



А.И. Привезенцев, С.А. Проханов, А.З. Фазлиев, А.В. Старченко, Е.А. Стребкова

Автоматизированный программный комплекс Meteo+ для моделирования краткосрочного прогноза погоды и оценки качества приземного воздуха городской агломерации

Рекомендуемая форма библиографической ссылки

Привезенцев А.И., Проханов С.А., Фазлиев А.З., Старченко А.В., Стребкова Е.А. Автоматизированный программный комплекс Meteo+ для моделирования краткосрочного прогноза погоды и оценки качества приземного воздуха городской агломерации // Научный сервис в сети Интернет: труды XXIV Всероссийской научной конференции (19-22 сентября 2022 г., онлайн). — М.: ИПМ им. М.В.Келдыша, 2022. — С. 406-418.

<https://doi.org/10.20948/abrau-2022-19>

<https://keldysh.ru/abrau/2022/theses/19.pdf>

[Видеозапись выступления](#)

[Презентация к докладу](#)

Автоматизированный программный комплекс Meteo+ для моделирования краткосрочного прогноза погоды и оценки качества приземного воздуха городской агломерации

А.И. Привезенцев^{1,2}, С.А. Проханов², А.З. Фазлиев^{1,2},
А.В. Старченко², Е.А. Стребкова^{1,2}

¹ *Институт оптики атмосферы им. В.Е. Зуева СО РАН*

² *Национальный исследовательский Томский государственный
университет*

Аннотация. В работе дано описание разрабатываемой инфраструктурной научной информационно-вычислительной веб-системы для подготовки, моделирования, визуализации и анализа данных краткосрочного прогноза погоды с целью оценки качества атмосферного приземного воздуха над крупной городской агломерацией. Рассматриваемый единый автоматизированный программный комплекс Meteo+, в первую очередь, предназначен для автоматизации и управления инфраструктурными процессами сбора, хранения и анализа получаемых результатов численного моделирования прогноза погоды и оценки качества атмосферного воздуха. Общая единая систематизация ресурсов в рамках программного комплекса Meteo+ позволяет профессионалам в вычислительной геофизике, занимающихся коллективной разработкой и усовершенствованием собственных вычислительных моделей TSUNM3 и СТМ, сосредоточиться на решении своих прикладных задач, минимизируя технические рутинные работы по подготовке, проведению и сопровождению вычислений, а затем последующему системному хранению, анализу и обмену результатами вычислений. Разрабатываемый единый автоматизированный программный комплекс Meteo+ в финальном виде будет обладать: удобными возможностями онлайн-подготовки и запуска расчетов вычислительных моделей (собственных TSUNM3, СТМ и сторонних WRF, CAMx); расширенными возможностями управления и хранения результатов вычислений; возможностями анализа и интерпретации массивов данных в табличном или графическом видах.

Ключевые слова: автоматизированный программный комплекс, научная информационно-вычислительная система, моделирование краткосрочного прогноза, качество воздуха, городская агломерация

The automated software complex Meteo+ for modeling short-term weather forecasts and assessing ground-level air quality in urban agglomeration

A.I. Privezentsev^{1,2}, S.A. Prohanov², A.Z. Fazliev^{1,2},
A.V. Starchenko², E.A. Strebkova^{1,2}

¹ *V.E. Zuev Institute of Atmospheric Optics SB RAS*

² *National Research Tomsk State University*

Abstract. The paper describes the infrastructure scientific information-computing web-system under development for the preparation, modeling, visualization and analysis of short-term weather forecast data to assess the quality of atmospheric surface air over a large urban agglomeration. The unified automated software complex Meteo+ under consideration is primarily designed for automation and management of infrastructure processes of collection, storage and analysis of the resulting numerical weather prediction modeling and atmospheric air quality assessment results. A common unified systematization of resources within the Meteo+ software package enables professionals in computational geophysics, who are engaged in collective development and improvement of their own computational models TSUNM3 and CTM, to focus on solving their application tasks, minimizing technical routine work on preparation, conducting and supporting calculations, and subsequent system storage, analysis and exchange of calculation results. In its final form, the unified automated Meteo+ software package described will offer: convenient online preparation and execution of computational models (TSUNM3, CTM and third-party WRF, CAMx); enhanced management and storage of computational results; and analysis and interpretation of data sets in tabular or graphical views.

Keywords: automated software complex, scientific information-computational system, short-term forecast modeling, air quality, urban agglomeration

1. Введение

Современная программная инженерия предлагает разнообразные подходы к разработке систем компьютерной поддержки научных исследований. С точки зрения полного и детального решения узкоспециализированных информационных проблем, стоящих перед научными коллективами, оптимальным является индивидуальный подход при планировании и реализации необходимых программных решений. Передовые в плане освоения информационных технологий научные коллективы стараются идти в ногу со временем и используют по максимуму преимущества информационных технологий, оптимально автоматизируя рутинную информационную деятельность. Такие научные

коллективы стараются эффективно организовать и автоматизировать своё информационное рабочее пространство для выполнения предстоящих научных работ, чтобы минимизировать рутинные действия и исключить простои в работе с информацией. Подобное инфраструктурное сопровождение научной деятельности в виде единых научных автоматизированных программных комплексов является эффективным способом решения подобных задач.

В настоящее время в экологии актуальной проблемой является накопление достоверной информацией с высоким уровнем детализации а пространстве и времени. Рассматриваемые в работе научные исследования связаны с мониторингом и прогнозом экологического состояния атмосферы над крупными городскими агломерациями. Основным способом получения детального численного прогноза является использование различных физико-математических вычислительных моделей [1]. На основе вычисленных результатов прогноза эксперты уже могут выдавать вероятностные предсказания некоторых опасных погодных явлений (туман, порывы ветра, интенсивные осадки, гроза, гололед и т.д.) и проводить оценку качества приземного воздуха городской агломерации.

2. Анализ и постановка задачи

Для понимания целей и задач разрабатываемого программного решения (программной системы) необходимо построить информационную модель предметной области и решаемых в ней проблем. В данной работе основной рассматриваемой предметной областью является вычислительная геофизика. В частности, исследуются научные проблемы моделирования краткосрочного прогноза погоды и оценки качества приземного воздуха городской агломерации. При этом основные планируемые прикладные исследования связаны с повышением эффективности и точности современных математических моделей и численных методов.

Для определения информационных проблем, связанных с планируемыми научными исследованиями, и возможных вариантов их программного решения в виде информационной системы, необходимо определиться с целевой аудиторией (пользователями). Так в результате анализа целевой аудитории были выделены три подгруппы пользователей:

1) профессионалы в вычислительной геофизике, занимающиеся разработкой и усовершенствованием вычислительных моделей, тестированием и апробацией выдвигаемых исследовательских решений в рамках проверки своих научных гипотез;

2) профессионалы в метеорологии, занимающиеся экспертным анализом, интерпретацией и вероятностными предсказаниями опасных погодных явлений, влияющих на качество приземного воздуха городской агломерации;

3) студенты и аспиранты, занимающиеся изучением определенных аспектов метеорологии и освоением изучаемых навыков.

У каждой из подгрупп пользователей, входящих в целевую аудиторию, были выявлены свои информационные проблемы и потребности.

Для профессионалов в вычислительной геофизике основные информационные потребности связаны с необходимостью использования программного веб-инструмента для коллективной совместной работы и в автоматизации специфической для них рутинной технической деятельности, связанной с выполнением ими научных исследований по усовершенствованию физико-математических моделей и численных методов. К информационным процессам, требующим автоматизации, относятся: получение и подготовка данных; запуск и контроль выполнения вычислений; просмотр, сравнение и публикация результатов.

Для профессионалов в метеорологии основные информационные потребности также связаны с необходимостью использования программного веб-инструмента для коллективной совместной работы и в автоматизации специфической уже для них рутинной технической деятельности, связанной с мониторингом, анализом и интерпретацией метеорологических данных. К информационным процессам, требующим автоматизации, относятся: получение и отображение данных внешних измерений и вычислений; просмотр, сравнение и публикация результатов внутренних вычислений; поддержка принятия решений в рамках предсказаний опасных погодных явлений, влияющих на качество приземного воздуха городской агломерации.

Для студентов и аспирантов, занимающихся изучением определенных аспектов метеорологии, основные информационные потребности также связаны с необходимостью программного веб-инструмента для совместного освоения навыков работы с метеорологическими данными и в автоматизации специфической уже для них деятельности при проведении учебного процесса. К информационным процессам, требующим автоматизации, относятся: получение и отображение данных результатов измерений и вычислений; объяснения и пояснения происходящих рабочих процессов; индивидуальная оценка усвоения материала и корректировка обучения.

В большинстве своём рассматриваемая целевая аудитория в рамках решения своих определенных задач в практической деятельности занимается следующими информационными задачами: поиском, получением, анализом, просмотром, сравнением, доработкой и персонализацией под индивидуальные информационные потребности определенных числовых массивов метеорологических данных.

Таким образом, на основе анализа имеющихся информационных проблем и потребностей целевой аудитории целью разработки стала

инфраструктурная многопользовательская научная информационно-вычислительная веб-система для выбранных вычислительных физико-математических моделей (собственных TSUNM3 [2], СТМ и сторонних WRF, CAMx[3]). Эта информационная система должна иметь программную реализацию следующих функциональных возможностей: возможность хранения, импорта и экспорта результатов вычислений; возможность расширенного атрибутивного поиска результатов вычислительного моделирования с последующим их визуальным анализом и интерпретацией; возможность проведения полного цикла вычислительного моделирования, начиная от процесса онлайн-подготовки данных в специальных графических интерфейсах, затем процесса запуска, затем процесса мониторинга и управление вычислениями, и заканчивая финальными процессами систематизации и хранения получаемых результатов.

3. Архитектура программного комплекса Meteo+

Обобщая вышеизложенные идеи, проблемы и перспективы развития в данной работе предлагается вариант разработки программного решения в виде единого автоматизированного программного комплекса Meteo+, в основе которого лежат выбранные вычислительные физико-математические модели (собственные TSUNM3, СТМ и сторонние WRF, CAMx), интегрированные в разрабатываемую инфраструктурную многопользовательскую научную информационно-вычислительную веб-систему. Перспективным углубленным развитием автоматизированного программного комплекса Meteo+ являются задачи мониторинга, прогноза и заблаговременного предупреждения опасных метеорологических условий, приводящих к существенному ухудшению качества атмосферного воздуха и видимости вблизи различных крупных городов, промышленных объектов и транспортных узлов, расположенных в средних и северных широтах. Например, организация подсистемы мониторинга возможна за счёт актуальных наземных измерений метеорологических величин и концентраций примеси, полученных с применением не только современной приборной базы Центра коллективного пользования (ЦКП) "Атмосфера" Института оптики атмосферы СО РАН, но и других источников метеорологических данных. В текущей программной реализации данные наблюдений, выполненных с помощью приборной базы ЦКП «Атмосфера» ИОА СО РАН, позволяют оценивать корректность и точность результатов моделирования.

Основой, предлагаемой автоматизированной программной системы Meteo+ является оригинальная негидростатическая мезомасштабная модель численного прогноза погоды TSUNM3 [2]. Эта модель использует систему трехмерных нестационарных уравнений гидродинамики, тепло- и массопереноса в тропосфере и уравнение теплопроводности в верхнем

слое почвы. Для моделирования процессов фазовых превращений водяной влаги в атмосфере в данной работе используется 6-классовая схема микрофизики влаги WSM6[4]. Она рассматривает шесть состояний атмосферной влаги (водяной пар, облачная влага, дождевая влага, ледяные частицы, снег, град). Для каждого из параметров состояния влаги в атмосфере используется уравнение переноса, приводящие к изменению фазового состояния рассматриваемых форм состояния влаги. Для пограничного слоя атмосферы используется модель турбулентности, состоящая из уравнения для кинетической энергии турбулентности, а также алгебраических соотношений для определения коэффициентов турбулентной диффузии. Также в модели рассматривается протекание следующих атмосферных процессов: радиационные факторы, обусловленные влиянием коротковолновой и длинноволновой радиации в рассматриваемом слое атмосферы с учетом рассеяния и ослабления излучения при ясном небе, поглощения излучения водяным паром, поглощения и отражения облаками; нагрев подстилающей поверхности проникающей солнечной коротковолновой радиацией и ее выхолаживание за счет длинноволнового излучения в темное время суток; турбулентный обмен импульсом, теплом, влагой с подстилающей поверхностью. Инициализация модели TSUNM3 и обеспечение ее боковыми граничными условиями проводится на основе результатов численного прогноза погоды оперативной глобальной модели SLAV [5] Гидрометцентра РФ.

Одной из основных задач создаваемого автоматизированного программного комплекса Meteo+ является моделирование, представление и хранение результатов вычислений и измерений. Стоит отметить, что результаты вычислений в основной своей массе, получаемы с помощью оригинальной мезомасштабной модели высокого разрешения TSUNM3, а также с помощью другой оригинальной модели СТМ оценки загрязнения воздуха в исследуемой области с учетом не только антропогенных, но и биогенных источников примеси. Получаемые результаты измерений ЦКП “Атмосфера” ИОА СО РАН, основаны на сертифицированных метеорологических приборах нового поколения, обеспечивающих систему оперативного прогнозирования данными измерений реального состояния атмосферы.

Общая архитектура разрабатываемого автоматизированного программного комплекса Meteo+ представлена на рис. 1. Архитектура представляют собой классическую идею клиент-серверного взаимодействия. Так целевая аудитория, представленная в виде трех подгрупп пользователей, описанных выше, взаимодействует с клиентской частью системы в браузере пользователя, которая, в свою очередь, взаимодействует с серверной частью системы, расположенной на удаленном сервере и содержащей основные данные и вычисления.

Выбранное клиент-серверное архитектурное решение в отличие от, например, монолитного настольного решения, продиктовано необходимостью организации многопользовательской совместной коллективной работы с разделением труда. На данный момент наиболее оптимальным способом реализации клиент-серверной архитектуры с точки зрения охвата применения на множестве устройств с различными операционными системами является разработка программного решения в виде веб-приложения, где клиентская часть запускается и выполняется в изолированной среде веб-браузера. С точки зрения функциональных возможностей клиентская часть в основном предназначена для интерактивного графического взаимодействия с пользователем, представляя собой вариант тонкого клиента, а подавляющее большинство задач по обработке информации выполняется на сервере.

На сервере вычислительные модули являются обертками над консольными исполнительными файлами скомпилированных вычислительных моделей (собственные TSUNM3, CTM и сторонние WRF, CAMx) под имеющиеся аппаратные архитектуры (открытый расширяемый список вычислительных узлов). Каждый вычислительный модуль является автономной и независимой службой со своими графическими интерфейсами взаимодействия с пользователем по подготовке входных данных, запуску, мониторингу, сбору и хранению результатов, а также последующему анализу и визуализации числовых результатов. Каждая вычислительная модель имеет свои собственные наборы и форматы входных и выходных данных, при этом стоит отметить, что выходные данные модели TSUNM3 являются входными данными модели CTM, а выходные данные модели WRF являются входными данными модели CAMx. Так как основной целью программного комплекса является моделирование краткосрочного прогноза погоды и оценки качества приземного воздуха городской агломерации в рамках разработки и совершенствования связки собственных математических моделей TSUNM3 и CTM, то сторонняя связка модели прогноза погоды WRF и модели оценки качества воздуха CAMx используется преимущественно как источник базовых численных результатов для сравнения с результатами развиваемых собственных моделей.

Технически каждый расчётный случай (вариант моделирования, пример решения) сохраняется отдельно в системе и имеет уникальный идентификатор, по которому можно посмотреть его метаданные и при желании использовать в качестве источника данных в других информационных задачах. Входные числовые данные каждого расчётного случая являются либо ссылкой на уже хранящийся в системе набор данных другого расчётного случая (например, набор выходных данных расчётного случая другой модели), либо ссылкой на набор данных по-умолчанию для выбранной модели при определенных условиях, либо набором заданных

пользователем числовых значений в интерактивном режиме взаимодействия. Выходные числовые данные каждого расчётного случая сохраняются всегда полностью и связываются в системе с этим расчётным случаем.

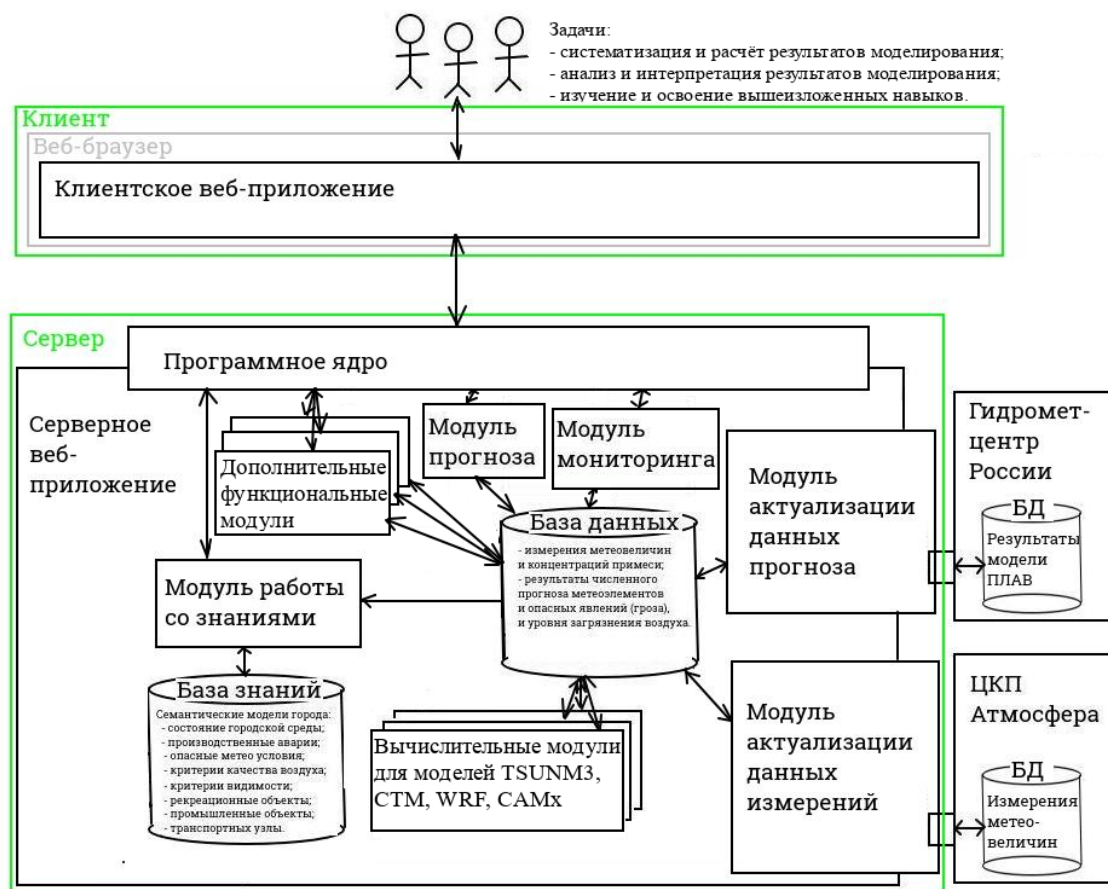


Рис. 1. Архитектура автоматизированного программного комплекса Meteo+

Для решения ряда информационных задач в качестве системы хранения данных и метаданных была выбрана СУБД MariaDB, клиентская часть реализована с использованием языков HTML, CSS (UI Kit - Tabler), JavaScript (jQuery). Серверная часть реализована с использованием языка Python (Django, Wagtail). Разрабатываемый программный комплекс в финальном виде позволит проводить численное моделирование и представлять результаты в табличном и графическом видах, а также хранить и систематизировать результаты вычислений с помощью не только собственных оригинальных математических моделей TSUNM3 и CTM, но и общеизвестных открытых метеорологических моделей WRF и CAMx.

4. Функциональные возможности системы

Каждая подгруппа целевой аудитории автоматизированного программного комплекса Meteo+ решает в нём свои прикладные задачи, по большей части требующие различного общего графического представления и комбинации информационных компонентов рабочего пространства. Рассмотрим общие функциональные возможности системы на примере (рис. 2) графического интерфейса пользователей первой подгруппы (профессионалов в вычислительной геофизике) для подготовки данных и запуска вычислений модели TSUNM3.

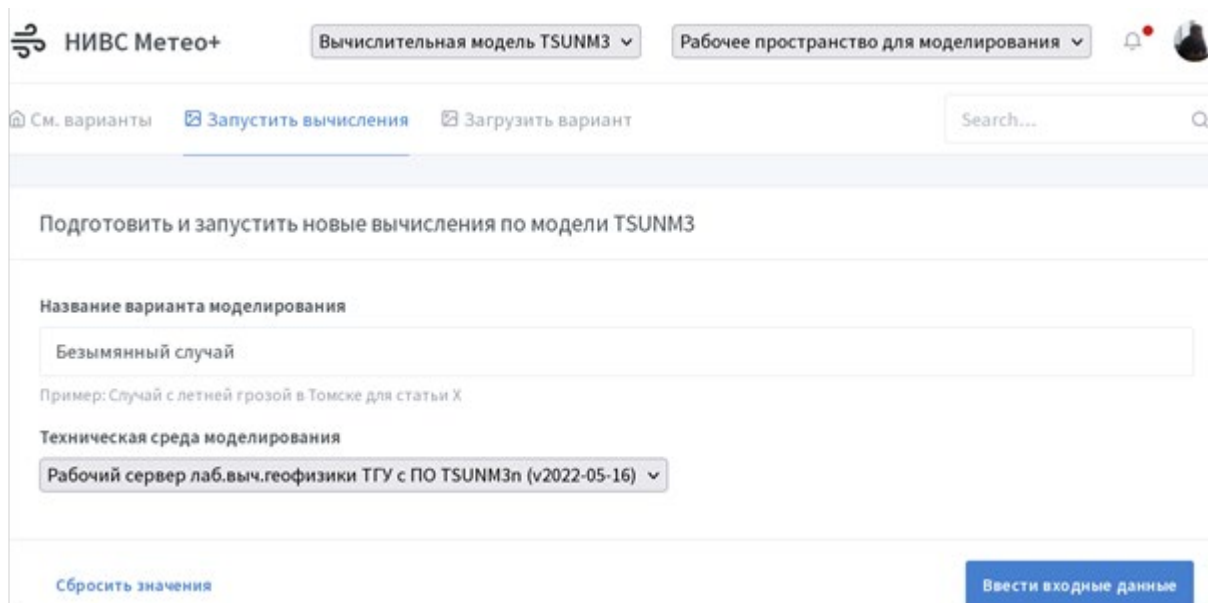


Рис. 2. Графический интерфейс пользователей первой подгруппы (профессионалов в вычислительной геофизике) для подготовки данных и запуска вычислений модели TSUNM3

Идентифицированный пользователь программной системы имеет личный кабинет с персонализированными настройками и может взаимодействовать с доступными ему разделами и данными системы в соответствии с выданными ему администратором разрешениями. Каждый пользователь может входить в одну или несколько групп целевой аудитории и переключаться между вариантами компоновки информационных блоков страницы (графическое рабочее пространство пользователя) в соответствии со своими предпочтениями и решаемыми прикладными задачами. В каждом графическом рабочем пространстве пользователя нужно выбрать текущую вычислительную модель из списка TSUNM3, CTM, WRF, CAMx, задающую активную модель данных в рамках которой будет происходить взаимодействие с пользователем.

Базовыми информационными задачами в рамках рабочего пространства для моделирования являются задачи работы с расчётными

случаями (вариантами моделирования, примерами решения). Стоит, в первую очередь, выделить информационные задачи, связанные с созданием (изменением) и просмотром наборов данных расчётных случаев. Основным способом добавления наборов данных расчётных случаев в систему является использование графических интерфейсов встроенной поддержки новых вычислений, предполагающей подготовку, запуск и мониторинг прогона расчётного случая. Менее приоритетным способом добавления наборов данных расчётных случаев в систему является использование графических интерфейсов загрузки (импорта) наборов данных и метаданных расчётного случая, вычисленных вне системы и представляющих собой специфические для каждой вычислительной модели наборы входных и выходных файлов. Основным способом просмотра наборов данных расчётных случаев является атрибутивный поиск (фильтрация) из множества вариантов моделирования конечного списка ожидаемых вариантов и просмотр информационной карточки выбранного расчётного случая, содержащей метаданные о связанных наборах входных и выходных данных. При необходимости из информационной карточки расчётного случая можно перейти к табличному или графическому отображению непосредственно самих числовых массивов данных, например, как на рис. 3.

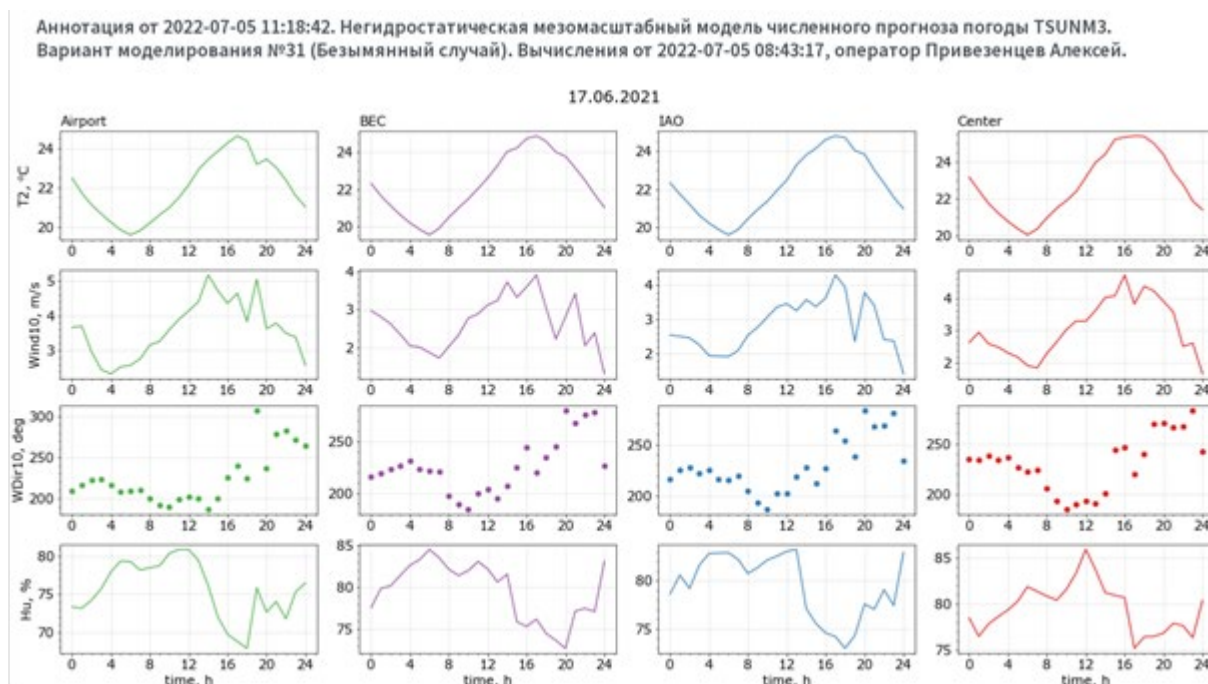


Рис. 3. Один из вариантов визуализации данных расчётного случая моделирования №31 (модель TSUNM3). Прогноз погоды в фиксированных пространственных точках Томской городской агломерации (Аэропорт, ИОА, БЭК, Центр) на 17.06.2021

Графический интерфейс рабочего пространства для анализа метеорологических результатов, предназначенный для второй подгруппы (профессионалов в метеорологии), в рамках выбора текущей вычислительной модели предполагает информационные компоненты, реализующие специфические для этой группы функциональные возможности, делающей упор на анализ и интерпретацию наборов данных расчётных случаев. Эти информационные компоненты предоставляют расширенные возможности по просмотру и сравнению выбранных результатов моделирования с механизмами поддержки принятия решений в рамках предсказаний опасных погодных явлений и оценки качества приземного воздуха городской агломерации [6].

Графический интерфейс рабочего пространства для обучения метеорологическому анализу, предназначенный для третьей подгруппы (студентов и аспирантов, занимающиеся изучением определенных аспектов метеорологии), в рамках выбора текущей вычислительной модели предполагает информационные компоненты, реализующие функциональные возможности, делающие упор на обучение и пояснения, а также индивидуальную оценку усвоения материала пользователем с целью индивидуальной корректировки обучения.

5. Заключение

В работе представлено описание единого автоматизированного программного комплекса *Meteo+*, предназначенного для систематизации, хранения и анализа получаемых результатов численного моделирования опасных погодных явлений и оценки качества атмосферного воздуха с помощью вычислительных собственных *TSUNM3*, *CTM* и общеизвестных сторонних *WRF*, *CAMx* моделей.

Оригинальные разработки включают модель переноса примеси с сокращенным химическим механизмом *CTM* и негидростатическую мезомасштабную метеорологическую модель с современной схемой параметризации микрофизики влаги *TSUNM3*. Разрабатываемый единый автоматизированный программный комплекс *Meteo+* в финальном виде позволит хранить и анализировать множество результатов вычислительных моделей, сравнивая их с непосредственными актуальными измерениями. Графические веб-интерфейсы разрабатываемого программного решения позволят удобно и независимо от платформы подготавливать входные данные, а затем запускать новые вычислительные задачи для последующего анализа и интерпретации всех результатов в виде таблиц или графиков. Представленное программное решение, в первую очередь, предназначено для подготовки, моделирования, визуализации и анализа данных краткосрочного прогноза погоды и оценки качества атмосферного приземного воздуха над крупной городской агломерацией.

Текущая программная реализация архитектуры автоматизированного программного комплекса Meteo+ находится в стадии разработки. По планам осенью 2022 года финальная версия будет развернута в режиме эксплуатации на сервере лаборатории вычислительной геофизики ММФ ТГУ и доступна широкому кругу пользователей по адресу <http://meteo.math.tsu.ru/>.

Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 19-71-20042.

Литература

1. Старченко А.В., Кижнер Л.И., Одинцов С.Л., Данилкин Е.А., Проханов С.А., Лещинский Д.В., Сваровский А.И. Численное моделирование опасных погодных явлений с помощью мезомасштабных метеорологических моделей высокого разрешения // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXVII Международного симпозиума. — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2021. — С. D-208-D-211.
2. Старченко А.В., Барт А.А., Кижнер Л.И., Данилкин Е.А. Мезомасштабная метеорологическая модель TSUNM3 для исследования и прогнозирования состояния метеопараметров приземного слоя атмосферы над крупным населенным пунктом // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. 2020. № 66. — С. 35-55.
3. Стребкова Е.А., Старченко А.В. Моделирование качества атмосферного воздуха в Томске с помощью моделей WRF и CAMx // Оптика атмосферы и океана. Физика атмосферы: материалы XXVII Международного симпозиума. — Томск: Изд-во ИОА СО РАН, 2021. — С. 448-451.3.
4. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-68CSTR. — 2008. — 100 p.
5. 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. Многомасштабная глобальная модель атмосферы ПЛАВ: результаты среднесрочных прогнозов погоды // Метеорология и гидрология. — 2018, №11. — С.90-99.
6. Starchenko A., Shelmina E., Kizhner L. Numerical Simulation of Meteorological Conditions and Air Quality above Tomsk, West Siberia // Atmosphere. — 2020, Vol. 11, № 11. — P. 1-15.

References

1. Starchenko A.V., Kizhner L.I., Odintsov S.L., Danilkin E.A., Prokhanov S.A., Leshchinskii D.V., Svarovskii A.I. Chislennoe modelirovanie opasnykh pogodnykh iavlenii s pomoshchiu mezomasshtabnykh meteorologicheskikh modelei vysokogo razresheniia // Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery: materialy XXVII Mezhdunarodnogo simpoziuma. — Tomsk: Izd-vo IOA SO RAN, 2021. — S. D-208-D-211.
2. Starchenko A.V., Bart A.A., Kizhner L.I., Danilkin E.A. Mezomasshtabnaia meteorologicheskaia model TSUNM3 dlia issledovaniia i prognozirovaniia sostoianiia meteoparametrov prizemnogo sloia atmosfery nad krupnym naselennym punktom // Vestn. Tom. gos. un-ta. Matematika i mekhanika. 2020. № 66. — S. 35-55.
3. Strebkova E.A., Starchenko A.V. Modelirovanie kachestva atmosfernogo vozdukha v Tomske s pomoshchiu modelei WRF i CAMx // Optika atmosfery i okeana. Fizika atmosfery: materialy XXVII Mezhdunarodnogo simpoziuma. — Tomsk: Izd-vo IOA SO RAN, 2021. — S. 448-451.3.
4. Skamarock W.C., Klemp J.B., Dudhia J., Gill D.O., Barker D.M., Duda D.M., Wang W., Powers J.G. A description of the advanced research WRF version 3. NCAR Tech. Note. NCAR/TN-68CSTR. — 2008. — 100 p.
5. Tolstykh M.A., Fadeev R.Iu., Shashkin V.V., Goiman G.S., Zaripov R.B., Kiktev D.B., Makhnorylova S.V., Miziak V.G., Rogutov V.S. Mnogomasshtabnaia globalnaia model atmosfery PLAV: rezultaty srednesrochnykh prognozov pogody // Meteorologiya i gidrologiya. — 2018, №11. — S.90-99.
6. Starchenko A., Shelmina E., Kizhner L. Numerical Simulation of Meteorological Conditions and Air Quality above Tomsk, West Siberia // Atmosphere. — 2020, Vol. 11, № 11. — P. 1-15.