

ОТЗЫВ
официального оппонента,
кандидата физико-математических наук Курзеневой Екатерины Владимировны
на диссертационную работу Травовой Светланы Васильевны
«Анализ влажности почвы для глобальной модели атмосферы ПЛАВ»,
представленную на соискание учёной степени кандидата физико-математических наук
по специальности 25.00.30 – Метеорология, климатология, агрометеорология.

Тема исследования и её актуальность. Состояние подстилающей поверхности и процессы на ней во многом определяют состояние атмосферы и важны для прогноза погоды на различные сроки. Турбулентные и радиационные потоки в приземном подслое над поверхностью суши, покрытой и не покрытой растительностью, влияют на атмосферные движения различного масштаба, например на прогрев воздушных масс или на развитие конвекции. Описание эволюции состояния подстилающей поверхности является одной из важнейших задач в гидродинамическом атмосферном моделировании. Характеристики состояния подстилающей поверхности используются как нижние граничные условия для моделей циркуляции атмосферы. Влажность почвы – одна из самых сложных характеристик подстилающей поверхности, как с точки зрения её измерения, так и моделирования. Влажность почвы имеет высокую изменчивость на различных масштабах по горизонтали, по вертикали и во времени. Она зависит от многих факторов: от атмосферных осадков, от взаимодействия с атмосферой путём испарения и транспирации, от свойств почвы и от наличия и эволюции растительности.

В гидродинамических моделях атмосферы чаще всего используются достаточно упрощённые модели переноса тепла и влаги в почве и растительном покрове, так как физика почвы и растительности очень сложна. Измерение характеристик состояния почвы также затруднено из-за их высокой изменчивости на разных масштабах и, как следствие, низкой репрезентативности *in-situ* измерений. Результаты *in situ* измерений почвенных характеристик не участвуют в международном обмене данными и не могут быть использованы для усвоения и корректировки модельной информации в оперативном режиме. Состояние почвы также позволяют оценить спутниковые наблюдения. Однако для использования спутниковых наблюдений необходимо решить дополнительную задачу расчёта влажности почвы по наблюдаемой яркостной температуре или коэффициенту рассеяния в микроволновом диапазоне, с привлечением в, свою очередь, данных о состоянии атмосферы. Поэтому спутниковые продукты, содержащие характеристики влажности почвы, либо модельно-зависимы (например, в них используются результаты модели IFS, разработанной в ECMWF), либо имеют не очень хорошую точность.

В настоящее время в гидродинамическом моделировании широко распространена практика использования данных оперативных измерений температуры и относительной влажности на высоте 2 метра в атмосфере для корректировки модельного описания состояния почвы. Это возможно благодаря тесной связи между состоянием почвы и приземного подслоя атмосферы. Таким образом, приземные наблюдения в атмосфере усваиваются (ассимилируются) в почвенном блоке гидродинамических моделей атмосферы. Для связи между почвенными и атмосферными характеристиками используется оператор наблюдения – алгоритм интерполяции температуры и влажности между модельными верхним слоем почвы и нижним уровнем в атмосфере. Для ассимиляции чаще всего используются алгоритмы оптимальной интерполяции или различные модификации фильтра Калмана. Предварительно данные приземных наблюдений интерполируются из точек измерения на сетку атмосферной модели (методом оптимальной интерполяции или двухмерным вариационным методом).

Использование измерений температуры и влажности воздуха на высоте 2 м для ассимиляции в почвенный блок гидродинамических атмосферных моделей достаточно

сложна и трудоёмко из-за высокой неопределённости в описании связи между почвенными и атмосферными характеристиками. Результаты анализа сильно зависят от алгоритма ассилияции и от его параметров. Например, от выбора прогностических переменных, которые помещаются в вектор состояния, от среднеквадратических ошибок наблюдений, от элементов ковариационной матрицы ошибок фонового поля (поля первого приближения). Значения этих параметров зависят от модели, а их подбор требует предварительного статистического анализа и проведения массированных численных экспериментов. Во многих службах погоды для решения задачи ассилияции в настоящее время используется алгоритм упрощённого расширенного фильтра Калмана (Simplified Extended Kalman Filter, SEKF). Его применение требует расчёта дополнительных прогнозов с возмущённого поля. Точность и устойчивость его работы зависят от величины возмущения элементов вектора состояния, которую необходимо подобрать для конкретной модельной реализации. Для экономии вычислительных ресурсов, дополнительные прогнозы при использовании SEKF могут рассчитываться только для модели почвы (не включая атмосферную часть, с сохранённым из основного запуска атмосферным форсингом). Однако необходимо оценить, влияет ли такое упрощение на успешность прогнозов.

Решению описанных выше проблем и посвящено исследование С. В. Травовой. В представленной ею диссертационной работе реализован алгоритм ассилияции данных наблюдений температуры и влажности воздуха на высоте 2 м, передаваемых в коде SYNOP, методом SEKF. Наблюдения используются для корректировки влажности почвы в двух версиях блока подстилающей поверхности глобальной атмосферной модели ПЛАВ, используемых для прогноза погоды различной заблаговременности: в блоке ISBA-2L и в блоке ИВМ РАН - МГУ. Для почвенного блока ИВМ РАН – МГУ, задача ассилияции решается впервые. Проведены численные эксперименты с целью определения многочисленных параметров фильтра, найденные значения рекомендованы для оперативной работы модели. Представлены результаты верификации модели с использованием описанного подхода, продемонстрировано улучшение качества её прогнозов.

Структура и содержание диссертации. Диссертационная работа С. В. Травовой состоит из введения, пяти глав, заключения и списка использованных источников. Общий объём работы составляет 161 страницу. Список использованных источников состоит из 248 наименований.

Во введении обосновывается актуальность темы исследования, описываются цели и задачи диссертации.

Первая глава посвящена обзору методов усвоения наблюдений для анализа влажности почвы. В ней дано описание различных видов измерения влажности почвы, как наземных, так и спутниковых. Приведена классификация методов, оценены их достоинства и недостатки. Для наземных методов, описаны существующие измерительные сети. Для спутниковых наблюдений, приведены ссылки на описания данных и доступ к продуктам. В этой главе описаны также методы ассилияции в почвенный блок атмосферных моделей как данных наблюдений температуры и влажности воздуха на высоте 2 м, так и спутниковых данных. Описание методов приведено согласно ходу истории их развития и реализации в различных службах погоды: nudging (метод подталкивания), оптимальная интерполяция, вариационные методы, расширенный фильтр Калмана, упрощённый расширенный фильтр Калмана, ансамблевый фильтр Калмана. Выводом из первой главы стало обоснование выбора алгоритма упрощённого расширенного фильтра Калмана (SEKF) для ассилияции данных наблюдений температуры и влажности воздуха на высоте 2 м для корректировки влажности в почвенном блоке модели ПЛАВ.

Вторая глава посвящена описанию параметризаций подстилающей поверхности в глобальной атмосферной модели ПЛАВ. Здесь кратко описана сама модель ПЛАВ,

приведена информация об использовании различных её версий в ФГБУ «Гидрометцентр России» для оперативных прогнозов различной заблаговременности. В данной работе использовались версии с горизонтальным разрешением $0.9 \times 0.72^\circ$ по долготе и широте. Блоки подстилающей поверхности ISBA-2L и ИВМ РАН – МГУ описаны в данной главе подробно. Приведены прогностические уравнения для почвы и для растительности, представлены параметризационные формулы для расчёта модельных параметров. В модели ISBA-2L почва представлена проще, чем в модели ИВМ РАН – МГУ, двумя слоями против восьми. Транспирация в модели ИВМ РАН – МГУ описана так же, как и в модели ISBA-2L, однако с учётом концентрации корней, предписанной каждому слою по вертикали. В данной главе приведены также различные диагностические методы для расчёта модельных температуры и влажности воздуха на высоте 2 м из значений прогностических переменных в верхнем почвенном слое и на нижнем модельном уровне, оценены их достоинства и недостатки.

В третьей главе представлена математическая постановка задачи ассимиляции данных наблюдений температуры и влажности воздуха на уровне 2 м в применении к почвенным блокам ISBA-2L и ИВМ РАН – МГУ. Обоснован выбор прогностических переменных, которые вводятся в вектор состояния. Описана реализация алгоритма и использование его в оперативных прогностических циклах (цикл анализ-прогноз), включая прогнозы с возмущённых полей и расчёт элементов матрицы Якоби. Приведён принцип работы алгоритма при расчёте прогнозов с возмущённых полей только по почвенному блоку (без модели атмосферы). Описаны основные параметры алгоритма (такие как ковариационная матрица ошибок поля первого приближения) и методы их подбора. Описан метод, с помощью которого подбиралась величина возмущения полей первого приближения.

Четвёртая и пятая главы содержат результаты численных экспериментов, с целью подбора параметров алгоритмов ассимиляции и оценки их эффективности. В четвёртой главе описаны эксперименты с моделью ISBA-2L, а в пятой – с моделью ИВМ РАН – МГУ. В обеих главах для калибровки параметров и верификации прогнозов использовались *in-situ* измерения влажности почвы по пяти измерительным сетям в Европе и США и стандартные метеорологические наблюдения температуры и влажности воздуха на высоте 2 м. Основные выводы по результатам экспериментов:

- для модели ИВМ РАН – МГУ, рекомендовано использовать слои глубиной 18 и 54 см;
- для возмущения полей влажности почвы при расчёте элементов матрицы Якоби рекомендован интервал примерно $0.005\text{--}0.01 \text{ м}^3/\text{м}^3$, или 1-2% от почвенного индекса влаги;
- предложено использовать величину среднеквадратической ошибки полей первого приближения, пропорциональную разности между наименьшей (полевой) влагоёмкостью почвы и влажностью завядания, с коэффициентом пропорциональности 0.2;
- показано, что использование только почвенной модели для прогнозов с возмущённых полей при расчёте элементов матрицы Якоби позволяет сократить время расчётов системы и не влияет на успешность прогноза;
- продемонстрировано уменьшение ошибок прогноза приземной температуры и влажности, в зависимости от заблаговременности и региона, для модели ISBA-2L при использовании алгоритма SEKF по сравнению с алгоритмом оптимальной интерполяции;
- продемонстрировано уменьшение ошибок прогноза приземной температуры и влажности, в зависимости от заблаговременности и региона, для модели ИВМ РАН – МГУ при ассимиляции измерений температуры и влажности воздуха на высоте 2 м по сравнению с отсутствием ассимиляции.

В заключении описываются основные результаты работы.

Научная новизна работы состоит в новых рекомендациях по выбору параметров SEKF в применении к ассимиляции наблюдений температуры и влажности на высоте 2 м в

почвенный блок модели ПЛАВ, а также в новых оценках эффективности асимиляции. Для почвенного блока с использованием модели ИВМ РАН – МГУ алгоритм SEKF был применён впервые.

Практическая ценность работы состоит в программной реализации алгоритма SEKF для модели ПЛАВ, а также в разработке версии модели почвы ИВМ РАН – МГУ, работающей отдельно от основной атмосферной модели, под управлением сохранённого атмосферного форсинга.

Достоверность и обоснованность научных положений и выводов не вызывает сомнений. Все выводы по результатам численных экспериментов согласованы. Для всех результатов экспериментов оценена статистическая значимость. По теме диссертации опубликовано 15 работ, в том числе 5 статей в изданиях, рекомендованных ВАК. Результаты работы обсуждались на международных конференциях и семинарах.

Замечания по работе:

1. Работа посвящена асимиляции измерений температуры и влажности воздуха на высоте 2 м в почвенный блок атмосферной модели, для коррекции влажности почвы. Из текста ясно, что коррекция температуры почвы также производится: приведена ссылка. Однако описания алгоритма, хотя бы краткого, нет. Возникает впечатление, что анализ температуры и влажности почвы в модели ПЛАВ не связаны друг с другом. Однако в большинстве реализаций SEKF инкременты для влажности и температуры почвы вычисляются одновременно. Желательно было бы привести краткое описание анализа температуры почвы, и прокомментировать его связь с анализом влажности.
2. Для работы почвенного блока модели очень важно задание параметров подстилающей поверхности, таких как альбедо или листовой индекс. Для схемы ISBA-2L также важно задание глубины второго (глубокого) слоя, особенно учитывая, что она не постоянна в пространстве и варьируется в пределах от 1 до 8 м. Эта глубина также важна для построения карт инкрементов влажности почвы, в случае если влажность оценивается как масса воды в слое. Тогда карта, по сути, отражает две физические характеристики: содержание влаги и глубину слоя, как, например, на Рис. 4.3. В связи с этим, очень важно было бы дать некоторую информацию о том, как задавались эти параметры и как они варьируют в пространстве на сетке модели ПЛАВ. В работе приведена ссылка на базу данных ECOCLIMAP. Эта база содержит карту типов подстилающей поверхности, таблицы значений параметров для каждого типа и программный комплекс для проецирования этих данных на сетку атмосферной модели. Как была применена эта информация? Какова изменчивость глубины второго слоя на сетке модели?
3. В работе указано, что растительность в схеме ISBA-2L представлена двумя видами: низкая и высокая (пункт 2.1.2). Значит ли это использование мозаичного подхода, с различной влажностью почвы под каждым из видов растительности? Если да, то как инкременты влажности распределялись между типами растительности? Если нет, то как реализовано осреднение в схеме?
4. Для большинства формул размерности присутствуют, но есть и пропуски. Например, для формул (2.6)-(2.10) и (2.19)-(2.21) определены не все размерности. В формуле (2.1) размерности не согласуются. В члене в скобках в знаменателе суммируются [К] и [м]. Вероятно, в формуле опечатка. Есть и другие опечатки. Очень неудобно, что при описании модели ИВМ РАН – МГУ не используется международная система единиц.
5. Формула (3.24) описывает ковариационную матрицу ошибок первого приближения (фона) **B**. Её элементы на главной диагонали представляют собой средние квадраты ошибок (дисперсии). Остальные её элементы должны представлять собой коэффициенты ковариации ошибок, равные коэффициентам корреляции, умноженным на произведение корней из дисперсии. В формуле, однако, записаны только произведения корней из дисперсии. Получается, что ошибки скоррелированы с коэффициентом 1. Так ли это? Или это ошибка в формуле?

6. Результаты численных экспериментов проанализированы для всех континентов, кроме Южной Америки. Почему? Данные измерений для неё есть, так как инкременты анализа ненулевые ...
7. Пункт 5.1.3, Таблица 5.3: анализ суточного хода элементов матрицы Якоби. Суточный ход анализируется с помощью медиан глобальных распределений за различные сроки по UTC. Однако глобальная выборка не отражает суточный ход, так как в построении распределения принимают участие все часовые пояса, каждый со своим локальным временем! Таким образом, результат может не иметь физического смысла. Вероятно, надо было бы строить распределения для часовых поясов по локальному времени (используя анализы в одинаковые сроки по локальному времени).
8. Комментарий к результатам верификации, на примере Рис. 5.18 (б). Прогнозы с использованием SEKF по какой-то причине получаются систематически более холодными и более влажными для этого региона, чем прогнозы без ассилияции. Кроме того, в модели имеют место ошибки при воспроизведении суточного хода: она завышает ночные температуры и занижает дневные. Поэтому использование SEKF ведёт к улучшению прогнозов ночью и ухудшению днём. Возможно, график суточного хода осреднённой по региону температуры, в различных экспериментах и по результатам измерений, помог бы лучше оценить ситуацию.

Общая оценка работы. Представленная диссертация является научно-квалификационной работой, которая имеет значение для развития области знаний «Метеорология, климатология, агрометеорология». Диссертация посвящена решению актуальной задачи, а её результаты имеют научную и практическую ценность.

Автореферат соответствует содержанию диссертации.

Приведённые замечания либо носят частный характер, либо являются скорее пожеланиями на будущее. Они не снижают общей положительной оценки диссертационного исследования и не влияют на высокую научную и практическую значимость полученных автором основных результатов.

Диссертационная работа Травовой С. В. соответствует паспорту специальности 25.00.30. Содержание диссертации, выдвинутые научные положения, сформулированные выводы и опубликованные работы дают основания заключить, что диссертация Травовой С. В. «Анализ влажности почвы для глобальной модели атмосферы ПЛАВ является законченной научно-квалификационной работой, полностью соответствующей требованиям «Положения о присуждении учёных степеней», а её автор, Травова С. В. заслуживает присуждения искомой учёной степени кандидата физико-математических наук по специальности 25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология».

Официальный оппонент

кандидат физико-математических наук,

научный сотрудник группы гидродинамического атмосферного моделирования
департамента метеорологических и океанологических исследований

Финского Метеорологического Института

Курзенева Екатерина Владимировна

~

09.08.2022

—

Контактные данные:

тел.: +358503616054, e-mail: ekaterina.kurzeneva@fmi.fi

Специальность, по которой официальным оппонентом защищена диссертация:
25.00.30 – «Метеорология, климатология, агрометеорология»

Адрес места работы:

P.O. BOX 503 FI-00101 HELSINKI FINLAND

тел.: +358503616054, e-mail: ekaterina.kurzeneva@fmi.fi

г. Санкт-Петербург

Девятого августа две тысячи двадцать второго года

Курзенева Екатерина Виадимировна

Российская Федерация

г. Санкт-Петербург.

Девятого августа две тысячи двадцать второго года

Я, Левошко Дмитрий Борисович, временно исполняющий обязанности нотариуса нотариального округа Санкт-Петербурга Михайловой Анны Анатольевны, свидетельствую подлинность подписи Курзеневой Екатерины Владимировны.

Подпись сделана в моем присутствии.

Личность подписавшего документ установлена.

Зарегистрировано в реестре: № 78/167-н/78-2022-24-261.

Уплачено за совершение нотариального действия: 950 руб.

Д.Б. Левошко



ИТОГО В НАСТОЯЩЕМ ДОКУМЕНТЕ

5 (numb)

. листа (листов)

Земельный участок
Нотариус



АРМ "Табеллион"