

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ

имени М.В. ЛОМОНОСОВА

На правах рукописи



Рязанова Анна Александровна

**Чувствительность оценок теплового баланса почвогрунтов к
гидрофизическим коэффициентам в модели деятельного слоя
суши**

1.6.16 – Гидрология суши, водные ресурсы, гидрохимия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата физико-математических наук

Москва – 2025

Диссертация подготовлена в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки «Институт мониторинга климатических и экологических систем Сибирского отделения Российской академии наук», г. Томск

Научный руководитель

Богомолов Василий Юрьевич,
кандидат физико-математических наук

Официальные оппоненты

Гельфан Александр Наумович,
доктор физико-математических наук, член-корреспондент РАН, ФГБОУ ВО «МГУ имени М.В. Ломоносова», Географический факультет, кафедра гидрологии суши, профессор

Денисов Сергей Николаевич,
кандидат физико-математических наук, ФГБУН «Институт физики атмосферы имени А.М. Обухова РАН» лаборатория теории климата, старший научный сотрудник

Кондратьев Сергей Алексеевич,
доктор физико-математических наук, ФГБУН «Санкт-Петербургский ФИЦ РАН», лаборатория математических методов моделирования, руководитель, главный научный сотрудник

Защита диссертации состоится «5» июня 2025 г. в 14 часов 00 минут на заседании диссертационного совета МГУ.016.3 Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова по адресу: 119991, г. Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2, физический факультет, аудитория СФА.

E-mail: versan@physics.msu.ru

С диссертацией можно ознакомиться в отделе диссертаций научной библиотеки МГУ имени М.В. Ломоносова (Ломоносовский просп., д. 27) и на портале: <https://dissovet.msu.ru/dissertation/3410>

Автореферат разослан «___» _____ 2025 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат физико-математических наук



С.В. Колесов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Объектом исследования диссертационной работы является чувствительность моделирования процессов тепловлагопереноса в почве к различным входным параметрам в модели деятельного слоя суши (ДСС) ИВМ РАН-МГУ (TerM – Terrestrial Model) (Stepanenko et al, 2024); модель TerM – автономная и усовершенствованная версия блока деятельного слоя модели земной системы (МЗС) INMCM (Volodin et al, 2018).

Предметом исследования является способ задания, агрегирование и влияние пространственного разрешения гидрофизических коэффициентов почвы для модели ДСС TerM.

Методы исследования.

В качестве основного инструмента для анализа воспроизведения процессов тепловлагообмена в почве используются методы математического моделирования, реализованные в модели ДСС TerM. Для анализа результатов моделирования используются методы статистической обработки данных.

Актуальность темы исследования и степень ее разработанности.

В настоящее время модели ДСС, как часть модели Земной системы, являются одним из основных инструментов для исследования процессов, протекающих на поверхности материков в условиях современных и будущих климатических изменений. На данном этапе развития моделей ДСС происходит детализация описания физических и биогеохимических процессов, также с ростом вычислительных ресурсов увеличивается их пространственное разрешение. Выделяются три наиболее актуальных направления развития: управление сложностью параметризаций физических и биогеохимических процессов, учёт эффектов неоднородности земной поверхности, временная и пространственная изменчивость параметров модели (Fisher and, Koven, 2020).

В большинстве моделей ДСС, также, как и в модели TerM, для воспроизведения динамики влаги используется уравнение Ричардса. Для определения взаимосвязи между влажностью почвы и потенциалом влаги (основная гидрофизическая характеристика, ОГХ), а также между влажностью почвы и гидравлической проводимостью используется (только одна или на выбор) параметризация Брукса-Кори/Клаппа-Хорнбергера (R. H. Brooks And A. T. Corey, 1964, Clapp and Hornberger, 1978), либо параметризация Муалем-ван Генухтена (Mualem, 1976; Van Genuchten, 1980, Schaap and Genuchten, 2006). В эти функции входят некоторые гидрофизические коэффициенты (ГФК), зависящие от свойств среды и определяемые эмпирическими способами.

С начала развития климатических моделей и до настоящего момента, большинство блоков, входящие в модели Земной системы и отвечающие за деятельный слой, в

дальнейшем стали отдельными моделями ДСС – Noah Land Surface Model (Noah LSM) (Kishné et al, 2017), Community Land Model (CLM) (Lawrence et al, 2019), TerM (Алексеев и др., 1998, Stepanenko et al, 2024), Oregon State University LSM (OSULSM) (Chen and Dudhia, 2001), ISBA-CTRIP Land Surface System (Decharme et al, 2019), Joint UK Land Environment Simulator (JULES) (Best et al, 2011), Minimal advanced treatments of surface interaction and runoff (MATSIRO) (Takata et al, 2001) и др. В этих моделях для задания гидрофизических коэффициентов для параметризации Брукса-Кори/Клаппа-Хорнбергера используется одно постоянное значение на основе одной педотрансферной функции (ПТФ) (в том числе и для пористости почвы) из работ (Clapp and Hornberger, 1978) или (Cosby et al, 1984) для каждого из 11 типов почвы по треугольнику Ферре (предписанные значения ГФК). Для параметризации Муалема-ван Генухтена по такому же принципу используются ГФК из ПТФ Розетта (Schaap et.al, 2001).

При этом распределение ГФК даже внутри одного типа почвы имеет большую вариативность (Gutmann and Small, 2005). Также необходимо отметить, что существует большой блок работ по анализу и использованию ПТФ в различных областях, например, (Pachepsky, Ya. A., and Rawls, W. J, 2004; Shein and Arhangel'skaya, 2006), но выделить одну оптимальную ПТФ для глобального описания ГФК не представляется возможным.

Использование предписанных по типам почв ГФК считалось допустимым упрощением, до тех пор, пока модели ДСС имели достаточно низкое горизонтальное разрешение (шаг сетки 100-500 км), но с его ростом (шаг сетки 5-50 км и менее) такой подход может вносить значительную неопределённость в решение, поскольку неоднородность земной поверхности становится значимой на таких масштабах (Kabat et al, 1997; Zhu and Mohanty, 2003).

В настоящее время существуют современные глобальные наборы данных высокого пространственного разрешения (30") о ГФК, которые могут являться источниками ГФК (например, (Dai et al, 2019)) для моделей ДСС. Во всех моделях ДСС помимо ГФК также предусмотрено использование множества других внешних параметров поверхности суши (гранулометрический состав почвы, типы поверхности, параметры рельефа и т.д.). Поэтому у большинства моделей (ДСС и МЗС) существуют специальное программное обеспечение (ПО) для подготовки таких данных ввиду несогласованности пространственных разрешений в глобальных наборах входных параметров и разрешения целевой сетки модели. Например, для модели CLM подготовка данных осуществляется через пакет CLM Tools. Для модели TerM, во многом совпадающей и повторяющей блок деятельного слоя в МЗС INMCM, такой пакет был недавно разработан (Рязанова и др., 2024).

Целью работы является исследование чувствительности переменных, описывающих тепловлагоперенос в почве и на ее поверхности в модели ДСС TerM, к гидрофизическим коэффициентам, к варьированию их пространственного разрешения и пространственного разрешения самой модели, а также к методам агрегирования этих коэффициентов.

Для достижения этой цели были поставлены следующие **задачи**:

1. Создать инструмент (программное обеспечение) для подготовки входных данных о параметрах поверхности суши для модели деятельного слоя суши TerM для любого пространственного разрешения с использованием различных методов агрегирования.
2. Исследовать репрезентативность источников получения гидрофизических коэффициентов почвы (натурные наблюдения, педотрансферные функции, глобальные наборы данных) для модели ДСС TerM.
3. Оценить качество воспроизведения тепловлагопереноса в почве и на ее поверхности моделью ДСС TerM при варьировании гидрофизических коэффициентов почвы с привлечением данных натурных измерений.
4. Исследовать для тестовой территории чувствительности тепловлагопереноса в модели ДСС TerM к горизонтальному разрешению модели и полей гидрофизических коэффициентов почвы при использовании различных методов агрегирования.

Научная новизна и значимость работы.

Впервые проведено сравнение результатов моделирования температуры и влажности почвы, потоков явного и скрытого тепла при различных способах задания ГФК почвы для модели ДСС TerM. По результатам этого сравнения в модели рекомендуется использовать в качестве источника ГФК не предписанные значения, а современные глобальные наборы данных высокого пространственного разрешения. При этом показано, что решение модели ДСС чувствительно к изменению горизонтального разрешения – улучшение разрешения приводит к лучшему воспроизведению гидрологических характеристик. Улучшение воспроизведения тепловлагопереноса в почве моделью ДСС, в свою очередь, способно повлиять на результат работы моделей прогноза погоды или климата, в которые она включена.

Впервые в России создано программное обеспечение для автоматизированной подготовки входных данных о параметрах поверхности суши для модели ДСС TerM для любого пространственного разрешения, позволяющее существенно облегчить работу,

связанную с агрегированием полей гидрофизических коэффициентов на сетку модели, что в свою очередь упрощает задачу тестирования модели ДСС TerM на чувствительность.

Положения, выносимые на защиту.

1. Температура и потоки тепла в почве и на ее поверхности, воспроизводимые моделью деятельного слоя суши (ДСС) с низким горизонтальным разрешением и с высоким горизонтальным разрешением (различие низкого и высокого горизонтального разрешения составляет около одного порядка), существенно отличаются между собой; степень этого отличия зависит от пространственного разброса значений гидрофизических коэффициентов при высоком разрешении в расчетной области. Для южной части Западной и Восточной Сибири разность за 30 лет для температуры верхнего слоя почвы между указанными расчётами составляет $0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, при этом для отдельных участков разность составляет $3\text{ }^{\circ}\text{C}$.
2. В модели ДСС использование наборов данных о параметрах поверхности суши с высоким горизонтальным разрешением и увеличение горизонтального разрешения в самой модели повышают точность воспроизведения переменных, описывающих теплоперенос в почве и на ее поверхности. Для южной части Западной и Восточной Сибири разность за 30 лет для температуры верхнего слоя почвы между экспериментом с самым низким разрешением и экспериментом с высоким разрешением увеличивается по мере уменьшения разрешения (разность между $5^{\circ}\times 4^{\circ}$ и $1^{\circ}\times 1^{\circ}$ – $1.3\text{ }^{\circ}\text{C}$, разность между $5^{\circ}\times 4^{\circ}$ и $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$ – $1.4\text{ }^{\circ}\text{C}$, разность между $5^{\circ}\times 4^{\circ}$ и $0.25^{\circ}\times 0.25^{\circ}$ – 1.45°C).
3. Созданное программное обеспечение для модели ДСС TerM позволяет ответить на вопросы, связанные с агрегированием гидрофизических коэффициентов, с влиянием способа их задания на корректную локализацию паттернов температуры и влажности почвы. Так же позволяет существенно автоматизировать процесс подготовки входных данных о параметрах поверхности суши для любого пространственного разрешения.

Степень достоверности результатов.

В работе используется модель ДСС TerM, основанная на блоке деятельного слоя суши МЗС INMCM - единственной отечественной модели, участвующей в программе сравнения глобальных климатических моделей СМIP; этот блок также служит частью модели оперативного прогноза погоды ПЛАВ Гидрометцентра России (Травова и др., 2022). Ранее было показано, что модель ДСС TerM удовлетворительно воспроизводит теплоперенос в почве (Володин и Лыкосов, 1998a; Володин и Лыкосов, 1998b; Bogomolov et al, 2019; Bogomolov et al, 2020; Травова и др., 2022). В диссертационной работе дополнительно проводится сравнение с верифицированными данными измерений

(Dyukarev et al, 2020). Используемые методы агрегирования параметров поверхности суши базируются на общепринятых статистических методах и подходах (Beliakov et al, 2016). Разработанный пакет программ находится в открытом доступе (<http://tesla.parallel.ru/Ryazanova/TerMPS/-/wikis/home>) и используется в интересах модели ДСС TerM и модели МЗС INMCM. Используемые источники данных о ГФК почвы – наиболее детальные в настоящее время глобальные наборы данных, полученные компиляцией множества наборов результатов натурных измерений.

Апробация результатов. Основные результаты диссертации представлены на 6 российских и международных конференциях: международная конференция и школа молодых ученых «Вычислительно-информационные технологии для наук об окружающей среде» CITES (2021 г., 2023 г., Москва); Международная конференция по измерениям, моделированию и информационным системам для изучения окружающей среды ENVIROMIS (2022 г., 2024 г., Томск); Национальная модель Земной системы: теория, технологии и результаты (2024 г., Сочи); Russian Supercomputing Days (2024 г., Москва).

Материалы диссертации обсуждались на научных семинарах: «Математическое моделирование геофизических процессов: прямые и обратные задачи» (НИВЦ МГУ, 2024 г.), заседание кафедры физики моря и вод суши физического факультета МГУ имени М. В. Ломоносова (2024 г.), научный семинар ОГФ МГУ имени М. В. Ломоносова (2025 г.), семинар лаборатории КЭИ ИМКЭС СО РАН (2024, 2025 гг.).

По теме диссертации опубликовано 7 работ: 4 статьи в изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus и ядро РИНЦ, и 3 свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение и базы данных.

Личный вклад.

Автор диссертационной работы принимала непосредственно личное участие в постановке численных экспериментов, лично проводила все численные эксперименты с моделью ДСС TerM и их анализ. Автором лично разработано программное обеспечение для подготовки входных данных о параметрах поверхности суши для модели ДСС TerM.

Структура и объем работы.

Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, списка сокращений и благодарностей и списка цитируемых литературных источников.

В диссертационной работе представлен обзор современного состояния проблемы, в особенности, источников данных по гидрофизическим коэффициентам почвы, проведено исследование педотрансферных функций на их применимость в моделях ДСС, проведено сравнение ГФК, полученных с помощью различных ПТФ, и ГФК из глобального набора почвенных параметров высокого разрешения (**Глава 1**). Изложена постановка численных

экспериментов с моделью ДСС TerM и разработка ПО для агрегирования параметров поверхности суши для модели ДСС TerM (**Глава 2**). Представлены результаты серии численных экспериментов, показывающих чувствительность модели ДСС TerM к ГФК, а также к пространственному разрешению (**Глава 3**).

Работа изложена на 110 страницах, иллюстрирована 39 рисунками и содержит 7 таблиц. Список цитируемых литературных источников включает в себя 138 наименований, из которых 11 на русском языке.

Благодарности.

Выражаю благодарность своему научному руководителю и наставнику, **Богомолу Василию Юрьевичу**, за постоянную поддержку и содействие в написании диссертационной работы, за терпение и отзывчивость.

Также выражаю искреннюю благодарность за постоянную поддержку и научные задачи **Воропай Надежде Николаевне**, **Дюкареву Егору Анатольевичу** из ИМКЭС СО РАН и **Репиной Ирине Анатольевне** из ИФА РАН.

Отдельная благодарность заведующему нашей лабораторией ЛКЭИ в ИМКЭС СО РАН, **Гордову Евгению Петровичу**, за его большой вклад в мое развитие как специалиста.

Проводимая работа в этой диссертации частично выполнена в рамках госзадания ИМКЭС СО РАН (регистрационный номер проекта 121031300158-9), а также в рамках гранта 075-15-2024-554 «Глобальные климатические вызовы на территории России: ретроспективный анализ, прогноз и механизмы адаптации» (в виде субсидии крупного научного проекта Минобрнауки России).

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ.

Во ВВЕДЕНИИ работы обоснована актуальность работы, сформулирована цель и поставлены задачи работы, представлены сведения о методах исследования, обозначена научная новизна и значимость, приведены сведения об апробации работы, личном вкладе соискателя, о структуре и объеме диссертации.

Глава 1, построенная на результатах (Рязанова и др., 2023), содержит анализ источников получения гидрофизических коэффициентов почвы. На данный момент существует как минимум три способа получения гидрофизических коэффициентов для параметризаций Брукса-Кори/Клаппа-Хорнбергера или Муалема-ван Генухтена: прямые методы (полевые измерения), педотрансферные функции (ПТФ) и глобальные наборы данных, построенные на некотором оптимальном подборе ПТФ для всей области определения ГФК. Прямые методы позволяют получить наиболее достоверные значения гидрофизических коэффициентов для конкретных почвенных разрезов, где проводились

отборы почвенных проб. Сами прямые методы могут быть сложны и трудозатратны. Гидрофизические коэффициенты, полученные прямыми методами, могут использоваться при моделировании тепловлагопереноса в локально-одномерной версии модели ДСС, использование прямых методов для регионального и глобального климатического моделирования ограничено, что связано с отсутствием или недостаточностью локальных измерений во многих регионах.

Педотрансферные функции в некотором смысле снимают это ограничение, поскольку строятся на множестве данных натуральных измерений, но всё же привязаны к конкретному типу почвы. Выбрать какую-то одну лучшую ПТФ для всего множества типов почв не представляется возможным (Pachepsky and Rawls, 1999; Рязанова и др, 2023), что накладывает ограничения на их использование в модели ДСС при глобальном моделировании тепловлагопереноса в почве.

Третий источник гидрофизических коэффициентов появился сравнительно недавно – это глобальные наборы данных высокого пространственного разрешения. Использование таких наборов исключает минусы первых двух подходов, но следует учитывать возможность некоторой неопределенности на предмет их достоверности и качества. При этом за отсутствием альтернатив, использование таких наборов является возможно лучшим решением при глобальном или региональном моделировании климата или погоды (Weber et al, 2024). В главе приводится обзор существующих наборов данных высокого пространственного разрешения и обоснование выбора глобального набора почвенных гидравлических и термических характеристик для моделирования деятельного слоя суши (Dai et al, 2019) (далее будем обозначать как «ПН2019»). Этот глобальный набор содержит в себе как данные о гранулометрическом составе почвы, так гидрофизические коэффициенты для параметризаций Брукса-Кори/Клаппа-Хорнбергера и Муалема-ван Генухтена. ГФК в этом глобальном наборе получены методом подбора оптимальной эмпирической кривой ОГХ или гидравлической проводимости, где в качестве приближения использовались значения ГФК, полученные по оптимальным ПТФ, для каждой комбинации гранулометрического состава.

Основой для модели ДСС TerM (Stepanenko et al., 2024) служит система одномерных уравнений тепловлагопереноса в деятельном слое суши (почве), поскольку вертикальные градиенты температуры и влаги в различных ее состояниях, как правило, значительно превосходят горизонтальные. Динамика влаги определяется законом сохранения массы и уравнением Ричардса. Зависимость капиллярно-сорбционного потенциала от влажности почвы задаётся в модели функцией Клаппа-хорнбергера (Clapp and Hornberger, 1978) или обобщённой на случай насыщения почвы формулой Муалема-

ван Генухтена (по умолчанию). Гидрофизические же коэффициенты для этих параметризаций изначально задавались одним значением для каждого из 11 типов почв по треугольнику Ферре (Алексеев и др., 1998, Clapp and Hornberger, 1978) (предписанные значения ГФК, далее будем обозначать как «ПН98»). Для определения типа почвы использовались входные данные о гранулометрическом составе из глобального набора типов земного покрова и почвы Вилсона и Хендерсона-Селлерса 1985 года (Wilson and Henderson-Sellers, 1985) (также отнесем этот набор к ПН98) с исходным пространственным разрешением $1^\circ \times 1^\circ$, при условии, что базовое разрешение модели ДСС составляет $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. Этот набор данных 1985 является устаревшим и по качеству данных и по исходному горизонтальному разрешению. Анализ гидрофизических коэффициентов для параметризации Муалема-ван Генухтена из ПН2019 показал их двукратную вариативности даже внутри одного типа почвы (Рисунок 1).

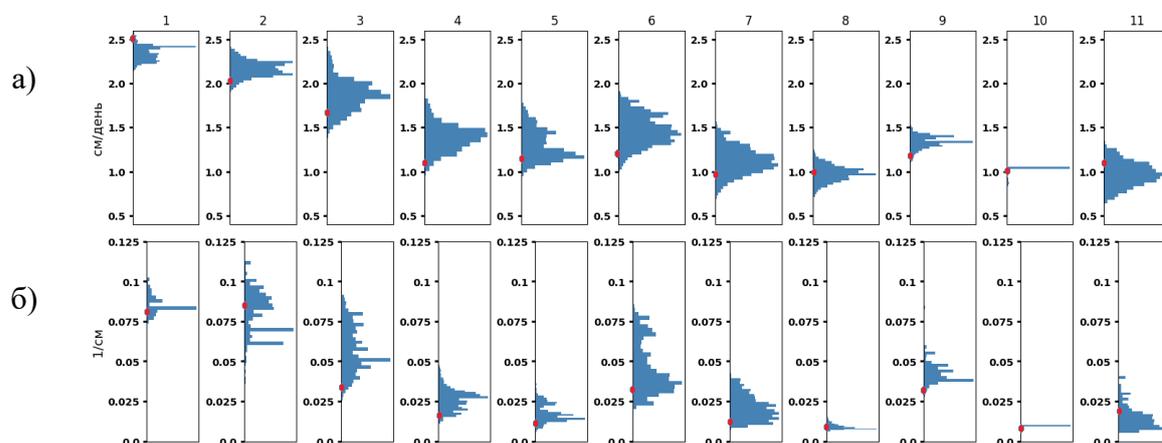


Рисунок 1. Распределение (синий цвет) ГФК по типам почв согласно треугольнику Ферре (11 типов) по данным ПН2019: а) – гидравлическая проводимость насыщения $\log_{10}(K_s)$ (ось у: см/день), б) – параметр Муалема-ван Генухтена α (ось у: 1/см); ГФК по данным ПН98 (красные точки) – одно значение для каждого типа почвы.

Использование низкого разрешения исходной базы по гранулометрическому составу и задание предписанных значений гидрофизических коэффициентов по типам почв не отражает всего их многообразия. Использование предписанных по типам почвы ГФК при увеличении горизонтального разрешения модели может вносить погрешность в результаты моделирования, поскольку эти величины входят явно в используемые параметризации и участвуют в решении дифференциальных уравнений. Поэтому использование нового более подробного и точного набора почвенных данных представляется логичным и обоснованным в модели ДСС, являющейся частью модели климата и прогноза погоды.

Глава 2 посвящена постановке численных экспериментов с моделью ДСС TerM с использованием внешних наборов данных о параметрах поверхности суши, в том числе из ПН2019.

Следует отметить, что все современные наборы параметров поверхности суши представляют собой отдельные наборы данных с высоким разрешением (например, 30"). Возможное же горизонтальное разрешение моделей ДСС может варьироваться в различных пределах в зависимости от целей и задач исследователей. Таким образом, для использования этих наборов параметров в модели необходима их предварительная подготовка – согласование горизонтального и вертикального (при наличии) разрешения полей параметров с пространственным разрешением целевой сетки модели. Если рассматривать модель ДСС TerM, которая во многом совпадает с блоком ДСС МЗС ИВМ РАН (INMCM) (Volodin et al, 2018), то как для нее, так и для блока ДСС модели климата, программного обеспечения, позволяющего решить задачу агрегирования наборов параметров поверхности суши на целевую для модели сетку, не существует. В связи с этим представляется необходимым создание такого типа программного обеспечения (ПО) (Рязанова и др., 2024).

Условно все внешние параметры поверхности суши, используемые в ДСС, можно разделить на две группы:

- количественные параметры, т.е. физические характеристики (гранулометрический состав, гидрофизические коэффициенты почвы, площади типов земельного покрова и т.д.);
- качественные параметры, т.е. параметры, содержащие тот или иной качественный признак (тип земного покрова и т.д.).

В зависимости от типа данных отличаются подходы к их агрегированию на целевую сетку модели. Для агрегирования количественных параметров используется метод среднего взвешенного, где в качестве весов используется площадь ячейки исходной сетки. Среднее взвешенное может быть определено различным образом и оптимальный для параметра поверхности суши метод осреднения определяется тем, как он входит в систему дифференциальных уравнений модели ДСС. В текущей версии разработанного ПО реализовано три варианта метода: среднее взвешенное арифметическое (формула 1), геометрическое (формула 2) и гармоническое (формула 3):

$$f_{out,i} = \frac{\sum_{\Omega_j \in S_i} f_j \mu(\Omega_j)}{\mu(S_i)} \quad (1)$$

$$f_{out,i} = \prod_{\Omega_j \in S_i} f_j^{\frac{\mu(\Omega_j)}{\mu(S_i)}}, f_j > 0, \quad (2)$$

$$f_{out,i} = \frac{\mu(S_i)}{\sum_{\Omega_j \in S_i} \frac{\mu(\Omega_j)}{f_j}}, \quad (3)$$

где f_j - значение количественного параметра в ячейке исходной (мелкой) сетки Ω_j , $\mu(\dots)$ - мера (площадь) ячейки, S_i - ячейка целевой сетки, $f_{out,i}$ - агрегированное по этой сетке значение параметра f . Считается, что $\mu(S_i) = \sum_{\Omega_j \in S_i} \mu(\Omega_j)$, т.е. каждая ячейка целевой сетки есть объединение некоторого множества ячеек исходной сетки. Формулу (1) можно трактовать как математическое ожидание величины f , где плотность вероятности f определяется мерой (площадью) ячеек исходного разрешения с соответствующими значениями f . Для прямоугольной ячейки $\Omega_j = [\lambda_1, \lambda_2] \times [\varphi_1, \varphi_2]$ на сфере: $\mu(\Omega_j) = R^2(\sin\varphi_{2j} - \sin\varphi_{1j}) * (\lambda_{2j} - \lambda_{1j})$, где R - радиус Земли.

При агрегировании данных, содержащих качественные значения, необходимо вычислить не среднее значение, а долю площади каждого качественного признака (например, долю площади типа поверхности суши) в ячейке целевого пространственного разрешения (формула 4). В результате алгоритма агрегирования получается массив уже количественных характеристик.

$$g_{out,i}^k = \frac{\mu(S_i^k)}{\mu(S_i)} = \frac{\sum_{\Omega_j \in S_i, g_j^k(\Omega_j)=1} \mu(\Omega_j)}{\mu(S_i)}, \quad (4)$$

где $g_{out,i}^k$ - доля площади ячейки, занятая k -м категориальным значением, S_i^k - область i -й ячейки целевой сетки, занятая k -м категориальным значением. Сумма долей площадей всех типов, попавших в ячейку целевого пространственного разрешения, равна 1.

Исходные данные также могут иметь, кроме широтного и долготного измерений, вертикальное измерение, в частности, это различные почвенные характеристики. Таким образом возникает дополнительная задача проекции сеточных величин с вертикальной сетки исходных данных на вертикальную сетку модели. При этом возможны два варианта такой операции:

- проекция сеточной функции с исходной вертикальной сетки на целевую вертикальную сетку модели интерполяционным методом;
- осреднение сеточной функции по вертикальной области с присвоением постоянного по глубине значения на целевой сетке.

Второй вариант имеет смысл, поскольку в базовой версии модели ДСС почва считается по вертикали однородной, и численно решаемое уравнение переноса жидкой влаги записано в этом приближении. Такой подход применяется в большинстве блоков ДСС моделей Земной системы.

Процесс разработки ПО был разбит на два этапа: разработка базовых функций с реализацией приведенных математических формул и разработка программ-обработчиков

для каждого набора данных, реализующих последовательность выполнения базовых функции, для выполнения процесса агрегирования. Язык программной реализации – *Python*, все базовые функции объединены в одну *py*-модуль, а затем в *py*-пакет *TerMPS*. Установка пакета происходит стандартным образом, например, через команду *pip install TerMPS*. Такой подход является модульным и обеспечивает гибкость ПО при дальнейшем его развитии. Подробное описание и техническая документация доступны на *wiki*-странице репозитория, где размещено ПО: <http://tesla.parallel.ru/Ryazanova/TerMPS/-/wikis/home>. На рисунке 2 представлена концепция реализации разработанного ПО.

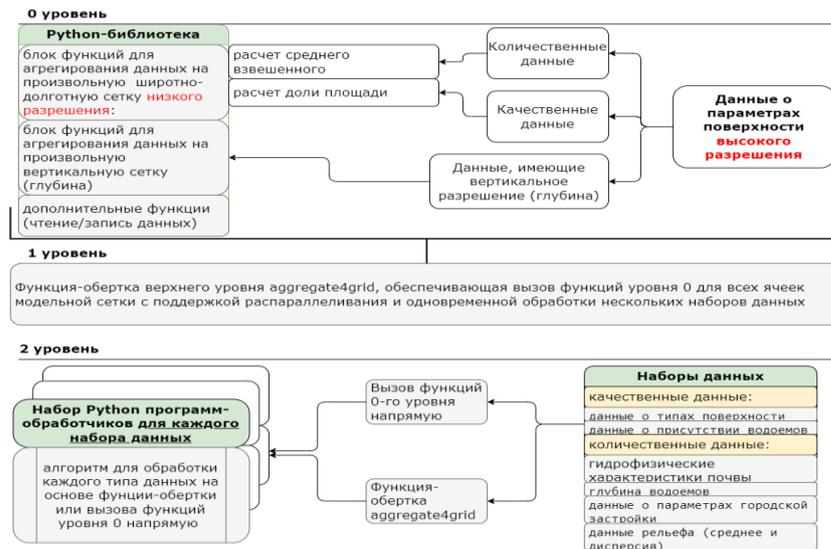


Рисунок 2. Концепция ПО для агрегирования данных о параметрах поверхности суши для модели ДСС TerM.

Для тестирования ПО использовались два набора данных: ПН2019 (количественные данные) и данные распределения типов земного покрова GLCCv2 (GLCC, 2017) (качественные данные) с классификацией *SiB2* (*Simple Biosphere 2 Model*, 15 типов) с горизонтальным разрешением $30'' \times 30''$. В результате агрегирования исходных данных был получен набор почвенных характеристик и долей площади каждого типа поверхности суши в ячейке с различным горизонтальным разрешением: $0.1^\circ \times 0.1^\circ$, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $1^\circ \times 1^\circ$, $2^\circ \times 1.5^\circ$, $5^\circ \times 4^\circ$. Эти наборы доступны для свободного скачивания по ссылке: <http://kibel.srcc.msu.ru:8080/share.cgi?ssid=09b2cff84fe6498aa7b4d5e8f5134f7c>. На рисунке 3 представлены карты исходных ($30'' \times 30''$) и агрегированных данных на сетку $0.5^\circ \times 0.5^\circ$.

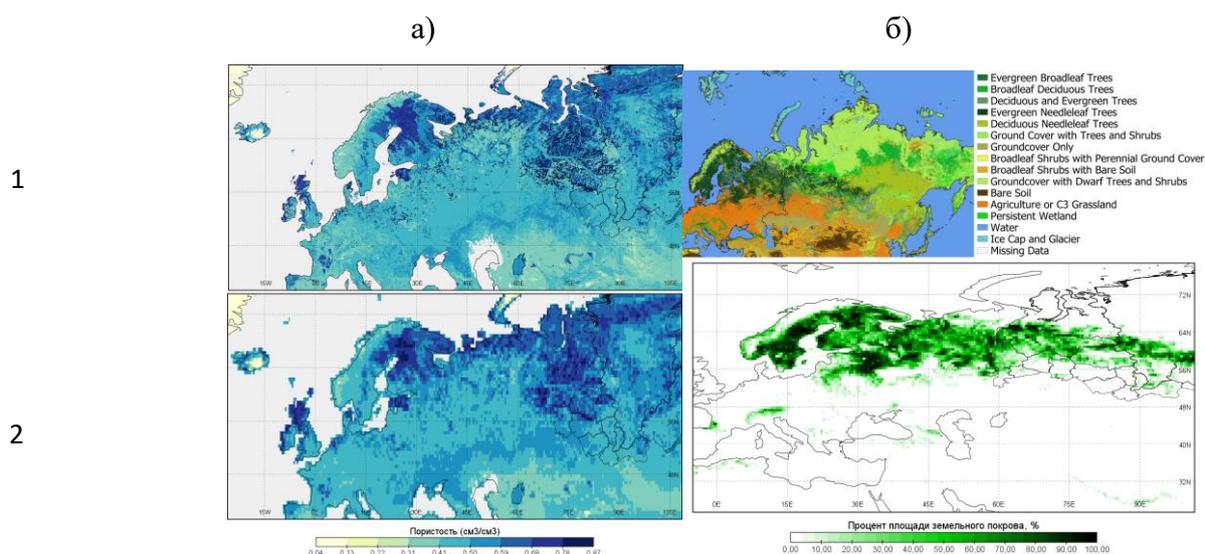


Рисунок 3. Пространственное распределение: а) – пористости ($\text{см}^3/\text{см}^3$) по данным ПН2019 для первого слоя 0 - 0.0451 м: 1 – исходные данные с пространственным разрешением $30'' \times 30''$, 2 – агрегированные данные на сетку с разрешением $0.5^\circ \times 0.5^\circ$; б) – типов растительного покрова по данным GLCCv2: 1 – исходные данные с пространственным разрешением $30'' \times 30''$, 2 – агрегированные данные на сетку $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ (доля площади (в %) в ячейках $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ типа «вечнозеленые хвойные леса»)

В главе 3 исследуется чувствительность модели к описанию гидрофизических коэффициентов почвы.

Для определения чувствительности модели ДСС к описанию гидрофизических коэффициентов почвы проведены следующие эксперименты:

1. Локально-одномерный эксперимент с целью демонстрации того, что при правильно заданных гранулометрическом составе почвы и гидрофизических коэффициентах, соответствующих ему, модель ДСС TerM достаточно хорошо воспроизводит тепловлагодперенос в точке.
2. Три группы региональных экспериментов:
 - 1) эксперименты на чувствительность решения модели ДСС к выбору способа задания ГФК: а) предписанные значения ГФК по типам почвы согласно треугольнику Ферре (ПН98), б) пространственные поля ГФК высокого разрешения из глобального набора данных (ПН2019),
 - 2) эксперименты на чувствительность решения модели ДСС:
 - а) к пространственному разрешению ГФК почвы,
 - б) к методам агрегирования ГФК почвы.
 - 3) эксперименты на чувствительность решения модели ДСС к горизонтальному разрешению модели.

Под пространственным разрешением модели TerM понимается размер (площадь) равномерных широтно-долготных ячеек для выделенной области поверхности суши, для каждой из которых находится интегральное по горизонтали решение модели. Фактически получается набор, не связанных между собой одномерных расчетов. Модель TerM имеет 23 неравномерных уровня по глубине (до 10 метров), при этом почва считается по вертикали однородной, поскольку численно решаемое уравнение переноса жидкой влаги записано в этом приближении. Шаг модели по времени во всех экспериментах составляет 1 час. Если рассматривать модель в контексте того, что физические процессы тепловлагопереноса в почве описаны верно, то тогда на правильность решения при фиксированных других параметрах поверхности почвы будут влиять именно гидрофизические коэффициенты почвы, которые входят в физические уравнения через параметризацию как внешние параметры, описывающие физические свойства среды.

1. Локально-одномерный эксперимент. Для моделирования тепловлагопереноса в локальном почвенном профиле был выбран почвенный разрез, расположенный на территории метеостанции «Бакчар», (Бакчарский район Томской области, 57° с.ш., 82° в.д.). На данной метеостанции Институтом мониторинга климатических и экологических систем (ИМКЭС) СО РАН производятся многолетние измерения метеорологических величин и есть данные о гранулометрическом составе почвенного профиля, который до глубины 3.2 м имеет однородный состав и относится к 11 типу почвы по треугольнику Ферре («глина») (Dyukarev et al, 2020). В таблице 1 приведены основные почвенные характеристики: гранулометрический состав (получен из данных измерений) и соответствующие ему гидрофизические коэффициенты для параметризации Муалема-ван Генухтена. Данные коэффициенты были определены на основании гранулометрического состава из глобального почвенного набора высокого разрешения ПН2019.

Таблица 1 – Гранулометрический состав почвенного разреза на метеостанции «Бакчар» и соответствующие ему гидрофизические коэффициенты для параметризации Муалема-ван

Генухтена из ПН2019.

V песка, см ³ /см ³	V глины см ³ /см ³	V ила см ³ /см ³	V орг. материала, см ³ /см ³	Пористо сть, P, см ³ /см ³	Параме тр, n, -	Парамет р, α, 1/см	log10(K _s), (см/день)
0.09	0.35	0.1	0.07	0.39	1.22	0.016	0.97

В качестве атмосферного воздействия для модели TerM используются данные о температуре воздуха, атмосферном давлении, влажности воздуха и осадкам (заимствовались из данных измерений), данные по приходящей коротковолновой и

длинноволновой радиации копировались из массива реанализа ERA5 (Hersbach et al, 2020). Период интегрирования модели – 5 лет (01.08.2012-30.09.2017) выбирался таким образом, чтобы в этот промежуток имелись полные ряды данных измерений, как для атмосферного воздействия, так и для температуры почвы, по которым будет проводиться сравнение с результатами моделирования. Начальный профиль температуры почвы задавался из данных измерений на дату запуска численного эксперимента. Начальные условия для профиля влажности почвы задавались как 50% от максимально возможного насыщения. Необходимо отметить, что для сравнения с данными моделирования используются данные измерений только за теплый период наблюдений (май-сентябрь).

Для того, чтобы показать, что качество решения модели зависит в большей степени от гранулометрического состава и ГФК, проведено два эксперимента: первый – с ГФК из таблицы 1, соответствующим измеренному гранулометрическому составу из глобальной базы (ГФК); второй – эксперимент со значениями ГФК, полученными осреднением полей высокого разрешения на ячейку $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, в которой находится выбранная точка, (средние ГФК). Все остальные условия оставались одинаковыми для этих экспериментов.

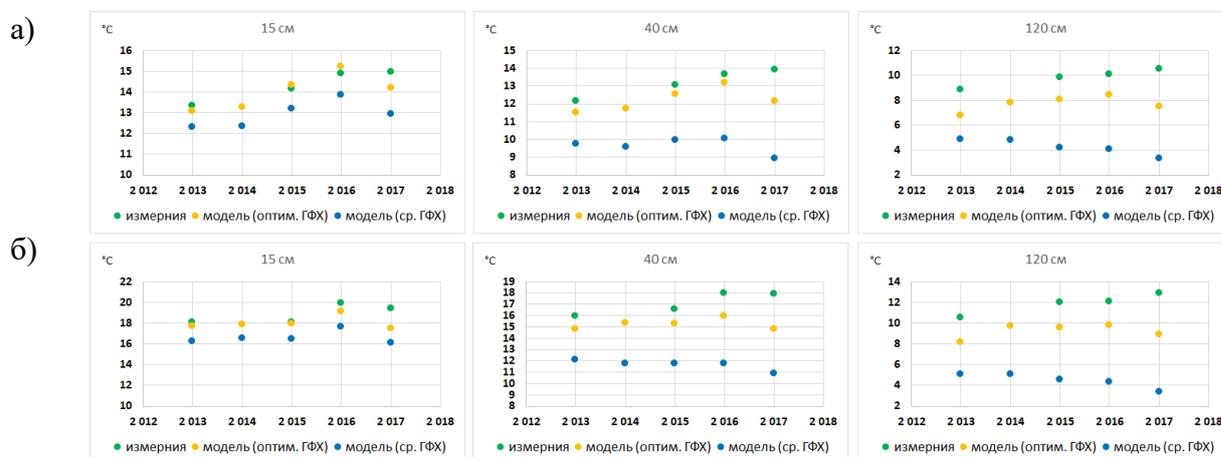


Рисунок 4. Температура почвы: а) – средняя за теплый сезон (май-сентябрь), б) – средняя за июль месяц.

По рисунку 4 видно, что при осреднении за многолетний период (сезон и месяц) ошибка между данными измерений и моделирования при использовании средних значений ГФК значительно возрастает. Исходя из проведенных экспериментов можно заключить, что модель достаточно хорошо описывает тепловлагоперенос в почве при правильном задании ГФК. Низкие значения температуры для эксперимента со средними значениями ГФК могут быть связаны с повышенными затратами тепла на испарение.

Измерения влажности почвы на метеостанции «Бакчар» не проводятся, поэтому можно провести сравнение результатов только двух модельных экспериментов (на

рисунках не приведены). Объемная влажность почвы, полученная моделью с ГФК (в среднем за теплый период 60%), отличается от объемной влажности почвы, полученной моделью со средними ГФК (в среднем за теплый период 30%) практически в два раза. Пониженная влажность в расчёте со средними значениями ОГХ в почве согласуется с предположением о повышенной эвапотранспирации в этом эксперименте. Правильность воспроизведения температуры почвы в модели ДСС TerM напрямую связана с правильностью воспроизведения влажности, поскольку влагоемкость почвы напрямую влияет на коэффициент теплопроводности.

Таким образом, этот численный эксперимент показал, что модель ДСС TerM хорошо воспроизводит тепловлагоперенос в почве, но при условии правильного задания ГФК. Данный результат согласуется со множеством других работ по локально-одномерным расчетам модели ДСС TerM, проведенных ранее (Володин и Лыкосов, 1998a; Володин и Лыкосов, 1998b; Vogomolov et al, 2019; Vogomolov et al, 2020), в том числе и при сравнении влажности почвы (Травова и др., 2022).

2. Региональные численные эксперименты. Для всех численных региональных экспериментов в качестве атмосферного воздействия использовался реанализ ERA5 с 1990 по 2021 год с 1 часовым шагом по времени. Начальные значения температуры и влажности почвы задавались одинаковыми для всего профиля и для всех экспериментов. Расчет статических метрик между полученными полями проводился с использованием ранее разработанного при участии автора диссертации программного инструмента (Vogoray, 2021).

Эксперимент 2.1. На данный момент в модели ДСС TerM реализовано два варианта определения параметров удержания влаги в почве: параметризация Клаппа-Хорнбергера и параметризация Муалема-ван Генухтена (по умолчанию). В дальнейшем все эксперименты будут проводиться с конфигурацией модели с параметризацией Муалема-ван Генухтена. Изначально в модели использовалось одно значение гидрофизических коэффициентов, входящих в параметризацию Муалема-ван Генухтена, в (том числе и для пористости почвы) (ПН98) для каждого из 11 типов почв согласно треугольнику Ферре. При этом по данным ПН2019 видна двукратная изменчивость гидрофизических коэффициентов внутри одного типа почвы (глава 1, рисунок 2).

Проведены два численных эксперимента на чувствительность термовлажностного режима почвы в модели ДСС к выбору способа задания ГФК: **А)** гранулометрический состав почвы и предписанные значения ГФК по типам почвы согласно треугольнику Ферре из ПН98, **Б)** пространственные поля свойств почвы (гранулометрический состав и ГФК) высокого разрешения ПН2019, агрегированные на сетку модели $0.5^\circ \times 0.5^\circ$. В

качестве расчетной области выбрана южная часть территории Западной и Восточной Сибири (50° - 65° с.ш., 60° - 120° в.д., рисунок 5). Горизонтальное разрешение модели ДСС – $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$.

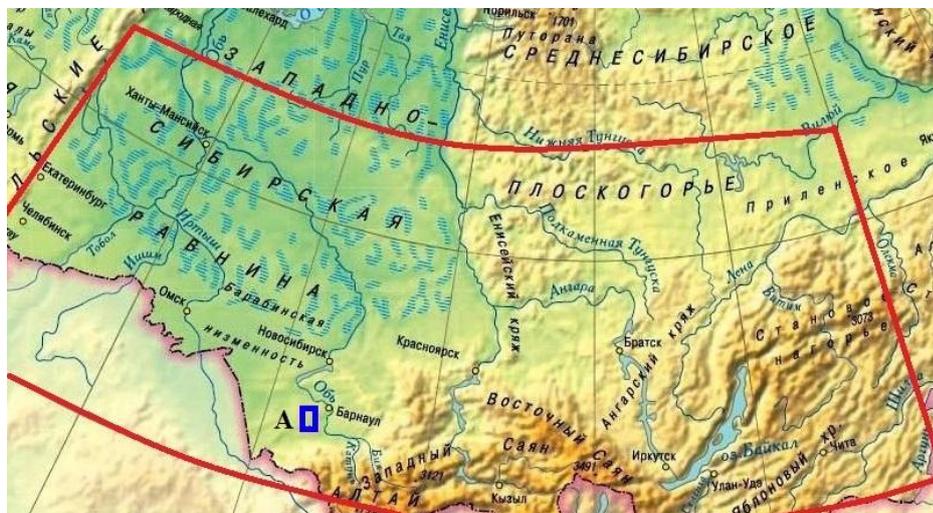


Рисунок 5. Расчетная область в региональных численных экспериментах – южная часть территории Западной и Восточной Сибири (50° - 65° с.ш., 60° - 120° в.д.).

Данная расчетная область (рисунок 5) располагается в центральной части материка Евразия и была выбрана как тестовая территория, которая имеет уникальные по разнообразию типы почв: западная часть – это Западно-Сибирская равнина, в том числе болотные экосистемы, включающие в себя Васюганское болото, имеющие значительно отличающиеся значения ГФК от значений ГФК для минеральной почвы (Шеин, 2005); восточная часть – это Среднесибирское плоскогорье, переходящее на юге в горные системы (Алтайско-Саянская горная страна).

На рисунке 6а представлено поле распределения значений пористости по данным ПН98 (одно значение для каждого из 11 типов почвы) для разрешения модели $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$; на рисунке 6б представлено поле распределение значений пористости данных высокого горизонтального разрешения ПН2019, агрегированных на сетку модели $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$. Распределение пористости из данных ПН2019 хорошо согласуется с распределением болотных экосистем Западной Сибири (Аббазов и др., 2024). Распределение пористости из ПН98 наоборот дает наибольшие значения в южной части тестовой территории, где располагаются степные районы. Таким образом, использование одного значения ГФК для каждого из 11 типов почвы по треугольнику Ферре (ПН98) не отражает реальное распределение природных объектов, например, таких как болотные экосистемы. Аналогичный характер распределения ГФК для территории Сибири имеет место и для других ГФК из ПН98 в параметризации Муалема-ван Генухтена. Для болотных экосистем этот эффект проявляется наиболее ярко и для его иллюстрации приведена именно

пористость почвы, поскольку правильный ее учет в модели ДСС определяет влагоемкость почвы и как в следствие коэффициент теплопроводности.

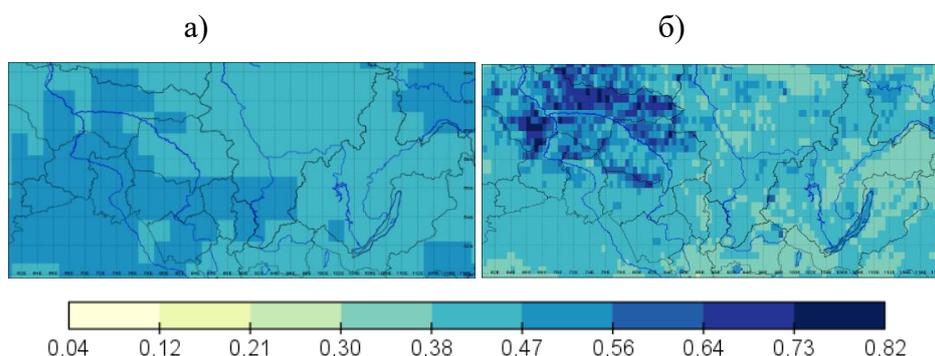


Рисунок 6. Пространственное распределение пористости почвы (cm^3/cm^3) для горизонтального разрешения $0.5^\circ \times 0.5^\circ$: а) ПН98; б) ПН2019.

По результатам экспериментов А (ГФК из ПН98) и Б (ГФК из ПН2019) были получены поля $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ температуры и влажности почвы, а также потоков явного и скрытого тепла за 30-летний период расчета с шагом по времени в 1 час, после чего были рассчитаны их средние многолетние значения. Для сравнения результатов экспериментов между собой была рассчитана разность средних многолетних величин за весь период и отдельно за теплый (июль) и холодный (январь) месяцы года. На рисунке 7 представлены поля разности средней многолетней температуры почвы ΔT (2, 15, 55 и 125 см) за весь период, за июль и январь месяцы между двумя модельными расчетами.

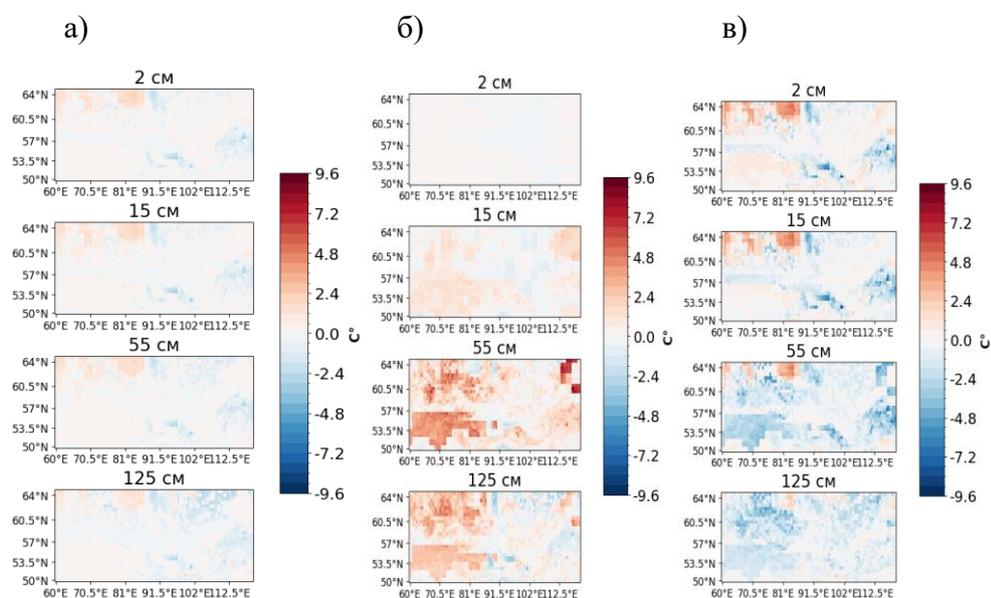


Рисунок 7. Поля разности средней многолетней (1991-2021 гг.) температуры почвы (ΔT) по глубинам, полученной моделью TerM по эксперименту А (ГФК из ПН98) и Б (ГФК из ПН2019): а) год; б) июль; в) январь.

Для более комплексного сравнения результатов двух экспериментов на рисунке 8 приведены поля средних многолетних значений влажности почвы (2, 15, 55 и 125 см) по

двум экспериментам А (рисунок 8а) и Б (рисунок 8б) и поля разности средних многолетних значений потока скрытого тепла ΔLE_s за весь период и отдельно за июль и январь месяцы (рисунок 8в).

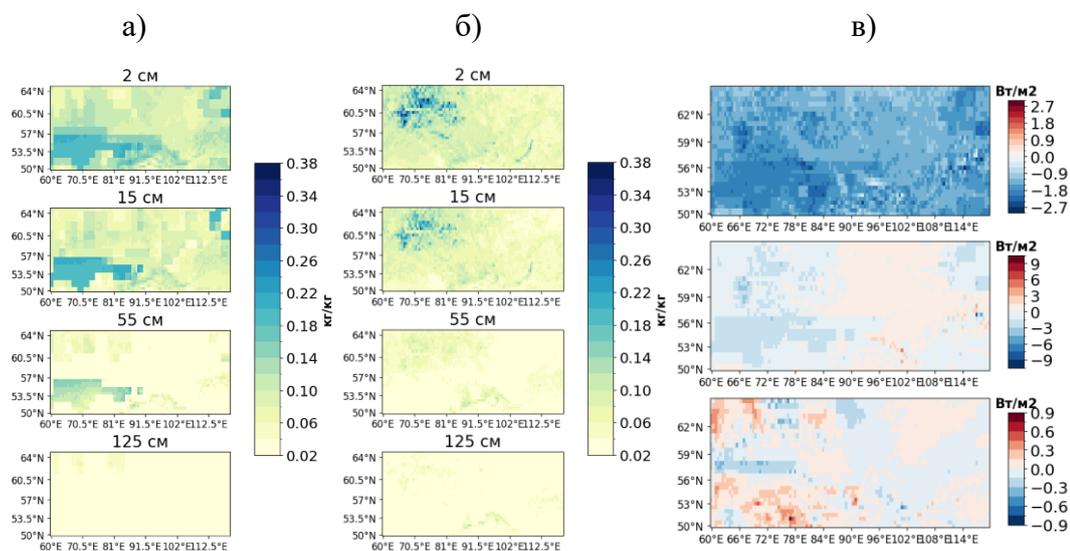


Рисунок 8. Поля средней многолетней (1991-2021 гг.) влажности почвы по глубинам, полученные моделью TerM с заданием: а) предписанных ГФК почвы из ПН98; б) агрегированных полей высокого разрешения ГФК почвы из ПН2019; в) поля разности средних многолетних значений потока скрытого тепла (ΔLE_s) (сверху вниз: за год, июль и январь).

Разность между полями средней многолетней температуры почвы варьируется от -3.5 °C до 2.3 °C, в январе – от -9.5 до 5.5 °C, в июле – от -3. До 9.2 °C (на глубинах 55 и 125 см). Разность между полями средних многолетних значений потока скрытого тепла (LE_s) – от -0.9 до -2.7 Вт/м². Для поля средней многолетней влажности почвы отличается сам паттерн ее распределения по территории, который четко согласуется с полем распределения пористости почвы (рисунок 6 и рисунок 8а и 8б).

Наибольшая разность температур почвы в июле имеет положительный знак, а в январе – отрицательный. Такое распределение разностей средних многолетних температур согласуется с паттерном влажности в почве. Где влажности в почве больше, там соответственно температура почвы летом выше, а зимой ниже. Для верхних слоев почвы небольшая разность температур может объясняться тем, что в большей степени температуру поверхности суши формирует атмосферное воздействие, которое одинаковое для двух экспериментов. Но с глубиной различие полей температуры увеличивается (для января и июля), поскольку с глубиной увеличивается влияние различия характеристик теплопроводности почвы.

Исходя из анализа полученных результатов экспериментов, можно отметить, что в модели ДСС использование одного значения ГФК для каждого из типов почвы по

треугольнику Ферре из ПН98 приводит к огрублению эффективного горизонтального разрешения результатов модельных расчетов (хорошо видно в распределении поля влажности, рисунок 8а). Также использование в модели ДСС одного значения ГФК для каждого из 11 типов почвы по треугольнику Ферре из ПН98 не отражает реальное распределение некоторых природных объектов, например, таких как болотные экосистемы. Правильный учет ГФК, например, пористости в модели ДСС, определяет влагоемкость почвы и как в следствие коэффициент теплопроводности.

Эксперимент 2.2а был направлен на то, чтобы показать чувствительность модели к горизонтальному разрешению ГФК.

Этот эксперимент имеет следующую постановку: для исследуемой территории Западной и Восточной Сибири из исходных данных ПН2019 с пространственным разрешением 30'' ($\sim 0.0083351135^\circ$) была выбрана область 100x100 ячеек (52.523° - 53.432° с.ш., 81.706° - 82.614° в.д., смотреть область А на рисунке 5, синий прямоугольник), имеющая неоднородную структуру почвы (рисунок 9 (1)) – домен с исходными ГФК. Затем гидрофизические коэффициенты выбранной области 100x100 ячеек были агрегированы как среднее арифметическое на сетку с шагом в 10 раз крупнее, но с теми же широтно-долготными границами, т.е. получен агрегированный набор характеристик размером 10x10 ячеек (рисунок 9 (2)) – область с агрегированными ГФК.

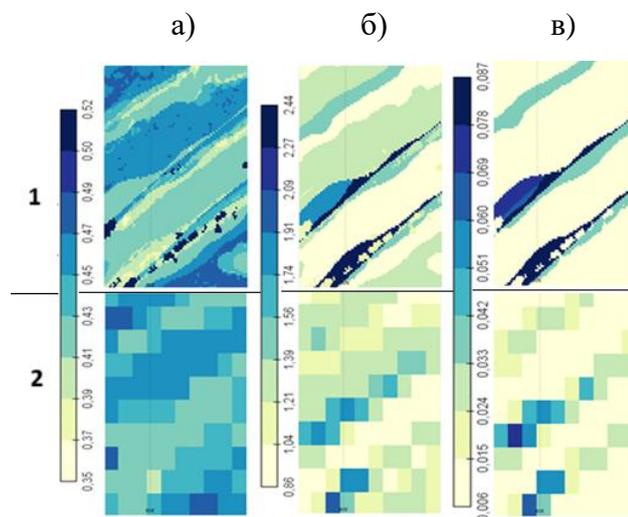


Рисунок 9. Пространственное распределение ГФК (а) – пористость почвы ($\text{см}^3/\text{см}^3$); б) – гидравлическая проводимость почвы насыщения K_s ($\text{см}/\text{день}$); в) параметр α ($1/\text{см}$): 1 – домен 100x100 ячеек; 2 – домен 10x10 ячеек.

Все остальные внешние параметры поверхности суши (типы растительности, параметры рельефа и т.д.) задавались для двух областей одинаковыми (значения ячеек низкого разрешения присваивались всем ячейкам высокого разрешения, попавшим в

ячейку низкого разрешения). Затем была проведена серия экспериментов на 30 лет с 1990 по 2021 год с шагом 1 час:

- для домена 100x100 ячеек (исходные ГФК, домен с высоким горизонтальным разрешением),
- для домена 10x10 ячеек (агрегированные ГФК, домен с низким горизонтальным разрешением).

По результатам экспериментов были получены поля моделируемых величин (температура и влажность почвы, потоки явного и скрытого тепла) высокого и низкого горизонтального разрешения (поля ВР и поля НР). Для сравнения результатов между собой, поля ВР были агрегированы на область 10x10 ячеек – агрегированные поля моделируемых величин (поля аВР). После чего была рассчитана разность между средними многолетними значениями полей аВР и средними многолетними значениями полей НР за весь период и отдельно за теплый (июль) и холодный (январь) период года

На рисунке 10 приведены значения разности между полученными полями моделируемых величин.

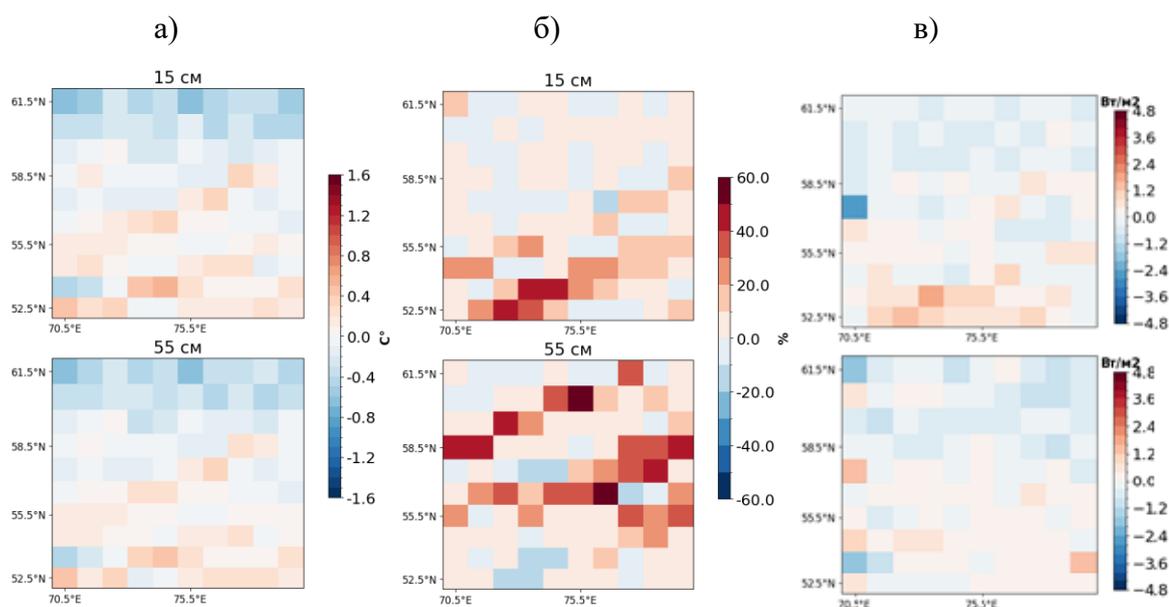


Рисунок 10 Поле разности для средних многолетних: а) температуры (Т) почвы на глубинах 15 и 55 см; в) потоков явного (H_s) и скрытого тепла (LE_s); б) поле относительной разности для средней многолетней влажности (W) почвы на глубинах 15 и 55 см.

Как видно по рисунку 10, разность средних многолетних температур почвы варьируется от -0.8 до 0.8 °C, при этом относительная разность поля влажности может достигать 60%. Распределение разности влажности (полосы, протягивающиеся с юго-запада на северо-восток) повторяет полосы повышенных и пониженных значений ГФК (Рисунок 10). Кроме того, ошибка увеличивается с глубиной, поскольку с глубиной

различие характеристик влагопроводности почвы всё сильнее влияет на влажность почвы. Средняя ошибка воспроизведения температуры почвы в теплый период года варьируется от $-1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $1.2\text{ }^{\circ}\text{C}$, в холодное время ошибка увеличивается до $1.6\text{ }^{\circ}\text{C}$ (на рисунке не представлено). Для влажности почвы и потоков явного и скрытого тепла средняя ошибка как за холодный, так и за теплый период остается в пределах значений средней многолетней ошибки. В качестве оценки ошибки для температуры почвы можно привести данные об изменении глобальной температуры, которое составляет $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ (IPCC, 2023), что на климатических масштабах считается достаточно большим.

Статистические метрики показывают, что поля, полученные моделью по агрегированным данным для области 10×10 ячеек, существенно отличаются от полей, воспроизводимых моделью при исходном высоком разрешении. Полагая, что ГФК из набора ПН2019 близки к реальному их распределению в природе, можно утверждать, что улучшение разрешения пространственной неоднородности характеристик почвы приводит к улучшению результатов моделирования и более точному воспроизведению тепловлагопереноса, что в случае использования блока ДСС в климатической модели, будет влиять на воспроизведение процессов в атмосфере. Т.е. увеличение пространственного разрешения как самой модели, так и входных данных о ГФК почвы, позволит более точно описывать тепловлагоперенос в почве, даже в случае если результаты моделирования ДСС затем будут агрегированы на более крупную сетку климатической модели для использования их в качестве граничных условий.

Эксперимент 2.2b. В предыдущем эксперименте агрегирование ГФК с сетки высокого разрешения на сетку с низким разрешением производилось арифметическим осреднением с площадными коэффициентами. Однако существуют другие методы осреднения (Beliakov et al 2016). В этой связи возникает вопрос чувствительности результатов моделирования к выбору метода агрегирования гидрофизических коэффициентов. В следующем эксперименте сравнивались три метода агрегирования: среднее арифметическое взвешенное (САВ), среднее геометрическое взвешенное (СГВ) и среднее гармоническое взвешенное (СГрВ). Такие методы часто используются для осреднения параметров в гидрологических моделях (Мотовилов и Гельфан, 2018).

Дополнительно к блоку экспериментов 2.2a были проведены численные эксперименты, в которых ГФК, для выбранного домена 100×100 ячеек, были агрегированы с помощью СГВ и СГрВ на сетку в 10 раз крупнее, т.е. получен агрегированный набор характеристик размером 10×10 ячеек. Также был проведен эксперимент с использованием комбинации гидрофизических коэффициентов, агрегированных разными методами

(гранулометрический состав – САВ, параметры для ОГХ – СГВ, гидравлическая проводимости при максимальном насыщении – СГрВ).

Анализ полученных экспериментов показал, что больших отличий в поле температур, рассчитанных с использованием агрегированных ГФК разными методами, не наблюдается. Средняя абсолютная ошибка (MAE) варьируется от 0.8 до 1.1 °С для среднегодовых значений температуры, для средних июльских температур ошибка варьируется от 1.6 до 2.0 °С, для средних январских – от 2.2 до 2.7 °С. При рассмотрении же поля влажности наименьшую среднюю абсолютную ошибку (MRE) дал эксперимент с комбинацией гидрофизических коэффициентов, агрегированных разными методами. MRE для среднегодовых значений влажности составила 56 %, для средних июльских – 64 %, для средних январских – 72 %. Максимальную ошибку показал эксперимент, где все гидрофизические коэффициенты были агрегированы с помощью среднего гармонического взвешенного.

Таким образом в моделях ДСС на результаты моделирования тепловлагоденоса, помимо выбора самих гидрофизических коэффициентов так же влияет выбор метода агрегирования, применяемого к конкретным видам параметров. Комбинация же методов дает наилучший результат и возможно более применима в такого рода задачах.

Эксперимент 3. Третья группа экспериментов заключалась в установлении чувствительности решения модели к горизонтальному разрешению. Для этого была проведена серия экспериментов для выбранной территории юга Западной и Восточной Сибири с разным горизонтальным разрешением модели ($5^\circ \times 4^\circ$, $1^\circ \times 1^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$) и с агрегированными на эти разрешения параметрами поверхности суши, в том числе ГФК. Период моделирования – 30 лет (с 1990 по 2021 год).

Полученные результаты экспериментов $1^\circ \times 1^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ были агрегированы на сетку $5^\circ \times 4^\circ$ и наложены на диаграмму рассеяния относительно результата эксперимента с горизонтальным разрешением $5^\circ \times 4^\circ$ (рисунок 11).

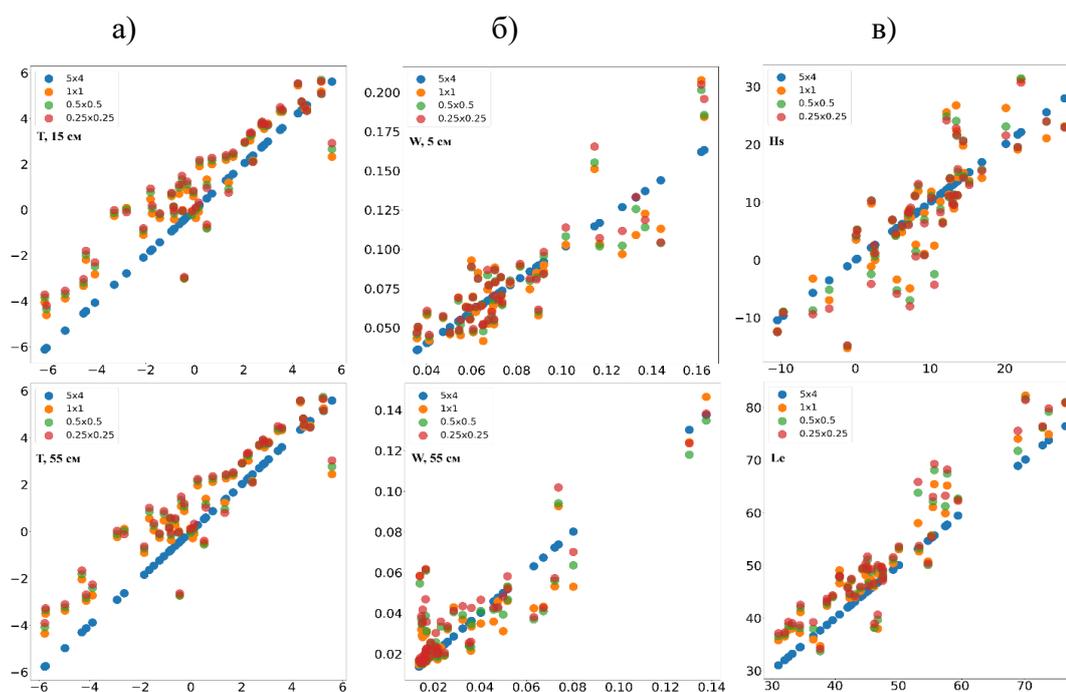


Рисунок 11. Результаты моделирования, полученные при горизонтальном разрешении $1^\circ \times 1^\circ$, $0.5^\circ \times 0.5^\circ$, $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ и затем агрегированных на сетку $5^\circ \times 4^\circ$ (ось ординат), относительно результата эксперимента с горизонтальным разрешением $5^\circ \times 4^\circ$ (ось абсцисс): а) – средняя многолетняя температура почвы (Т), $^\circ\text{C}$, б) – средняя многолетняя влажность почвы (W), кг/кг, в) – средние многолетние значения потоков явного (H_s) и скрытого тепла (LE_s), Вт/м².

Увеличение горизонтального разрешения модели приводит к отличиям в распределении полей моделируемых характеристик по сравнению с более низким горизонтальным разрешением. При более низком горизонтальном разрешении наблюдается некоторое занижение температуры почвы и потока скрытого тепла по сравнению с более мелким. И чем выше разрешение, тем больше разность. В распределении влажности и потока явного тепла такой явной зависимости не наблюдается, разность может быть, как в меньшую, так и в большую стороны.

В ЗАКЛЮЧЕНИИ перечислены основные результаты исследования и сформулированы выводы.

Правильность воспроизведения тепловлагоденоса в почве при сравнении с данными измерений значительно зависит от правильности описания гидрофизических коэффициентов в моделях ДСС.

В моделях климата и погоды повышение горизонтального разрешения в деятельном слое суши существенно влияет на качество воспроизведения компонент теплового баланса как следствие агрегирования ГФК. При этом помимо самого

агрегирования ГФК, также влияет и метод агрегирования, выбор которого зависит от вида ГФК.

Если ГФК в модели ДСС задаются как предписанные значения по типам почвы, то это приводит к чрезмерному огрублению эффективного горизонтального разрешения результатов расчетов модели ДСС, а также к не воспроизведению паттернов температуры и влажности почвы для различных природных объектов (например, болот), что показано на тестовой территории. Если шаг сетки модели меньше чем эффективное разрешение при использовании ГФК по типам, то в модели ДСС необходимо использовать данные высокого горизонтального разрешения о ГФК, агрегированные на сетку модели.

Изменение пространственного разрешения, вариативность различных наборов данных для моделей ДСС как части МЗС обуславливает создание гибкого программного обеспечения, имеющего модульную архитектуру и все необходимые методы. Одним из ключевых результатов данной диссертации и является создание такого ПО: <http://tesla.parallel.ru/Ryazanova/TerMPS>.

СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи, опубликованные в рецензируемых изданиях, входящих в международные базы цитирования Web of Science, Scopus, RSCI:

1. **Рязанова А.А.** Применимость различных педотрансферных функций к описанию гидрофизических характеристик почв (грунтов) / Рязанова А.А., Богомолов В.Ю., Медведев А.И. // Водные ресурсы. – 2023. – Vol. 50 – №5. – С. 585-601. DOI: 10.31857/S0321059623600114
(Двухлетний импакт-фактор по ядру РИНЦ: 1.344, двухлетний импакт-фактор РИНЦ: 1.664) (1.96 п.л., авторский вклад.: анализ литературы, обработка и подготовка данных, постановка задачи, проведение расчетов, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка к публикации в журнале)
На английском: **Ryazanova A. A.** The Applicability of Various Pedotransfer Functions to the Description of Soils / Ryazanova A. A., Bogomolov V. Yu., Medvedev A. I. // Water Resources. – 2023. – Vol. 50 – No. 5. – P. 732-747. – DOI 10.1134/s0097807823700069.
(JIF – 0.9 (Q4), JCI – 0.19) (1.85 п.л., авторский вклад.: анализ литературы, обработка и подготовка данных, постановка задачи, проведение расчетов, анализ результатов, формулирование выводов и подготовка к публикации в журнале).
2. Stepanenko V.M. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications / Stepanenko V.M., Medvedev, A.I., Bogomolov V., Shangareeva S.K., **Ryazanova AA.**, Faykin G.M., Ryzhova I.M., Suiazova V.I., Debolskiy, A.V., Chernenkov

A.Yu. // Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling. – 2024. – vol. 39 – №6 –, pp. 363-377. <https://doi.org/10.1515/rnam-2024-0031>

(JIF – 0.5 (Q4), JCI – 0.28) (1.73 п.л., авторский вклад: подбор входных параметров поверхности суши (в том числе ГФК) для модели ДСС TerM, агрегирование входных параметров на сетку модели ДСС TerM, разработка программного обеспечения для подготовки входных параметров поверхности суши для модели ДСС TerM).

3. **Рязанова А.А.** TerMPS: программное обеспечение для подготовки данных о параметрах поверхности суши, используемых в моделях деятельного слоя суши и моделях Земной системы / Рязанова А.А., Богомолов, В.Ю., Степаненко, В.М., Варенцов, М.И., Медведев, А.И. // Вычислительные методы и программирование. – 2024. – 11–29.

(Двухлетний импакт-фактор по ядру РИНЦ: 0.319, двухлетний импакт-фактор РИНЦ: 0.468) (2.19 п.л., авторский вклад: анализ литературы, обработка и подготовка данных, разработка концепции программного обеспечения, разработка алгоритмов программного обеспечения, создание технической документации, формулирование выводов и подготовка к публикации в журнале).

4. Voropay N. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia / Voropay N., **Ryazanova A.**, Dyukarev E. // Atmospheric Research. – 2021. – V.254. – 105528. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2021.105528>.

(JIF – 4.5 (Q1), JCI – 1.20) (1.5 п.л., авторский вклад: постановка задачи, обработка и подготовка данных, расчет статистических метрик, анализ результатов, подготовка к публикации в журнале).

Свидетельства о регистрации прав на программное обеспечение и базы данных:

1. Программа подготовки входных данных для модели деятельного слоя почвы, совместимая с климатической моделью INM-CM6, № 2023682880, 2023.
2. Программная реализация расчетной модели для определения статистических характеристик результатов работы моделей деятельного слоя, № 2023666746, 2023.
3. Архив пространственных данных, описывающих динамику температуры и влаги в слое почвы глубиной 10м, а также компоненты теплового баланса поверхности и потоков метана с болот для территории Сибири, № 2024626244, 2024.

Список цитируемых литературных источников:

- Аббазов А.И. Гармонизация наборов данных о гидротермодинамических характеристиках почв и пространственном распределении болот, для западной Сибири / А.И. Аббазов [и др.] // ENVIROMIS 2024. – Томск: Томский центр научно-технической информации, 2024. – С. 133-136.

- Алексеев А.А. Моделирование современного климата с помощью атмосферной модели ИВМ РАН. Описание модели А5421 версии 1997 года и результатов эксперимента по программе АМІР II / В.А. Алексеев [и др.]. – Москва: ВИНТИ, 1998.
- Володин Е.М. Параметризация процессов тепло- и влагообмена в системе растительность - почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. Физика атмосферы и океана / Е.М. Володин, В.Н. Лыкосов // Известия РАН. – 1998. – Т. 5. – № 34. – С. 622-633.
- Володин Е.М. Параметризация процессов тепло-и влагообмена в системе растительность-почва для моделирования общей циркуляции атмосферы. Физика атмосферы и океана. / Е.М. Володин, В.Н. Лыкосов // Известия РАН.–1998.–Т.4.–№ 34.–С. 453-465.
- Мотовилов Ю.Г. Модели формирования стока в задачах гидрологии речных бассейнов / Ю.Г. Мотовилов, А.Н. Гельфан. – Москва: Российская академия наук, 2018.
- Рязанова А.А. Применимость различных педострансферных функций к описанию гидрофизических характеристик почв (грунтов) / Рязанова А.А., Богомолов В.Ю., Медведев А.И. // Водные ресурсы. – 2023. – Т. 50. – №5. – С. 585-601.
- Рязанова А.А. TerMPS: программное обеспечение для подготовки данных о параметрах поверхности суши, используемых в моделях деятельного слоя суши и моделях Земной системы / А.А. Рязанова [и др.] // Вычислительные методы и программирование. – 2024. – № (83). – С. 11-29.
- Травова С. В. Качество воспроизведения состояния почвы моделью деятельного слоя суши ИВМ РАН — МГУ в составе модели прогноза погоды ПЛАВ. / Травова С.В. [и др.] // Метеорология и гидрология. – 2022. – № 3. – С. 5–24.
- Шейн Е.В. Курс физики почв / Е.В. Шейн. – Москва: Изд-во МГУ, 2005.
- Beliakov G. A Practical Guide to Averaging Functions: Studies in Fuzziness and Soft Computing. Т. 329 / G. Beliakov, H. Bustince Sola, T. Calvo. – Cham: Springer International Publishing, 2016.
- Best M.J. The Joint UK Land Environment Simulator (JULES), model description – Part 1: Energy and water fluxes / M.J. Best [et al.] // Geoscientific Model Development. – 2011. – V. 4. – Part 1. – № 3. – P 677-699.
- Bogomolov V.Yu. Verification of the INM RAS-MSU land surface scheme using temperature and moisture measurements in peat and mineral soils / V. Bogomolov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2019. –V. 386. – № 1. – P. 012031.
- Bogomolov V.Yu. Modeling the temperature and humidity conditions of mineral soils in an active layer model taking into account in depth changes in the thermodynamic properties of the soil / V.Y. Bogomolov [et al.] // IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. – 2020. – V. 611. – № 1. –P. 012012.
- Brooks R. H. and Corey. A. T. Hydraulic Properties of Porous Media and Their Relation to Drainage Design / R. H. Brooks and A. T. Corey // Transactions of the ASAE. – 1964. – V. 7. – № 1. – P. 0026-0028.
- Chen F. Coupling an Advanced Land Surface–Hydrology Model with the Penn State–NCAR MM5 Modeling System. Part I: Model Implementation and Sensitivity / F. Chen, J. Dudhia // Monthly Weather Review. – 2001. – V. 129. – № 4. – P. 569-585.
- Clapp R.B. Empirical equations for some soil hydraulic properties / R.B. Clapp, G.M. Hornberger // Water Resources Research. – 1978. – V. 14. – № 4. – P. 601-604.
- Cosby B.J. A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils / B.J. Cosby [et al.] // Water Resources Research. – 1984. – V. 20. – № 6. – P. 682-690.
- Dai Y. A Global High-Resolution Data Set of Soil Hydraulic and Thermal Properties for Land Surface Modeling / Y. Dai [et al.] // Journal of Advances in Modeling Earth Systems. – 2019. – V. 11. – № 9. – P. 2996-3023.
- Decharme B. Recent Changes in the ISBA-CTRIP Land Surface System for Use in the CNRM-CM6 Climate Model and in Global Off-Line Hydrological Applications / B.

- Decharme [et al.] // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2019. – V. 11. – № 5. – P. 1207-1252.
- Dyukarev E.A. Differences in temperature regime of mineral and peat soil in Bakchar district of Tomsk region / E.A. Dyukarev, A.A. Vyaizya, K.V. Kiselev // *Environmental Dynamics and Global Climate Change*. – 2020. – V. 10. – № 2. – P. 100-109.
- Earth Resources Observation And Science (EROS) Center. Global Land Cover Characterization (GLCC) / U.S. Geological Survey, 2017.
- Fisher R.A. Perspectives on the Future of Land Surface Models and the Challenges of Representing Complex Terrestrial Systems / R.A. Fisher, C.D. Koven // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2020. – V. 12. – № 4.
- Gutmann E.D. The effect of soil hydraulic properties vs. soil texture in land surface models / E.D. Gutmann, E.E. Small // *Geophysical Research Letters*. – 2005. – V. 32. – № 2. – P. 2004GL021843.
- Hersbach H. The ERA5 global reanalysis / H. Hersbach [et al.] // *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*. – 2020. – V. 146. – № 730. – P. 1999-2049.
- Intergovernmental Panel On Climate Change (IPCC). Climate Change 2021–The Physical Science Basis: Working Group I Contribution to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021–Cambridge University Press, 2023.
- Kabat P. The scaling characteristics of soil parameters: From plot scale heterogeneity to subgrid parameterization / P. Kabat, R.W.A. Hutjes, R.A. Feddes // *Journal of Hydrology*. – 1997. – V. 190. – № 3-4. – P. 363-396.
- Kishné A. Sz. Evaluation and improvement of the default soil hydraulic parameters for the Noah Land Surface Model / A.Sz. Kishné [et al.] // *Geoderma*. – 2017. – V. 285. – P. 247-259.
- Lawrence D.M. The Community Land Model Version 5: Description of New Features, Benchmarking, and Impact of Forcing Uncertainty / D.M. Lawrence [et al.] // *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*. – 2019. – V. 11. – № 12. – P. 4245-4287.
- Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media / Y. Mualem // *Water Resources Research*. – 1976. – V. 12. – № 3. – P. 513-522.
- Pachepsky Y. Development of pedotransfer functions in soil hydrology: Developments in soil science / Y. Pachepsky, W.J. Rawls. // Amsterdam New York: Elsevier, 2004. – V. 30.
- Schaap M.G. Rosetta: a computer program for estimating soil hydraulic parameters with hierarchical pedotransfer functions / M.G. Schaap, F.J. Leij, M.Th. Van Genuchten // *Journal of Hydrology*. – 2001. – V. 251. – № 3-4. – P. 163-176.
- Shein E.V. Pedotransfer functions: State of the art, problems, and outlooks / E.V. Shein, T.A. Arkhangel'skaya // *Eurasian Soil Science*. – 2006. – V. 39. – № 10. – P. 1089-1099.
- Soet M. Functional behaviour of pedotransfer functions in soil water flow simulation / M. Soet, J.N.M. Stricker // *Hydrological Processes*. – 2003. – V. 17. – № 8. – P. 1659-1670.
- Stepanenko V.M. Land surface scheme TerM: the model formulation, code architecture and applications / V.M. Stepanenko [et al.] // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. – 2024. – V. 39. – Land surface scheme TerM. – № 6. – P. 363-377.
- Takata K. Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff / K. Takata, S. Emori, T. Watanabe // *Global and Planetary Change*. – 2003. – V. 38. – P. 209-222.
- Van Genuchten M.Th. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils / M.Th. Van Genuchten // *Soil Science Society of America Journal*. – 1980. – V. 44. – № 5. – P. 892-898.
- Volodin E.M. Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model / E.M. Volodin [et al.] // *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*. – 2018. – V. 33. – № 6. – P. 367-374.
- Voropay N. High-resolution bias-corrected precipitation data over South Siberia, Russia / N. Voropay, A. Ryazanova, E. Dyukarev // *Atmospheric Research*. – 2021. – V. 254. – C. 105528.

- Weber T.K.D. Hydro-pedotransfer functions: a roadmap for future development. / T.K.D. Weber [et al.] // Hydrol. Earth Syst. Sci. – 2024. – V.28. – P.3391-3433.
- Wilson M.F. A global archive of land cover and soils data for use in general circulation climate models / M.F. Wilson, A. Henderson-Sellers // Journal of Climatology. – 1985. – V. 5. – № 2. – P. 119-143.
- Zhu J. Upscaling of soil hydraulic properties for steady state evaporation and infiltration / J. Zhu, B.P. Mohanty // Water Resources Research. – 2002. – V. 38. – № 9.

Рязанова Анна Александровна

Чувствительность оценок теплового баланса почвогрунтов к гидрофизическим
коэффициентам в модели деятельного слоя суши

(Автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата физико-математических наук)