михаил Андреевич,
доктор физико-математических наук,
доцент, Федеральное государственное
бюджетное учреждение науки «Институт
вычислительной математики им.
Г.И.Марчука Российской академии наук»,
ведущий научный сотрудник.

Официальные оппоненты:

Калинин Николай Александрович,
доктор географических наук, профессор,
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Пермский государственный
национальный исследовательский
университет», географический факультет,
заведующий кафедрой метеорологии и
охраны атмосферы.

Курзенева Екатерина Владимировна,
кандидат физико-математических наук,
Финский метеорологический институт,
департамент метеорологических и
океанологических исследований, группа
гидродинамического атмосферного
моделирования, научный сотрудник.

Ведущая организация:

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Российский государственный
гидрометеорологический университет».

Защита диссертации состоится «14» сентября 2022 г. в 14 часов на заседании Диссертационного совета Д 327.003.01 при Федеральном государственном бюджетном учреждении «Гидрометеорологический научно-исследовательский центр Российской Федерации» (ФГБУ «Гидрометцентр России») по адресу: 123376, Россия, г. Москва, Большой Предтеченский переулок, д.11.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБУ «Гидрометцентр России» и на сайте <https://meteoinfo.ru>.

Автореферат разослан « » _____ 2022 г.

Ученый секретарь диссертационного совета, кандидат физико-математических наук.



М.В.Шатунова

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность работы

Влажность почвы является одной из ключевых составляющих влагооборота Земной системы и оказывает большое влияние на окружающую среду и ее климат.

Характеристики влаготермического состояния подстилающей поверхности суши, полученные с помощью численных схем, традиционно рассматриваются как нижнее граничное условие для моделей общей циркуляции атмосферы. В последние десятилетия вклад этих параметризаций в качество прогноза состояния атмосферы вырос, что привлекло большое внимание к проблеме их точности. От достаточно простых схем с тепловым и водным балансами [Deardoff J.W. 1978] они развились до моделей с функциями устьичного контроля эвапотранспирации растительным покровом и многослойным представлением деятельного слоя суши (например, HTESSEL [Balsamo G. et al., 2009] или JULES [Best M.J. et al., 2011]). Во многом такое внимание к развитию моделей именно подстилающей поверхности связано с изменением понятия успешности прогноза. На фоне повышения общей реалистичности численных прогнозов погоды (ЧПП) все большее внимание уделяется показателям их качества в приземном слое, а также на отдаленных интервалах времени. В этом новом понятии успешности ЧПП вклад параметризаций подстилающей поверхности оказался высоким [Ferranti L. et al., 2006; Koster R.D. et al., 2010].

В моделях прогноза погоды почва функционирует как стоковый резервуар для осадков и источник эвапотранспирации. Влажность почвы может оказывать значительное влияние на прогнозы на всех временных интервалах, от краткосрочных и среднесрочных [Drusch M., 2007; Drusch M. et al., 2007b] до сезонных [Koster R. D. et al., 2003]. Например, результаты моделирования показывают, что экстремально низкое содержание влаги в почве на территории Европы весной 2003 г внесло заметный вклад в формирование аномальной жары последующим летом [Fischer E. et al., 2007]. Статистический анализ ансамблевых прогнозов с различными параметризациями подстилающей поверхности подтвердил, что во внетропических широтах в течение лета вклад влажности почвы в качество сезонных прогнозов больше, чем вклад температуры поверхности океана [Conil S. et al., 2007].

Контролируя распределение турбулентных потоков скрытого и явного тепла, влажность почвы оказывает существенное воздействие на состояние приземного слоя, осадки и облачность [Dirmeier P. A. et al., 2009; Miralles D. G. et al., 2018; Santanello J. A. et al., 2018]. Например, исследования отдельных дней с выпадением осадков показали, что количество влаги в почве может влиять на зарождение и интенсивность конвективных осадков [Findell K. et al., 2003; Gallus

W. et al., 2000], морских бризов [Baker R. et al., 2001], засух [Grasso L., 2000; Кислов А. В. и др., 2015; Dirmeyer P. A. et al., 2021].

С целью улучшения представления таких полей в последние десятилетия статистические методы усвоения, разработанные для данных наблюдений за состояниями атмосферы и океана, были адаптированы к анализу влажности почвы.

Процедура подготовки начальных данных влагосодержания почвы внедрена в оперативную практику численного прогноза погоды во всех ведущих метеорологических центрах. Применение с этой целью таких методов, как оптимальная интерполяция [Mahfouf J.-F., 1991], вариационный подход [Hess R., 2001], модификации фильтра Калмана [Draper C.S. et al., 2011; de Rosnay et al., 2012; Duerinckx A. et al., 2017] позволило повысить успешность кратко- и среднесрочного прогнозов прежде всего приземных метеорологических характеристик моделями общей циркуляции атмосферы.

Глобальная модель атмосферы ПЛАВ имеет возможность использовать в качестве параметризации деятельного слоя суши двухслойную модель ISBA-2L [Noilhan J. et al., 1996] или многослойную модель ИВМ РАН - МГУ [Володин Е.М. и др., 1998] в зависимости от целей прогноза. При использовании модели ИВМ РАН - МГУ анализ влажности почвы не производился до начала этой работы, а при использовании модели ISBA-2L анализ подготавливался методом оптимальной интерполяции, в настоящее время устаревшим и не позволяющим включать в усвоение новые виды наблюдений. Разработка и внедрение единого современного подхода к подготовке начальных данных влажности почвы для обеих схем деятельного слоя может привести к повышению точности численных прогнозов модели атмосферы ПЛАВ. Часть программной реализации анализа может применяться в качестве самостоятельного диагностического инструмента для отладки физических параметризаций в модели общей циркуляции атмосферы, а поля анализа могут использоваться независимо от прогностической системы для решения агрометеорологических и гидрологических задач.

Цели и задачи диссертационной работы

Целью диссертационной работы является разработка современной технологии анализа влажности почвы в рамках системы глобальных численных прогнозов погоды на основе модели атмосферы ПЛАВ.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

1. Исследование существующих подходов к анализу влажности почвы для моделей общей циркуляции атмосферы.
2. Реализация метода упрощенного расширенного фильтра Калмана для усвоения приземных наблюдений в анализе влажности почвы модели подстилающей поверхности ISBA-2L.

3. Разработка и реализация методики усвоения приземных наблюдений для анализа влажности почвы многослойной модели ИВМ РАН - МГУ.

4. Проверка реализованных алгоритмов анализа влажности деятельного слоя почвы по данным контактных наземных наблюдений.

5. Оценка влияния применения разработанных алгоритмов анализа влажности почвы на прогнозы приземных характеристик в рамках модели ПЛАВ.

Научная новизна

1. Впервые в Российской Федерации реализован метод упрощенного расширенного фильтра Калмана для усвоения приземных наблюдений в анализе влажности почвы для модели общей циркуляции атмосферы.

2. Впервые разработана и реализована методика усвоения приземных наблюдений для анализа влажности почвы в рамках многослойной модели ИВМ РАН-МГУ методом упрощенного расширенного фильтра Калмана.

3. Исследовано влияние учета анализа влажности почвы на прогноз характеристик приземного слоя атмосферы в рамках глобальной модели ПЛАВ.

Теоретическая и практическая значимости работы

Сформулированы условия реализации метода упрощенного расширенного фильтра Калмана для анализа влажности почвы многослойной модели ИВМ РАН-МГУ в рамках модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ.

Создан программный комплекс анализа влажности почвы для модели подстилающей поверхности ISBA-2L, который будет применен для глобальной модели атмосферы ПЛАВ высокого разрешения.

Создан программный комплекс анализа влажности почвы для многослойной модели почвы ИВМ РАН-МГУ (свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ №2019662110 от 17.09.2019г).

Применение созданных программных комплексов позволяет повысить точность численных прогнозов приземных метеорологических характеристик.

Результаты работы были использованы при выполнении темы плана НИТР Росгидромета №1.1.2.1, посвященной развитию глобальной модели ПЛАВ, а также грантов РФФИ № 14-37-00053 и № 14-37-00053-П «Комплексный прогноз гидрометеорологических процессов в Арктике», №21-17-00254 «Долгосрочный прогноз аномальных погодных явлений на территории Северной Евразии».

Методология и методы исследования

В качестве основного инструмента применяется метод математического моделирования, результаты которого сравниваются с метеорологическими наблюдениями. Применяются модель

общей циркуляции атмосферы, модели деятельного слоя суши. Для решения сформулированных в диссертационной работе задач использованы методы линейной алгебры, интерполяции, оптимизации и статистической обработки данных. Использованы архивы наблюдений на синоптических станциях и станциях, измеряющих влажность и температуру почвы.

Положения, выносимые на защиту

1. Новая методика адаптации и калибровки метода упрощенного расширенного фильтра Калмана для анализа влажности почвы.
2. Автономная модель подстилающей поверхности для расчета оператора наблюдений в методе упрощенного расширенного фильтра Калмана.
3. Результаты исследования влияния учета анализа влажности почвы на точность глобальных численных прогнозов погоды.

Степень достоверности результатов

Достоверность и обоснованность полученных результатов и сделанных выводов подтверждается их сравнением с независимыми данными контактных наблюдений и исследованиями других авторов, а также публикациями в рецензируемых периодических изданиях, обсуждением на различных международных конференциях и семинарах.

Апробация результатов

Основные результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на следующих научных конференциях и семинарах: Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2016 (Россия, Томск, 2016); Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2017 (Россия, Таруса, Звенигород, 2017); 4th Satellite Soil Moisture Validation and Application Workshop (Austria, Vienna, 2017); Международная конференция и школа молодых ученых по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS-2018 (Россия, Томск, 2018); Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2019 (Россия, Москва, 2019); Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES-2021 (Россия, Москва, 2021); Joint WCRP-WWRP Symposium on data assimilation and reanalysis in collaboration with the ECMWF Annual Seminar 2021 (Germany, Bonn, virtual, 2021); Международная конференция «Марчуковские научные чтения 2021» (Россия, Новосибирск, Академгородок, виртуально, 2021; лауреат конкурса молодых ученых); 4th International Earth Surface Working Group (Finland, Helsinki, remote meeting, 2022); The International Ensemble Kalman Filter Workshop 2022 (Norway, Balestrand, remote meeting, 2022).

Также результаты докладывались на научных семинарах ФГБУ «Гидрометцентр России».

Публикации

По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в рецензируемых научных изданиях, рекомендованных в действующем перечне Высшей аттестационной комиссии (ВАК), 8 публикаций в материалах международных конференций, 1 публикация в разделе монографии, получено 1 свидетельство Роспатента о государственной регистрации программы для ЭВМ.

Личный вклад автора

1. Исследование существующих способов усвоения данных в целях анализа влажности почвы для моделей общей циркуляции атмосферы.
2. Реализация метода и разработка методики анализа влажности почвы для моделей подстилающей поверхности.
3. Проверка полученного анализа влажности почвы по данным контактных наземных наблюдений.
4. Оценка влияния разработанных анализов влажности на результат прогнозов приземных характеристик на примере глобальной модели атмосферы ПЛАН.

Структура и объем диссертации

Диссертация состоит из введения, 5 глав, заключения, списка сокращений, списка терминов, списка используемых источников и литературы из 248 наименований. Общий объем диссертации составляет 161 страницу. Диссертация содержит 33 рисунка и 16 таблиц.

КРАТКОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность диссертационной работы, сформулированы цели и задачи, аргументирована новизна исследований, показаны практическая и научная значимости работы, представлены выносимые на защиту научные положения.

В **Главе 1** кратко описаны наземные и спутниковые наблюдения влажности почвы. Оба этих вида имеют свои достоинства и недостатки. Первые не имеют глобального покрытия, производятся нерегулярно, их данных нет в международной системе обмена метеорологическими наблюдениями. Как следствие, они, как правило, не усваиваются для анализа влажности почвы в глобальном масштабе. Спутниковые наблюдения, имея необходимый охват, могут оценить влажность почвы только в поверхностном слое (до глубины примерно 5 см) и имеют целый ряд ограничений при производстве измерений. Влажность почвы в корнеобитаемых слоях почвы гораздо сильнее и дольше, чем влагосодержание поверхностного слоя, влияет на состояние атмосферы, в первую очередь приземного слоя, и качество его прогноза

[Draper C.S. et al., 2011; Santanello J. A. et al., 2018]. В основном, это происходит за счет контроля процесса транспирации растений. Такая связь влажности почвы и приземного слоя позволяет усваивать наблюдения приземной температуры и относительной влажности воздуха для анализа влажности почвы в ее глубоких слоях, а спутниковую информации использовать для анализа поверхностного слоя. Применение косвенных наблюдений осложняется тем, что, как правило, они нелинейно связаны с влагосодержанием и температурой почвы (в основном с помощью упрощенных уравнений схем подстилающей поверхности).

В разделе 1.1 описаны наземные наблюдения влажности почвы. Их виды, а также базы данных таких измерений, используемые для калибровки как спутниковых наблюдений, так и моделей подстилающей поверхности суши. Во второй части раздела представлены принципы спутниковых измерений влагосодержания почвы и краткий обзор искусственных спутников Земли, данные о влагосодержании почвы которых усваиваются для моделей общей циркуляции атмосферы. В Российской Федерации ассимиляция такой информации в целях анализа начальных данных для моделей прогноза погоды планируется в будущем.

Различные виды наблюдений требуют различных подходов к их обработке и представлению на широтно-долготной сетке.

В разделе 1.2 представлен обзор методов усвоения данных спутниковых наблюдений, измерений приземной температуры и полученной из температуры точки росы относительной влажности воздуха, которые используются в ведущих мировых центрах численных прогнозов погоды для задания начальных данных влажности почвы. В силу ограничений вычислительных ресурсов и особенностей усваиваемых наблюдений наибольшее распространение в оперативной практике получили три метода ассимиляции такой информации: оптимальная интерполяция (ОИ), упрощенный расширенный фильтр Калмана (simplified extended Kalman Filter, SEKF) и ансамблевый фильтр Калмана (ensemble Kalman Filter, EnKF). ОИ довольно прост в применении, однако требует перекалибровки при изменениях параметризаций подстилающей поверхности или включении спутниковых наблюдений, а также не учитывает нелинейные связи между влажностью почвы и приземными переменными. EnKF не обладает недостатками ОИ, но является вычислительно затратным, так как требует генерации ансамбля из 20-30 членов для каждого слоя анализа. SEKF, в отличие от ОИ, позволяет комбинировать спутниковые и наземные наблюдения, имеет динамические, а не статические, весовые коэффициенты в каждом узле анализа модельной сетки, обновляющиеся на каждом цикле усвоения. Несмотря на необходимость дополнительных расчетов для оценки оператора наблюдений, SEKF менее вычислительно затратный, чем EnKF. Это достигается за счет использования одной линейной модели при оценке поля анализа влажности почвы вместо линейной комбинации участников ансамбля.

В данной работе рассмотрена реализация упрощенного расширенного фильтра Калмана для усвоения наблюдений приземной температуры и относительной влажности воздуха. Ассимиляция будет производиться в целях создания и улучшения анализа влажности почвы корнеобитаемых слоев для схем деятельного слоя суши, используемых в глобальной модели атмосферы ПЛАВ.

В **Главе 2** описаны параметризация подстилающей поверхности суши ISBA-2L, в которой почва представлена двумя слоями, и многослойная модель деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ. Обе применяются в модели общей циркуляции атмосферы ПЛАВ для задания нижних граничных условий в зависимости от целей прогноза.

В **разделе 2.1** кратко рассказано о глобальной модели атмосферы ПЛАВ: версиях, которые используются в данной работе, ее структуре, использующихся в ней параметризациях физических процессов подсеточного масштаба.

В **разделе 2.2** представлены основные уравнения параметризации подстилающей поверхности суши ISBA-2L. Она описывает процессы как внутри почвы, состоящей из двух слоев, с использованием подхода «force-restore» (цель которого – воспроизвести суточный ход температуры почвы, предписывая ей соответствующие периодические изменения), так и на ее поверхности, применяя формулы турбулентной диффузии для описания потоков тепла и влаги. Главное преимущество данной схемы заключается том, что она, используя минимальный набор параметров, сохраняет способность адекватно представлять особенности обменов теплом и влагой между нижним слоем атмосферы, растительностью и почвой.

В **разделе 2.3** описаны основные уравнения параметризации многослойной модели деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ. Эта модель имеет более подробную дискретизацию по вертикали, чем ISBA-2L, что позволяет воспроизводить фронт таяния /промерзания. Близость его к поверхности в переходные периоды года может увеличивать или уменьшать температуру нижней части приземного слоя атмосферы на несколько градусов [Палагин Э.Г., 1981], что необходимо учитывать при кратко- и среднесрочных прогнозах. В случае долгосрочных прогнозов важной характеристикой модели почвы ИВМ РАН-МГУ становится отсутствие фиктивных стоков и притоков. В то время, как в схеме ISBA-2L состояние глубокого слоя релаксирует к климатическим значениям температуры и влажности почвы.

Обе модели почвы для точного прогноза требуют задания начального состояния путем усвоения данных наблюдений. С этой целью в следующей главе рассмотрена постановка метода упрощенного расширенного фильтра Калмана, который позволяет ассимилировать данные, как для одного слоя модели почвы, так и для нескольких одновременно.

В **Главе 3** представлена разработанная автором методика адаптации и калибровки метода упрощенного расширенного фильтра Калмана в целях усвоения приземных наблюдений для

анализа влажности почвы в рамках модели ПЛАВ. Приводятся основные уравнения и предположения метода. Во второй части главы описаны алгоритмы ее реализации на примере двухслойной модели ISBA-2L и многослойной модели почвы ИВМ РАН-МГУ.

В разделе 3.1 кратко описана постановка задачи усвоения наблюдений на примере расширенного фильтра Калмана, подвидом которого является метод упрощенного расширенного фильтра Калмана, в общем виде, с введением основных терминов, используемых далее.

В разделе 3.2 представлены основные уравнения метода упрощенного расширенного фильтра Калмана для усвоения приземных метеорологических переменных в целях анализа влажности почвы, а также алгоритм оценки среднеквадратического отклонения ошибки первого приближения.

Задача является локально одномерной, то есть усвоение приземных наблюдений происходит в каждом узле модели независимо от соседних по горизонтали. При этом при наличии несколько узлов по вертикали в почве (как в модели ИВМ РАН-МГУ), считается, что ошибки первого приближения влагосодержания в них связаны в силу физических представлений в модели почвы [Parrens M. et al., 2014].

Прогностический вектор $\mathbf{x}_{t_2}^b$ и вектор анализа $\mathbf{x}_{t_1}^a$ влажности почвы вычисляются согласно уравнениям (1) - (3) для произвольного количества уровней. Анализ проводится для k выбранных уровней $\{n_1, \dots, n_k\}$, где $k \leq N$, $1 \leq n_1 < \dots < n_k \leq N$, N – общее количество уровней.

$$\mathbf{x}_{t_2}^b = M_{t_1 \rightarrow t_2}[\mathbf{x}_{t_1}^a], \quad (1)$$

$$\mathbf{x}_{t_1}^a = \mathbf{x}_{t_1}^b + \mathbf{K}_{t_1}[\mathbf{y}_{t_1} - H_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b)], \quad (2)$$

$$\mathbf{K}_{t_1} = \mathbf{B}\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}^T (\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1} \mathbf{B}\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}^T + \mathbf{R})^{-1}, \quad (3)$$

где $M_{t_1 \rightarrow t_2}$ - нелинейный оператор прогностической модели почвы;

$\mathbf{x}_{t_1}^a$ – вектор, элементами которого являются анализы влажности почвы k выбранных уровней $[w_{n_1}^a, \dots, w_{n_k}^a]$ в момент времени $t_1 = t_0 + 6$ ч;

$\mathbf{x}_{t_1}^b$ – вектор, элементами которого являются первые приближения величины влажности почвы k выбранных уровней $[w_{n_1}^b, \dots, w_{n_k}^b]$ в момент времени t_1 ;

\mathbf{K}_{t_1} - весовая матрица в момент времени t_1 ;

\mathbf{y}_{t_1} - вектор, элементами которого являются приземные наблюдения $[T_{2m}, RH_{2m}]$ в момент времени t_1 (размерности m , где m – количество усваиваемых переменных);

$H_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b)$ – нелинейный оператор наблюдений, транслирующий влажность почвы рассматриваемого уровня в приземные характеристики;

\mathbf{R} – ковариационная матрица ошибок наблюдений $[m \times m]$;

\mathbf{B} – ковариационная матрица ошибок полей первого приближения $[k \times k]$;

$\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}$ - линеаризованный оператор наблюдений [$m \times k$].

Матрица \mathbf{R} считается постоянной во времени и диагональной. Она имеет следующий вид:

$$\mathbf{R} = \begin{pmatrix} \sigma_{T_{2M}}^2 & 0 \\ 0 & \sigma_{RH_{2M}}^2 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

где $\sigma_{T_{2M}}^2$ - дисперсия ошибки наблюдений приземной температуры, К;

$\sigma_{RH_{2M}}^2$ - дисперсия ошибки наблюдений приземной относительной влажности, %.

В расширенном фильтре Калмана (extended Kalman Filter, EKF) матрица \mathbf{B} рассчитывается и обновляется на каждом цикле усвоения. Однако ее сохранение требует дополнительных ресурсов, которые увеличиваются с ростом разрешения модели. Также для реализации метода EKF необходимо наличие статистической информации об ошибках модели, что сильно усложняет его настройку. В работах [Draper C. et al., 2009; Sabater-Munoz J. et al., 2018] было продемонстрировано, что в случае анализа влажности почвы обновление матрицы \mathbf{B} не существенно влияет на его точность по сравнению с вкладом других факторов. Во многом это связано с тем, что в SEKF линеаризация оператора наблюдений \mathbf{H} включает в себя интегрирование модели, за счет чего неявно учитываются изменения полей первого приближения. Поэтому в нашем случае, как и в работах [de Rosnay et al., 2012; Gómez B. et al., 2020; Mahfouf J.-F., 2009], принято предположение о статической ковариационной матрице ошибок первого приближения.

В модели ISBA-2L рассматривается только один слой анализа, поэтому матрица \mathbf{B} имеет размерность [1 x 1] и выглядит как:

$$\mathbf{B} = \left(\sigma_{w_p^b}^2 \right) \quad (5)$$

где $\sigma_{w_p^b}^2$ - дисперсия ошибки поля первого приближения влажности почвы нижнего слоя модели, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

В качестве полей первого приближения выступают модельные прогнозы с заблаговременностью 6 ч.

В модели ИВМ РАН-МГУ рассматриваются только два уровня для анализа, в силу вычислительной дороговизны метода. При этом они считаются зависимыми, так как влажность на соседних уровнях почвы связана через потоки диффузии, гравитационного дренажа и транспирации. Тогда матрица \mathbf{B} принимает следующий вид:

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \sigma_{w_n^b}^2 & \sigma_{w_n^b} \sigma_{w_{n+1}^b} \\ \sigma_{w_{n+1}^b} \sigma_{w_n^b} & \sigma_{w_{n+1}^b}^2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

где $\sigma_{w_n^b}$ – среднеквадратическое отклонение ошибки 6-ти часового прогноза влажности почвы на n -ом уровне анализа, где $n \in [1, 8]$;

$\sigma_{w_{n+1}^b}$ - среднеквадратическое отклонение ошибки б-ти часового прогноза влажности почвы в $n+1$ -ом уровне анализа.

В общем случае оператор $H_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b)$, переносящий значения вектора состояния в пространство наблюдений, является нелинейным. Используя гипотезу о линейности, можно выразить $H_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b)$ с помощью разложения в ряд Тэйлора первого порядка (7) [Hess R., 2001]:

$$H_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b + \delta \mathbf{x}_{t_0}) \cong H_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b) + \mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b) \delta \mathbf{x}_{t_0}, \quad (7)$$

где $H_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b + \delta \mathbf{x}_{t_0})$ – вектор значений приземных переменных в момент времени t_1 , проинтегрированных на интервале времени $[t_0, t_1]$ с возмущенных полей анализа влажности почвы в момент времени t_0 ;

$H_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b)$ – вектор значений приземных переменных в момент времени t_1 , проинтегрированных на интервале времени $[t_0, t_1]$ с невозмущенных полей анализа влажности почвы в момент времени t_0 ;

$\delta \mathbf{x}_{t_0}$ – вектор величин возмущений значений анализа влажности почвы в момент времени t_0 ;

$\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b)$ – матрица Якоби, описывающая главную линейную часть (линеаризация) оператора наблюдений $H_{0 \rightarrow 1, t_1}$, и представляющая собой производную векторной функции $H_{0 \rightarrow 1, t_1}$ от векторного аргумента $\mathbf{x}_{t_0}^b$.

В случае модели ISBA-2L матрица Якоби $\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b)$ имеет следующий вид (8):

$$\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b) = \begin{pmatrix} \frac{\partial T_{2M}^{t_1}}{\partial w_{p, t_0}} \\ \frac{\partial RH_{2M}^{t_1}}{\partial w_{p, t_0}} \end{pmatrix}, \quad (8)$$

а для модели ИВМ РАН-МГУ:

$$\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}(\mathbf{x}_{t_0}^b) = \begin{pmatrix} \frac{\partial T_{2M}^{t_1}}{\partial w_{n, t_0}} & \frac{\partial T_{2M}^{t_1}}{\partial w_{n+1, t_0}} \\ \frac{\partial RH_{2M}^{t_1}}{\partial w_{n, t_0}} & \frac{\partial RH_{2M}^{t_1}}{\partial w_{n+1, t_0}} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Использование $\mathbf{H}_{0 \rightarrow 1, t_1}$ позволяет создавать весовые динамические коэффициенты в уравнении (2), которые зависят от условий в каждом узле сетки, и приводит к относительно простой интеграции дополнительных типов наблюдений в SEKF (например, включению в анализ спутниковых наблюдений).

В разделе 3.3 представлена предложенная автором методика задания начальных данных влажности почвы методом упрощенного расширенного фильтра Калмана, которая может применяться для широкого класса параметризаций почвы в моделях общей циркуляции атмосферы.

Она состоит из:

1. Определения уровней (слоев) модели почвы, усвоение наблюдений для которых будет наиболее эффективно в смысле влияния на прогноз состояния атмосферы. Оно производится исходя из представления физических процессов в модели деятельного слоя суши на основе результатов методических численных экспериментов. В ходе последних оцениваются величины компонент оператора наблюдений в анализе.

2. Выбора величины возмущения влажности почвы, при которой выполнялось бы предположение о линейности оператора наблюдений наиболее точно. Он производится по результатам методических экспериментов, предшествующих циклическому анализу. В них влажность почвы на выбранных уровнях возмущается различными по величине значениями, после чего рассчитываются компоненты оператора наблюдений. Оценка доли нелинейной части для каждой компоненты в каждом из экспериментов показывает, какой интервал возмущений является наиболее подходящим для процедуры линеаризации.

3. Оценке ошибки полей первого приближения по данным доступных контактных наземных наблюдений и на основе результатов методических численных экспериментов.

4. Разработке автономной модели подстилающей поверхности для расчета оператора наблюдений в анализе, в случае высоких вычислительных затрат использования совместной модели. Такая автономная модель должна уметь прогнозировать состояние подстилающей поверхности без ее включения в состав модели общей циркуляции атмосферы.

Далее предлагаются алгоритмы реализации этой методики применительно к моделям почвы ISBA-2L и ИВМ РАН – МГУ. Для модели ISBA-2L в качестве анализируемого выбран один, нижний слой почвы, вследствие его независимости. Для модели ИВМ РАН-МГУ количество уровней анализа определено равным двум в целях уменьшения вычислительной стоимости алгоритма. Для конкретизации этих уровней согласно п.1 методики проведено исследование, представленное в Главе 5.

В **Главе 4** описаны серии численных экспериментов, проведенные автором и показывающие результаты адаптации и калибровки метода упрощенного расширенного фильтра Калмана для анализа глубокого слоя почвы модели подстилающей поверхности ISBA-2L [Noilhan J. et al., 1989] в рамках глобальной модели атмосферы ПЛАВ2008 [Толстых М.А. и др., 2015].

В **разделе 4.1** согласно методике, предложенной в Главе 3, были исследованы оператор приземных наблюдений и оператор модели. Для первого был найден интервал возмущений влажности почвы, при котором предположение о линеаризации оператора наблюдений выполняется с наибольшей точностью.

В **разделе 4.2** была оценена дисперсия ошибок полей первого приближения влажности почвы по результатам их сравнения с данными наземных наблюдений и результатам серии

численных прогнозов приземных метеорологических характеристик, которые использовали в качестве начальных данных поля анализа влажности почвы, полученные с различными предписанными величинами среднеквадратических отклонений ошибок полей первого приближения.

В разделе 4.3 с использованием величины возмущения влажности почвы и дисперсии ошибок полей первого приближения, определенных в предыдущих разделах главы, по адаптированному алгоритму, предложенному в Главе 3, получен анализ влажности почвы для глубокого слоя модели ISBA-2L для летнего сезона 2014 г. и зимнего сезона 2015г. Показано влияние использования анализа влажности почвы на прогнозы приземной температуры и относительной влажности воздуха модели ПЛАВ2008 с заблаговременностями до 72 часов в различных регионах Земного шара.

На рисунке 1 представлен среднемесячный инкремент влажности почвы для нижнего слоя модели ISBA-2L с регионами оценок прогнозов. Сравнение с данными стационарных наземных наблюдений показали, что использование упрощенного расширенного фильтра Калмана (эксперимент «0.1») повышает точность прогнозов приземной температуры и относительной влажности воздуха для заблаговременностей от 24 до 72 ч по сравнению с прогнозами этой же модели, использовавшей в качестве начальных данных анализ влажности почвы, подготовленный методом оптимальной интерполяции (эксперимент «ОИ»). Эффект от приме-

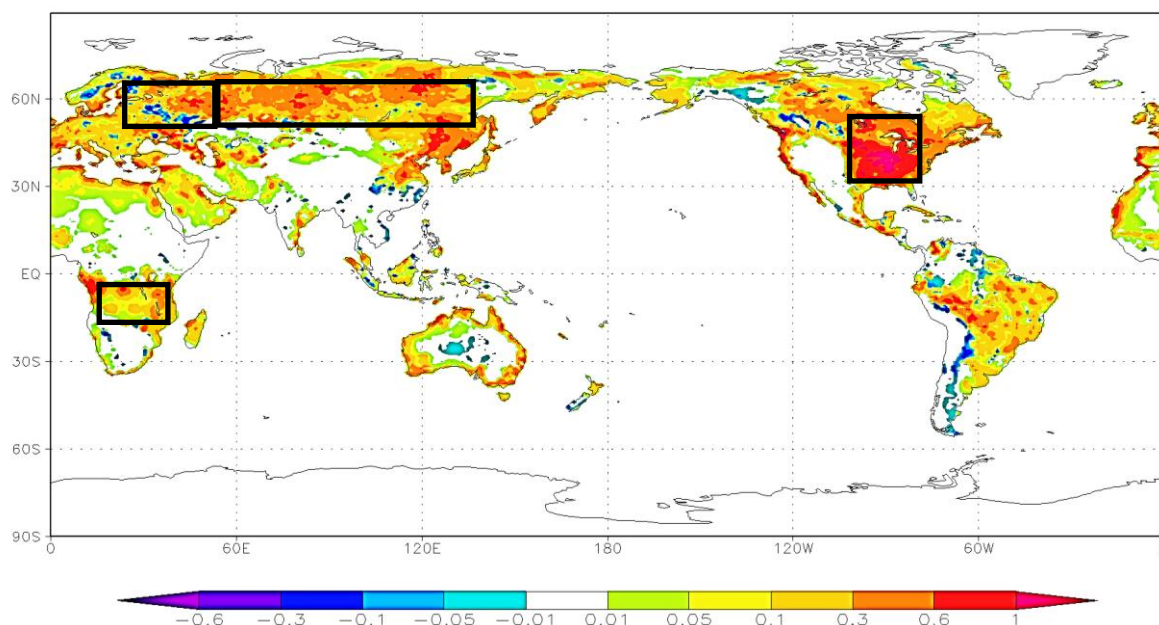


Рисунок 1. - Среднемесячный инкремент влажности (мм) для нижнего слоя почвы модели ISBA-2L за июль 2014 г в анализе на основе метода упрощенного расширенного фильтра Калмана. Черными прямоугольниками отмечены регионы оценки прогнозов.

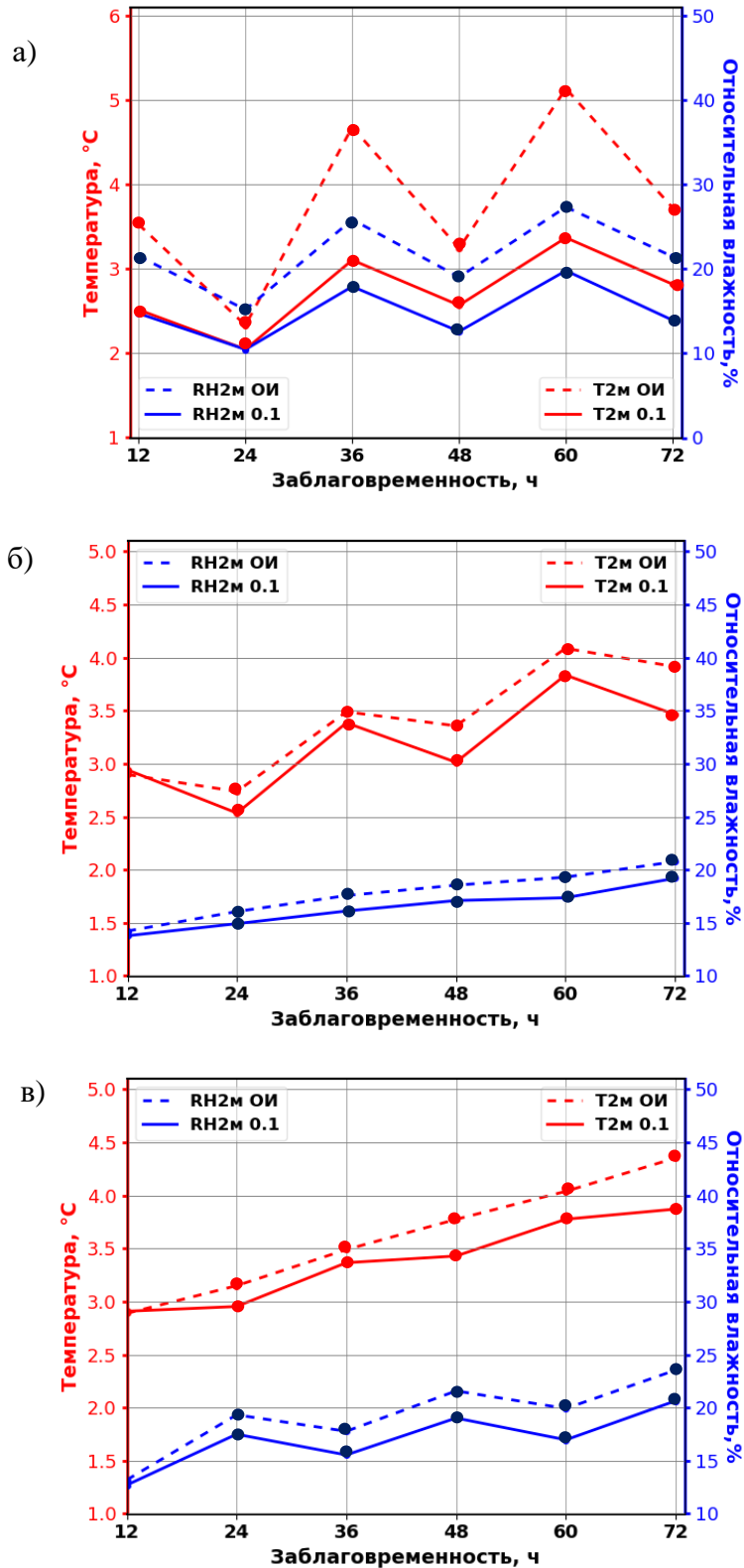


Рисунок 2. – Среднеквадратические ошибки прогнозов приземной температуры и относительной влажности воздуха модели ПЛАВ2008 за июль-август 2014г. для территории востока Северной Америки (а), ЕТР (б) и Азии (в) при использовании параметризации ISBA-2L. Точками обозначены пары, разница между значениями в которых значима на уровне 95% по парному критерию Стьюдента. Расшифровка экспериментов указана в тексте.

ния адаптированного автором метода увеличивается при росте заблаговременности прогноза. Этот результат получен для территорий Северного полушария в летний сезон и Южного в зимний. На рисунке 2 показаны среднеквадратические ошибки прогноза приземной температуры и относительной влажности за июль-август 2014 г. для территории востока Северной Америки (а), европейской территории России (ЕТР) (б) и Азии (в).

В главе 5 описаны серии численных экспериментов, проведенные автором и показывающие результаты применения метода упрощенного расширенного фильтра Калмана для анализа корнеобитаемых слоев многослойной модели почвы ИВМ РАН-МГУ в рамках глобальной модели атмосферы ПЛАВ2018.

В разделе 5.1 проведено сравнение элементов операторов наблюдений для большинства уровней модели многослойной почвы, полученных с использованием автономной и совместной моделей подстилающей поверхности. По результатам проведенных экспериментов уровни 6, 18 и 54 см определены как наиболее перспективные для анализа влажности почвы.

Для каждого из них в обеих моделях поверхности была исследована линеаризация оператора наблюдений и получены интервалы возмущений влажности, при которых она может выполняться наиболее точно. Показано, что при использовании автономной модели точность выполнения этой гипотезы повышается.

В разделе 5.2 были оценены среднеквадратические отклонения первого приближения влажности почвы для выбранных уровней многослойной модели (6, 18 и 54 см) по данным наземных наблюдений. На основании полученных результатов сформулирована постановка численных экспериментов для подбора данной величины в рамках моделей ИВМ РАН-МГУ и ПЛАВ2018.

В разделе 5.3 представлено сравнение оценок двух серий численных прогнозов погоды с использованием анализов влажности почвы, в которых для вычисления оператора наблюдений использовались автономная и совместная модели. Результаты этого эксперимента показали, что оценки в обеих сериях отличаются незначительно. В случае анализа с автономной моделью в регионах Азии, ЕТР, Северной Америки точность прогноза статистически значимо повышается. На основании этого сделан вывод о применимости автономной модели для расчета оператора наблюдений в последующих экспериментах.

В разделе 5.4 представлены оценки методических прогнозов приземных метеорологических характеристик, использовавших в качестве начальных данных анализы влажности, полученные в различных постановках. Показано, что анализ для уровней 6 и 18 см при прочих равных влияет на точность прогноза меньше, чем для уровней 18 и 54 см. Продемонстрировано, что усвоение информации об относительной влажности воздуха вносит существенный вклад в качество анализа влажности почвы.

В разделе 5.5 показаны оценки прогнозов приземных метеорологических характеристик, использовавших в качестве начальных данных анализ влажности почвы для уровней 18 и 54 см, подготовленный методом упрощенного расширенного фильтра Калмана (эксперимент «18-54_02»), и поля первого приближения, для которых анализ был отключен (эксперимент «OL») (рисунки 3 и 4).

Оценки прогнозов приземной температуры и относительной влажности воздуха модели ПЛАВ2018 по данным стационарных наземных наблюдений, в которых в качестве начальных дан-

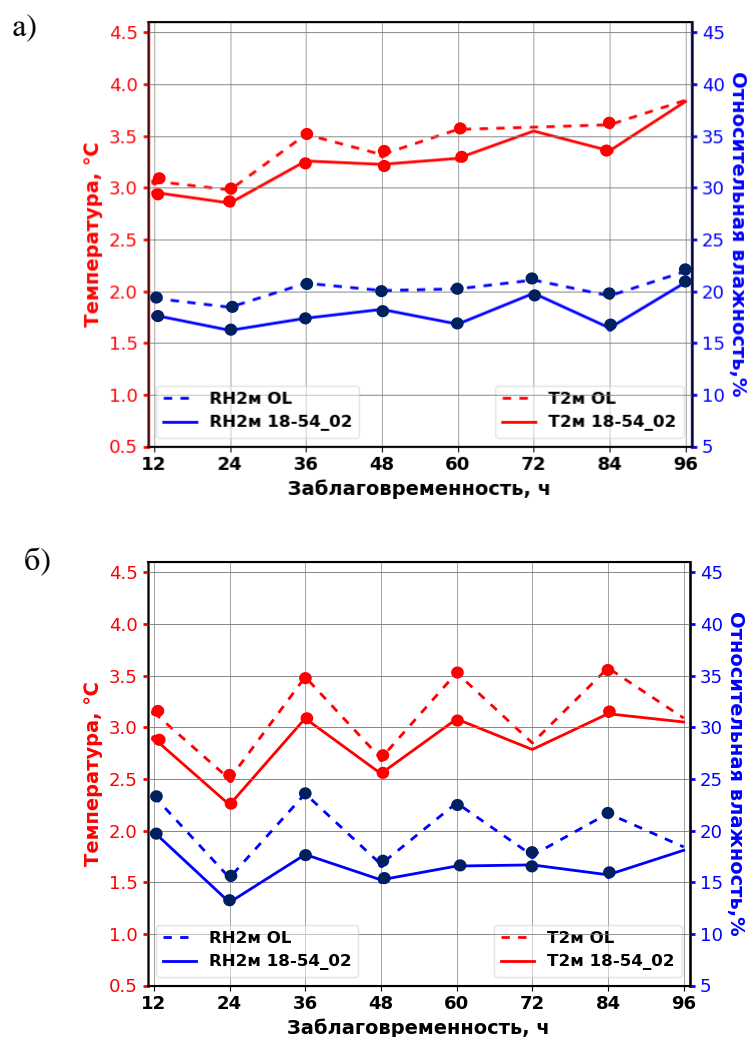


Рисунок 3. – Среднеквадратические ошибки прогнозов приземной температуры и относительной влажности воздуха за июль-август 2015г. для территории Азии (а) и ЕТР (б). Точками обозначены пары, разница между значениями которых значима на уровне 95% по парному критерию Стьюдента. В эксперименте «18-54_02» в качестве начальных данных использовался анализ влажности почвы для уровней 18 и 54 см, подготовленный методом упрощенного расширенного фильтра Калмана; в эксперименте «OL» анализ был отключен.

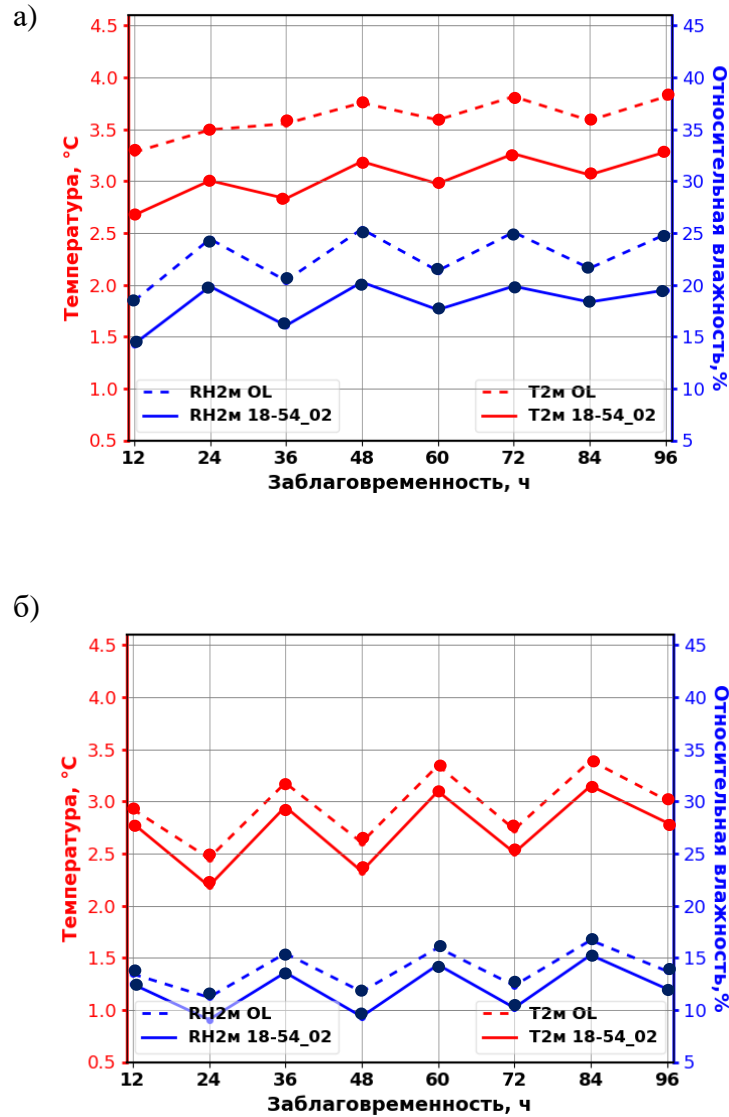


Рисунок 4. – Среднеквадратические ошибки прогнозов приземной температуры и относительной влажности воздуха за июль-август 2015 г. для территории востока Северной Америки (а) и юга Африки (б). Точками обозначены пары, разница между значениями которых значима на уровне 95% по парному критерию Стьюдента. Расшифровка экспериментов указана в тексте.

ных использовался анализ влажности почвы на уровнях 18 и 54 см, показали повышение их успешности относительно таких же прогнозов, в которых анализ был отключен (рисунки 3 и 4).

Данный вывод получен по результатам оценок двух пар летних месяцев за 2014 и 2015 года. При этом, начальные данные за 2015 г являются результатом непрерывного ежедневного четырехразового циклического усвоения, стартовавшего 01.06.2014 г. Оценки за июль-август 2015 г для регионов ЕТР и Азии представлены на рисунке 3, Северной Америки и юга Африки - на рисунке 4. Географическое расположение регионов показано на рисунке 1. Кроме этого,

проводилась оценка прогнозов приземных метеорологических переменных для восточной части Австралии, где их точность повышается при применении начальных данных с анализом влажности почвы, хотя не так значительно, как в других регионах.

В заключении изложены наиболее важные результаты работы.

В ходе работы были получены следующие основные результаты:

1. Разработана новая методика адаптации и калибровки метода упрощенного расширенного фильтра Калмана для анализа влажности почвы.

В рамках этой методики проведены исследования оператора наблюдений, ошибок первого приближения как для двухслойной параметризации подстилающей поверхности ISBA-2L, так и для многослойной модели почвы ИВМ РАН-МГУ. В ходе циклического усвоения впервые получены поля анализа влажности для модели почвы ИВМ РАН-МГУ в рамках глобальной модели атмосферы ПЛАВ.

2. Разработана автономная модель подстилающей поверхности для расчета оператора наблюдений в алгоритме метода упрощенного расширенного фильтра Калмана. Она позволяет сократить время расчета анализа примерно в полтора раза, точнее вычислять оператор наблюдений, а также имеет самостоятельное применение в качестве инструмента диагностики ошибок модели атмосферы.

3. Результаты численных прогнозов погоды с заблаговременностями до 96 часов показали, что точность прогнозов приземной температуры и относительной влажности воздуха при использовании начальных данных, в которых значения влажности почвы задавались по данным анализа, выше, чем при применении метода оптимальной интерполяции или отключении анализа. Величина уменьшения ошибок колеблется в зависимости от региона, сезона года и заблаговременности прогноза. В регионах Северного полушария (востока Северной Америки, ЕТР, Азиатской части России) среднеквадратическая ошибка прогноза приземной температуры уменьшилась на величину от 0.1 до 0.85°C, а прогноза относительной влажности воздуха на величину от 1 до 6%.

Статьи в научных журналах из перечня ВАК по теме диссертации:

1. **Махнорылова С.В.** Усвоение косвенных данных о влагосодержании почвы методом упрощенного расширенного фильтра Калмана в модели среднесрочного прогноза погоды ПЛАВ / Махнорылова С.В., Толстых М.А. // Метеорология и гидрология. – 2017. – № 6. – С. 55 – 67.

2. Толстых М.А. Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды / Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Гойман Г.С., Зарипов Р.Б., Киктев Д.Б., **Махнорылова С.В.**, Мизяк В.Г., Рогутов В.С. // Метеорология и гидрология. – 2018. – № 11. – С. 90 – 99.

3. Толстых М.А. Развитие глобальной полулагранжевой модели атмосферы ПЛАВ в 2009 – 2019 гг. / Толстых М.А., Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., **Травова (Махнорылова) С.В.**, Гойман Г.С., Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Шляева А.В., Юрова А.Ю. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. - 2019. - № 4 (374). - С. 77-91.

4. **Травова С.В.** Качество воспроизведения состояния почвы моделью деятельного слоя суши ИВМ РАН-МГУ в составе модели прогноза погоды ПЛАВ. / Травова С.В., Степаненко В.М., Медведев А.И., Толстых М.А., Богомолов В.Ю.// Метеорология и гидрология. - 2022. -№3. - С. 5 - 24.

5. Фадеев Р.Ю. Развитие системы долгосрочного прогноза Гидрометцентра России в 2020 году. / Фадеев Р.Ю., Шашкин В.В., Толстых М.А., **Травова С.В.**, Мизяк В.Г., Рогутов В.С., Алипова К.А. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. - 2021. - № 1 (379). - С. 58-72.

Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ:

6. **Махнорылова С.В.** Программа анализа полей влажности почвы с использованием приземных наблюдений на основе упрощенного расширенного фильтра Калмана // Свидетельство о государственной регистрации программ для ЭВМ № 2019662110 от 17.09.2019г

Содержание диссертации также отражено в следующих публикациях:

7. **Махнорылова С.В.** Усвоение влагосодержания почвы методом упрощенного расширенного фильтра Калмана в модели среднесрочного прогноза погоды ПЛАВ / Махнорылова С.В., Толстых М.А. // Сборник Избранные труды Enviromis 2016. Международная конференция и школа молодых ученых по измерению, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды. - 2016. - С. 124 - 128.

8. **Махнорылова С.В.** Усвоение данных приземных характеристик воздуха для инициализации полей влажности почвы в глубоком слое почвы глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 / Махнорылова С.В., Толстых М.А. // Сборник тезисов CITES 2017. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. - 2017b. - С. 79 - 82.

9. **Махнорылова С.В.** Инициализация влагосодержания деятельного слоя подстилающей поверхности для многослойной параметризации почвы в глобальной модели атмосферы ПЛАВ / Махнорылова С.В., Толстых М.А. // Сборник тезисов CITES 2019. Международная молодежная школа и конференция по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде. - 2019. - С. 195 - 198.

10. Толстых М.А. Система моделирования атмосферы для бесшовного прогноза. / Толстых М.А. [и др.] // М.: Триада лтд. - 2017. – 166 С.

11. **Травова С.В.** Оценка воспроизведения влажности и температуры почвы в летний сезон глобальной моделью атмосферы ПЛАВ. / Травова С.В., Толстых М.А. // Труды

международной молодежной школы и конференции по вычислительно-информационным технологиям для наук об окружающей среде CITES '2021. — 2021. — 199 С.

12. **Makhnorylova S.** The study of the observation operator of simplified extended Kalman filter in the SL-AV global medium-range weather forecast model / Makhnorylova S., Tolstykh M. // Satellite Soil Moisture Validation & Application Workshop and the CCI Soil Moisture User Workshop. Ed. by Wagner W. – Austria, Vienna, Vienna University of Technology. – 2017c. – 92 P.

13. Tolstykh M. A. Recent developments of SL-AV numerical weather prediction model. — Marchuk Scientific Readings-2021: Abstracts of the Intern. conf., October 4–8, 2021 [Электронный ресурс] / Tolstykh M. A. [et al.] // Institute of comput. mathematics and mat. geophysics SB RAS. – 2021. – 211 P. URL: http://conf.nsc.ru/msr2021/ru/msr2021_sbornik (дата обращения 10.05.2022).

14. **Travova S.** Soil moisture assimilation system for multilayer soil model — The first joint WCRP-WWRP Symposium on data assimilation and reanalysis. Book of Abstracts [Электронный ресурс] / Travova S. and Tolstykh M. // 2021b. — 137 P. URL: <https://symp-bonn2021.sciencesconf.org/> (дата обращения 10.05.2022).

15. **Travova S.V.** Soil moisture analysis for the multilayer soil scheme of the global atmospheric model SLAV — Marchuk Scientific Readings-2021: Abstracts of the Intern. conf., October 4–8, 2021 [Электронный ресурс] / Travova S.V., Tolstykh M. A. // Institute of comput. mathematics and mat. geophysics SB RAS. – 2021c. – 211 P. URL: http://conf.nsc.ru/msr2021/ru/msr2021_sbornik (дата обращения 10.05.2022).

Прочие работы:

16. **Махнорылова С.В.** Формирование длительных аномалий температурного режима весенне-летнего периода на европейской территории России под влиянием особенностей стратосферной циркуляции / Махнорылова С.В., Угрюмов А.И. // Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета. - 2012. - №24 - С. 38-53.

17. Новицкий М.А. Башкирский смерч: возможности анализа и прогноза смерчеопасной ситуации / Новицкий М.А. [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2016. - №10. - С. 30-40.

18. Esau I. Systematic errors in Northern Eurasian short-term weather forecasts induced by atmospheric boundary layer thickness / Esau I. [et al.] // Environmental Research Letters. – 2018. - vol. 13. - № 12; doi: 10.1088/1748-9326.

19. **Травова С.В.** Оценка прогноза сильных осадков по данным оперативной глобальной модели атмосферы ПЛАВ20 / Травова С.В., Толстых М.А., Шашкин В.В. // Гидрометеорологические исследования и прогнозы. - 2020. - № 1 (375). - С. 96-112.

Для заметок

Отпечатано с оригинал-макетов заказчика 13.07.22г.

Формат 148x210 мм. Бумага офсетная.

Печать цифровая. Тираж 85 экз. Заказ 1238.

Мягкий переплет.

Копировальный центр "Копирка".

141701, Московская обл., г. Долгопрудный, ул. Первомайская, д. 17.

Тел: 8(495) 660-36-00. Эл.адрес: 213@kopirka.ru